

**Труды Военно-космической  
академии имени А.Ф. Можайского**  
Научное рецензируемое издание  
Выходит с 1942 года

**Выпуск 668**

2019 г.

---

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение  
высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»  
Министерства обороны Российской Федерации

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского  
*доктор техн. наук, профессор* **М.М. Пеньков**

Члены редакционного совета:

**С.В. Буг** – заместитель начальника Михайловской военной артиллерийской академии  
по учебной и научной работе *доктор пед. наук, проф.*;

**В.П. Гаенко** – главный научный сотрудник НИЦ БТС 12 ЦНИИ МО РФ  
*доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники*;

**А.М. Гончаров** – начальник Главного управления научно-исследовательской деятельности и технологического  
сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) МО РФ *доктор воен. наук, проф.*;

**М.А. Еремеев** – профессор кафедры института комплексной безопасности и специального приборостроения  
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» *доктор техн. наук, проф.*;

**А.В. Кузичкин** – заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт телевидения»  
по информационным технологиям *доктор техн. наук, проф.*;

**Б.В. Соколов** – главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации  
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ*;

**К.Г. Ставров** – главный научный сотрудник научно-исследовательского океанографического центра  
Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института *доктор техн. наук, проф.*;

**А.В. Сержантов** – заместитель начальника Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил  
Российской Федерации по научной работе *доктор воен. наук, проф.*

Главный редактор:

*доктор техн. наук, проф.* **Ю.В. Кулешов**

Редколлегия:

председатель **Ю.В. Кулешов**, *доктор техн. наук, проф.*;

зам. председателя **И.В. Сахно**, *доктор техн. наук, проф.*;

ответственный секретарь **А.Л. Федер**, *кандидат техн. наук, доц.*;

**Н.Ф. Аверкиев**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Ф. Алексеев**, *доктор техн. наук, доц.*;

**Т.В. Алексеев**, *доктор истор. наук, доц.*; **А.П. Алёшкин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**В.Н. Арсеньев**, *доктор техн. наук, проф.*; **Д.Н. Бирюков**, *доктор техн. наук, доц.*;

**И.А. Готюр**, *доктор техн. наук, доц.*; **А.П. Доронин**, *доктор техн. наук, доц.*;

**И.Ю. Еремеев**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Замарин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**В.Н. Калинин**, *доктор техн. наук, проф.*; **Б.Д. Казахов**, *доктор воен. наук, проф.*;

**В.В. Клейменов**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.В. Козлов**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Н.С. Кужекин**, *кандидат филос. наук, проф.*; **В.Н. Кузьмин**, *доктор воен. наук, проф.*;

**Н.Б. Кунгурова**, *доктор пед. наук, доц.*; **Е.Л. Лебедев**, *доктор техн. наук, проф.*;

**А.Г. Ломако**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Лоскутов**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Г.Н. Мальцев**, *доктор техн. наук, проф.*; **Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук*;

**А.Н. Павлов**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Паршуткин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Н.А. Репях**, *кандидат филос. наук, доц.*; **А.М. Сычева**, *доктор техн. наук, проф.*;

**И.В. Фоминов**, *доктор техн. наук*; **А.В. Харченко**, *доктор техн. наук, доц.*;

**К.Ю. Цветков**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Чарушников**, *доктор воен. наук, проф.*

Издание зарегистрировано  
Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора).  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.  
Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий,  
в которых должны быть опубликованы  
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук (с 01 декабря 2015 г.).  
Издание включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Ответственный за выпуск:  
начальник РИО **С.В. Чернышев**

Редакторы:  
*А.В. Головина, Е.Е. Лавриенко, Е.И. Леончук,  
Г.В. Паниковских, О.В. Филиппова*

Техническая поддержка:  
*Т.Н. Румянцева*

Адрес:  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;  
тел.: 8 (812) 347-97-69;  
<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 27.09.2019  
Формат печатного листа 445×300/4  
Уч.-печ. л. 112,00. Уч.-изд. л. 55,75  
Тираж 50 экз. Заказ 3754/72  
Отпечатано в типографии  
Военно-космической академии  
имени А.Ф. Можайского

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Алдохина В.Н., Гудаев Р.А., Смирнов М.С., Шаймухаметов Ш.И.</i> Модель системы мониторинга и контроля воздушно-космического пространства .....	8
<i>Калинин В.Н.</i> О задаче оптимального управления операциями информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли в условиях целенаправленных возмущений .....	20
<i>Колесников К.Г., Масалкин А.А., Москвин Б.В.</i> Параметрическая оптимизация информационного обмена в сети связи с динамически изменяющейся структурой .....	31
<i>Привалов А.Е., Хлебников С.Г.</i> Многоагентная имитационная модель функционирования космодрома на уровне APS-системы .....	37
<i>Скворцов Д.В.</i> Подход к моделированию функционирования космических аппаратов в условиях воздействия факторов космического пространства с использованием искусственных нейронных сетей .....	45
<i>Скорыходов Я.А.</i> Модель и алгоритм оценивания показателей качества функционирования космических систем автоматической идентификации и определения местоположения подвижных объектов .....	58

### СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

<i>Абазина Е.С., Цветков К.Ю.</i> Концептуальная модель взаимодействия стего-систем передачи данных в составе эталонной модели взаимодействия открытых систем .....	70
<i>Арсеньев В.Н., Белихин Е.Н., Трофимов И.А.</i> Определение параметров движения космического аппарата по результатам их измерений бортовыми и наземными измерительными средствами .....	81
<i>Иванов А.В.</i> Модель системы однопозиционного определения местоположения источников радиоизлучения высокочастотного диапазона, учитывающая пространственно-поляризационные параметры радиоволн .....	89
<i>Мысливцев Т.О., Невзоров В.И., Павский В.Ф., Цыкунов В.Н.</i> Допустимый уровень нестабильности частоты при пространственной синхронизации крупногабаритных активных фазированных антенных решеток космического базирования .....	97

## СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алексеев В.Ф., Прокофьев А.В., Чернов И.В., Якунин В.И.* Подход к оцениванию качества геодезического обеспечения удаленного района ..... 103
- Алексеев В.Ф., Осипов А.Г., Прокофьев А.В., Хайруллин Р.Р.* Методика автоматизированного создания специальной карты маскирующих свойств лесной растительности по материалам аэрокосмической съемки ..... 111
- Алехин С.Г., Готюр И.А., Семенов В.В.* Метод расчета коэффициента прозрачности атмосферы для тепловизионных систем в спектральном диапазоне 8–12 мкм ..... 117
- Астапович А.В., Литинский Е.И.* Обоснование области расположения свободной станции электронного тахеометра для съемки ситуации и рельефа участков коррекции системы неземной навигации подвижных объектов ..... 129
- Вышинский А.П., Зоц М.Н., Колесник А.В., Ортиков М.Ю.* Методика расчета периодичности наблюдения районов с учетом детальности космической съемки ..... 137
- Данилюк А.С., Дианов С.В., Тавалинский Д.А.* Оценивание совместной применимости алгебраических и статистических методов анализа линейных корректирующих кодов блочной структуры ..... 145
- Дашкин Э.Р., Поляков В.В.* Способ совместного сокращения избыточности представления данных и оценивания ранга ковариационной матрицы изображения ..... 152
- Ефременко А.Н., Канарский И.Д., Королёва О.А.* Методика оперативной диагностики геофизических условий, благоприятных для развития опасных природных процессов и явлений ..... 160
- Шульгин А.Н., Шушаков А.О.* Исследование влияния методов управления вычислительной нагрузкой мобильных многопроцессорных вычислительных комплексов на их автономность ..... 170

## ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Домбровский А.Ф.* Подход к восстановлению неизвестных коммуникационных протоколов по сетевому трафику ..... 175

## РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ. ВОЕННАЯ МЕТРОЛОГИЯ

- Арсеньев В.Н., Зиновьев К.Г., Трофимов И.А., Ядренкин А.А.* Метод оценивания характеристик точности систем управления перспективных объектов по ограниченному числу натуральных испытаний ..... 182

<i>Быстров С.Ю., Кузьмичёв Ю.А., Петров Ю.В., Шевкунов И.А.</i> Анализ статистических характеристик измерений навигационных параметров при сбоях, отказах и ухудшении точности в работе измерителей бортовых систем управления летательных аппаратов .....	189
<i>Вивчарь Р.М., Решетников Д.В.</i> Оценивание влияния параметров системы эксплуатации технологического оборудования РКК на вероятность выполнения технологической операции за заданное время .....	197
<i>Головчинский В.О., Козлов В.В., Лагун А.В.</i> Координация ресурсораспределения в иерархической структуре ракетно-космического комплекса .....	207
<i>Гончаров П.С., Кулешов Ю.В., Мартынов В.В., Цыбин О.Ю., Шуневич Н.А.</i> Вакуумная установка для огневых испытаний электрических ракетных двигателей .....	216
<i>Гончаров П.С., Мартынов В.В., Пеньков М.М., Скунницкий В.М., Цыбин О.Ю., Шуневич Н.А.</i> Импульсный источник питания для проведения испытаний электрических ракетных двигателей .....	224
<i>Горбулин В.И., Каргу Д.Л., Поляков С.А., Радионов Н.В.</i> Математическое моделирование планирования этапов генерирования и потребления электроэнергии бортовыми системами космических аппаратов: сценарный подход .....	229
<i>Горбулин В.И., Крыжановский В.И., Трофимов И.А.</i> Алгоритм оптимального по быстродействию перенацеливания космического аппарата при наблюдении объектов различного типа .....	237
<i>Груздев Н.В., Крупский К.А., Шавин А.С.</i> Методика обоснования рационального состава экспериментально-испытательной базы полигона (космодрома) в соответствии с потребностями обеспечения испытаний космических средств...	250
<i>Донцов А.А., Караваев М.А., Нагалин Д.А., Тонконогов О.Ю.</i> Оценка погрешностей формирования виртуального опорного канала при испытаниях авиационных комплексов защиты от средств высокоточного поражения .....	257
<i>Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Пачин А.В.</i> Комплексная модель функционирования подвижной системы обеспечения запасными частями сложных технических комплексов .....	266
<i>Завьялова Г.М., Лебедев Е.Л.</i> Методика входного контроля качества сталей и сплавов специального назначения по статистическим данным оптического изображения при микрофрактографическом анализе .....	276
<i>Захарчук И.И., Пронин А.Н., Рошупкин А.А.</i> Модель интеллектуального датчика бортового оборудования космического аппарата длительного функционирования .....	283

*Зыков Д.Д., Крупский К.А., Спасивцев А.Б.* Обоснование направлений развития системы средств высокоточных измерений ..... 290

*Кивчун О.Р.* Предложения по построению автоматизированной системы управления электропотреблением при эксплуатации объектов военной инфраструктуры Балтийского флота ..... 298

*Матюнин А.С., Росляков Е.М.* Модель технического состояния трубопроводной сети системы водоснабжения объектов космических войск ..... 309

*Мокроусов А.С.* Алгоритм формирования государственного заказа на закупку нефтепродуктов для Вооруженных сил РФ ..... 315

### ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК

*Алтухов А.И., Калинин В.Н.* Мультимедийное сопровождение лекций как важнейшая дидактическая составляющая физического образования в военном вузе ..... 322

*Андросов А.М., Сорокин В.П.* Экспериментальная проверка эффективности модели физической подготовки курсантов Военной академии связи ..... 329

*Багрецов С.А., Молдованова С.М.* Модель профессиональной подготовки научно-педагогических и научных кадров в вузе с учетом динамики совершенствования систем вооружения ..... 335

*Багрецов С.А., Молдованова С.М.* Модель функционирования системы управления подготовкой научно-педагогических и научных кадров в вузе ..... 344

*Баранов А.А., Свидзинская Г.Б., Шифф В.К.* Формирование образа профессии у будущих офицеров Государственной противопожарной службы МЧС России ..... 355

*Ерофеев А.В., Покидов Л.В.* Методика применения специального программного комплекса учебного командного пункта для формирования у обучающихся профессиональных компетенций по тактико-специальной подготовке ..... 365

*Иванов А.Н., Селихина Н.В.* Система работы должностных лиц вузов Министерства обороны Российской Федерации по выявлению, учёту и развитию индивидуально-психологических свойств личности курсанта в процессе обучения ..... 370

*Калмычков И.Е., Рахматулин А.М., Смирнов Д.Н.* Формирование компетенции программирования при освоении образовательных программ подготовки специалистов в области обработки радиосигналов ..... 375

<i>Башикирцев В.П., Касавцев М.Ю.</i> Противоречия формирования личностных качеств военнослужащих в процессе воинского воспитания при повседневной деятельности: состояние, пути и способы оптимизации .....	381
<i>Кофнов О.В., Шелудяков А.М.</i> Формирование навыков автоматизированного моделирования структурных схем бортовых систем управления на практических занятиях по инженерной графике .....	390
<i>Кужекин Н.С., Мышко В.В., Чикуров В.А.</i> Модель оценивания результатов обучения слушателей и курсантов в ходе рубежного контроля успеваемости ...	395
<i>Столяров А.Л.</i> Условия успешной реализации педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов военных вузов .....	403
<b>ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК</b>	
<i>Кужекин Н.С., Репях Н.А., Хрустова А.Н.</i> Идеи русского космизма в сочинениях А.В. Сухова-Кобылина .....	407
<i>Огородников В.П., Репях Н.А.</i> Диалектика свободы и ответственности в деятельности военнослужащего .....	412
Рефераты статей .....	421
Сведения об авторах .....	434
Сведения о рецензентах .....	445

В.Н. Алдохина,  
*кандидат физико-математических наук;*  
Р.А. Гудаев,  
*кандидат техн. наук;*  
М.С. Смирнов;  
Ш.И. Шаймухаметов,  
*кандидат техн. наук*

## **МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Представлен вариант модели системы мониторинга и контроля воздушно-космического пространства, которая позволяет производить расчет широкого перечня параметров в интересах оценивания качества информационного обеспечения потребителей информации.

Ключевые слова: модель, система мониторинга и контроля, информационное средство, воздушно-космическое пространство, обнаружение, сопровождение.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При изучении сложных технических систем перед исследователем нередко встает проблема, связанная с моделированием процесса ее функционирования. Например, система мониторинга и контроля (СМК) воздушно-космического пространства (ВКП) представляет собой сложную географически распределенную совокупность взаимосвязанных информационных средств (ИнфСр). Как правило, создать модель отдельного ИнфСр с определенной степенью детализации не так уж сложно, а вот синтезировать совокупность ИнфСр, действующих в едином информационном поле и по единому замыслу, задача непростая, особенно если необходимо определить качество решаемых ими задач в интересах потребителей. Потребителями здесь являются различные организации, для которых информация от СМК ВКП представляет определенный интерес.

В данной публикации отражены результаты исследования модели функционирования СМК ВКП с целью определения пространственных и временных характеристик, достигаемых за счет использования сети географически распределенных ИнфСр.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

- рассмотреть особенности оценивания эффективности работы СМК ВКП на основе применения шкал информационного обеспечения (ИО);
- разработать структуру модели СМК ВКП;
- рассмотреть особенности моделирования ИнфСр СМК ВКП;
- рассмотреть особенности моделирования движения объекта контроля (ОК) в ВКП;
- разработать модель СМК ВКП;
- провести экспериментальную апробацию СМК ВКП.

### **ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ШКАЛ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Для того чтобы потребитель воспользовался информацией, полученной от СМК ВКП, необходимо заблаговременно подготовить необходимую информацию с требуемой точностью

[ошибка измерений не должна превышать требуемого значения, то есть должно быть проведено достаточное количество работ по получению координатной информации (КИ) об ОК  $N^{\text{ПолКИ}} \geq N_{\text{тр}}^{\text{ПолКИ}}$ ], при этом тип ОК должен быть известен [вероятность распознавания должна быть выше требуемого значения, то есть должно быть проведено достаточное количество работ по получению некоординатной информации (НКИ) об ОК  $N^{\text{ПолНКИ}} \geq N_{\text{тр}}^{\text{ПолНКИ}}$ ]. Время  $T$ , когда задачи потребителей будут выполнены, не должно превышать требуемого значения  $T_{\text{тр}}$ , а интервал времени между началом формирования плана проведения работ и непосредственным их проведением потребителями  $\Delta t$  не должен превысить  $t_{\text{тр}}$ .

Представим указанные условия в виде следующей системы:

$$N^{\text{ПолКИ}} \geq N_{\text{тр}}^{\text{ПолКИ}}, N^{\text{ПолНКИ}} \geq N_{\text{тр}}^{\text{ПолНКИ}}, T \leq T_{\text{тр}}, \Delta t \leq t_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Кроме того, необходимо дополнительно учитывать такой параметр, как время нахождения в зоне действия каждого потребителя ( $t^z \geq t_{\text{тр}}^z$ ). Так, слишком малое значение указанного параметра не позволит воспользоваться информацией от СМК ВКП, поэтому предлагается преобразовать систему к следующему виду:

$$N^{\text{ПолКИ}} \geq N_{\text{тр}}^{\text{ПолКИ}}, N^{\text{ПолНКИ}} \geq N_{\text{тр}}^{\text{ПолНКИ}}, T \leq T_{\text{тр}}, \Delta t \leq t_{\text{тр}}, t^z \geq t_{\text{тр}}^z. \quad (2)$$

Введем дискретную функцию  $\Psi$ , которая принимает значение «1» в том случае, если соответствующее условие, например  $N^{\text{ПолКИ}} \geq N_{\text{тр}}^{\text{ПолКИ}}$ , будет выполнено, и «0» – в противном случае:

$$\Psi = \begin{cases} 1, & \text{если } N^{\text{ПолКИ}} \geq N_{\text{тр}}^{\text{ПолКИ}}, \\ 0, & \text{если } N^{\text{ПолКИ}} < N_{\text{тр}}^{\text{ПолКИ}}. \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая тот факт, что имеется пять функций, каждая из которых может принимать два значения, мы получаем множество различных ситуаций. Указанные выше условия могут быть использованы в качестве критериев ИО. В предлагаемой модели применяется двухуровневая система шкал, где на первом уровне за счет использования системы критериев определяется качество ИО всех потребителей, а на втором уровне – отдельного средства или организации.

Перечень критериев ИО второго уровня представлен в табл. 1. Перечень критериев ИО первого уровня приведен в табл. 2.

Таблица 1

### Перечень критериев ИО второго уровня

Индикатор	Критерий
Зеленый	СМК ВКП заблаговременно получила необходимую координатную и некоординатную информацию (КиНКИ), а сам объект проходит через зону действия потребителя
Желтый	СМК ВКП получила необходимую КиНКИ, а сам объект проходит через зону действия потребителя но при этом были нарушены требования к одному из показателей (2) (например, не обеспечена требуемая точность)
Красный	Не выполнены условия для зеленого и желтого индикаторов

Таблица 2

## Перечень критериев ИО первого уровня

Индикатор	Критерий
Зеленый	Хотя бы два потребителя должны иметь зеленый индикатор, время на выполнение ими задачи не превысило требуемого значения, а с момента последнего измерения не прошло времени больше чем один период обращения ОК по орбите
Желтый	Хотя бы два потребителя должны иметь зеленый или желтый индикаторы, а с момента последнего измерения не прошло времени больше чем один период обращения ОК по орбите
Красный	Не выполнены условия для зеленого и желтого индикаторов

## СТРУКТУРА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Теперь рассмотрим особенности ИО при решении задач СМК ВКП. На рис. 1 представлен один из возможных вариантов последовательности мероприятий (сценариев) по привлечению ИнфСр ВКП в интересах ИО потребителей.

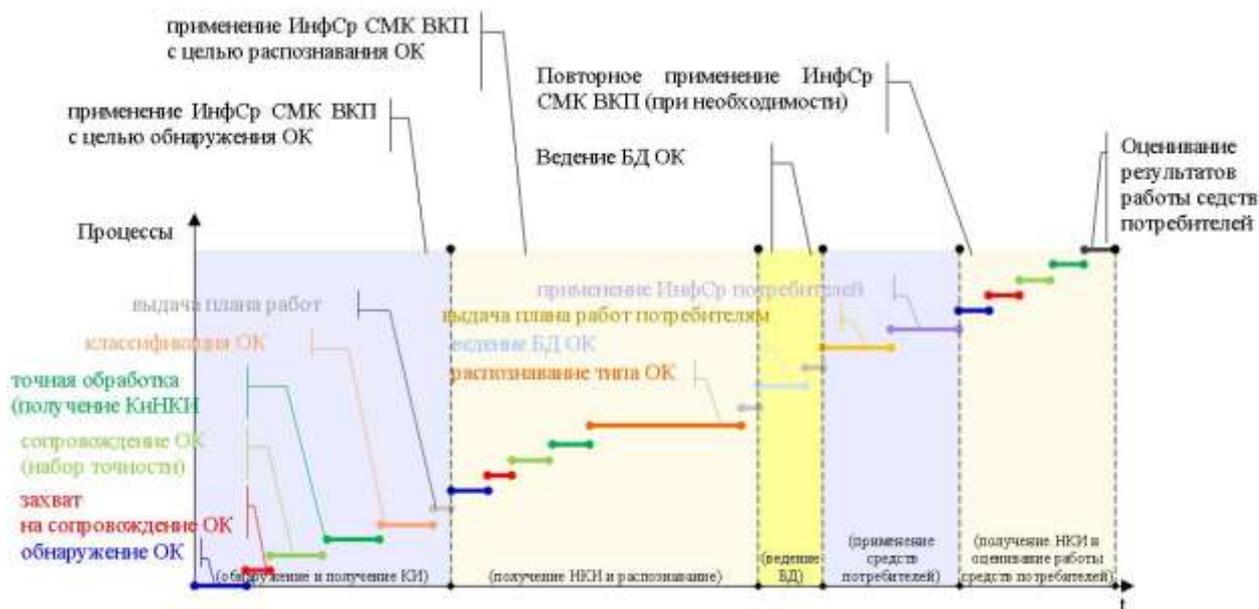


Рис. 1. Циклограмма функционирования СМК ВКП

Для упрощения моделирования будем полагать, что по принципу работы весь парк ИнфСр СМК ВКП можно условно разделить на три группы: радиолокационные станции (РЛС), оптико-электронные (ОЭК) и радиотехнические комплексы (РТК). Что касается этапности применения ИнфСр СМК ВКП, то здесь выделяют два этапа. На первом этапе, как правило, используются РЛС, работающие в интересах обнаружения объектов в ВКП. Эти средства обладают хорошими поисковыми возможностями, но имеют сравнительно небольшие возможности по получению некоординатной информации (НКИ) [1]. Такие средства задают секторными зонами действия, ограниченными по углу места и азимуту, с центром, имеющим координаты в геоцентрической системе координат (СК).

На втором этапе применяются ИнфСр, обладающие возможностью получения НКИ об объектах в ВКП, такие как ОЭК и РТК. Зачастую для применения указанных средств необходимо сформировать план, в котором будет указано, когда и в каком месте необходимо ожидать интересующий СМК объект. Указанные выше средства задают круговыми зонами действия, ограниченными по углу места, с центром, имеющим координаты в геоцентрической СК.

Для того чтобы симитировать работу потребителей информации, предлагается использовать круговые зоны действия, ограниченные по углу места, с центром, имеющим координаты в геоцентрической СК.

В свою очередь, ОК задаются либо с помощью вектора движения, либо с помощью элементов Кеплера.

В качестве исходных данных для моделирования выбираются параметры, приведенные в табл. 3. Перечень и описание выходных данных модели СМК представлены в табл. 4.

Таблица 3

### Перечень исходных данных для модели СМК ВКП

№ п/п	Параметр	Описание параметра
1	$\lambda_1, \phi_1, h_1$	Координаты точки стояния ИнфСр
2	$\alpha_{1\min}, \beta_{1\min}, R_{1\min}$	Минимальные значения угла места, азимута и дальности действия ИнфСр
3	$\alpha_{1\max}, \beta_{1\max}, R_{1\max}$	Максимальные значения угла места, азимута и дальности действия ИнфСр
4	$x, y, z$	Координаты ОК
5	$V_x, V_y, V_z$	Проекции скорости объекта
6	$t_{н.мод}$	Момент времени, с которого происходит моделирование процесса сбора информации по ОК
7	$\lambda_2, \phi_2, h_2$	Координаты точки стояния потребителя
8	$\alpha_{\min 2}, \beta_{\min 2}, R_{\min 2}$	Минимальные значения угла места, азимута и дальности действия потребителя
9	$\alpha_{\max 2}, \beta_{\max 2}, R_{\max 2}$	Максимальные значения угла места, азимута и дальности действия потребителя
10	$t^{\min\text{НКИ}}$	Минимальное значение времени получения НКИ
11	$t^{\min\text{КИ}}$	Минимальное значение времени получения КИ

Для решения задач, стоящих перед моделью СМК ВКП, предлагается следующая последовательность выполнения операций:

1. Подготовка и ввод исходных данных для проведения расчетов.
2. Определение координат ОК на требуемый промежуток времени.
3. Моделирование обнаружения и сопровождения ОК с помощью ИнфСр, реализованных на базе секторных РЛС.
4. Выполнение условия по формированию плана работ для ОЭК и РТК.
5. Формирование плана работ для ОЭК и РТК.
6. Проведение работ по получению НКИ с помощью ОЭК и РТК.
7. Выполнение условия по формированию необходимой информации для потребителей.
8. Формирование плана работ потребителей.
8. Проведение работ потребителями по информации от СМК ВКП.

9. Проверка выполнения критериев ИО второго уровня.
10. Проверка выполнения критериев ИО первого уровня.
11. Запись результатов в базу данных.
12. Завершение вычислений и вывод необходимой информации.

Таблица 4

**Перечень выходных данных для модели СМК ВКП**

№ п/п	Параметр	Описание параметра
1	$t^{\text{ВхЗ}}$	Время входа в зону действия
2	$t^{\text{ВыхЗ}}$	Время выхода из зоны действия
3	$t_{\text{обс}}$	Время обслуживания (суммарное время обнаружения и распознавания)
4	$T^{\text{ПолКИ}}$	Время, которое было затрачено на получение КИ
5	$T^{\text{ПолНКИ}}$	Время, которое было затрачено на получение НКИ
6	$N^{\text{ПолКИ}}$	Количество КИ
7	$N^{\text{ПолНКИ}}$	Количество НКИ;
8	$t^{\text{Z}}$	Время нахождения в зоне действия потребителя
9	$T$	Время выполнения задачи потребителем
10	$\xi^{\text{II}}$	Индикатор шкалы критериев ИО второго уровня
11	$\xi^{\text{I}}$	Индикатор шкалы критериев ИО первого уровня

Таким образом, структура модели СМК ВКП будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Блоки 1–3 предназначены для хранения параметров ИнфСр, ОК и потребителей информации от СМК ВКП.

В блоках 4 и 6 производится расчет зон действия моделируемых ИнфСр и потребителей информации от СМК ВКП. Особенности моделирования указанных комплексов представлены в подразделе «Особенности моделирования Инф СМК ВКП».

В блоке 5 выполняется расчет координат объекта контроля в зависимости от выбранного значения шага моделирования. Особенности моделирования движения ОК в ВКП представлены в соответствующем подразделе настоящей статьи.

В блоках 7 и 8 определяется факт попадания ОК в определенную зону контроля, при этом учитываются результаты решения задачи обнаружения объекта, которая рассмотрена в подразделе «Особенности моделирования информационных средств системы мониторинга и контроля воздушно-космического пространства», а также влияние положения других небесных объектов.

После выявления факта попадания ОК в соответствующую зону контроля в блоках 9 и 10 осуществляется расчет времени его нахождения в зоне.

Указанный выше параметр необходим в качестве исходных данных для блоков 11 и 12, в которых в ходе сравнения с пороговыми значениями определяется количество полученной КИ и НКИ.

После того как будут выполнены требования к количеству КИ и НКИ, представленные в системе (1), в блоке 13 производится расчет времени, потраченного на обнаружение и распознавание типа объекта.

Далее в блоке 14 осуществляется проверка выполнения условий, представленных системой (2), и определяется соответствующее значение для шкалы II уровня.

На основе измеренных значений времени обслуживания и значения шкалы II уровня определяется качество информационного обеспечения I уровня в блоке 15.

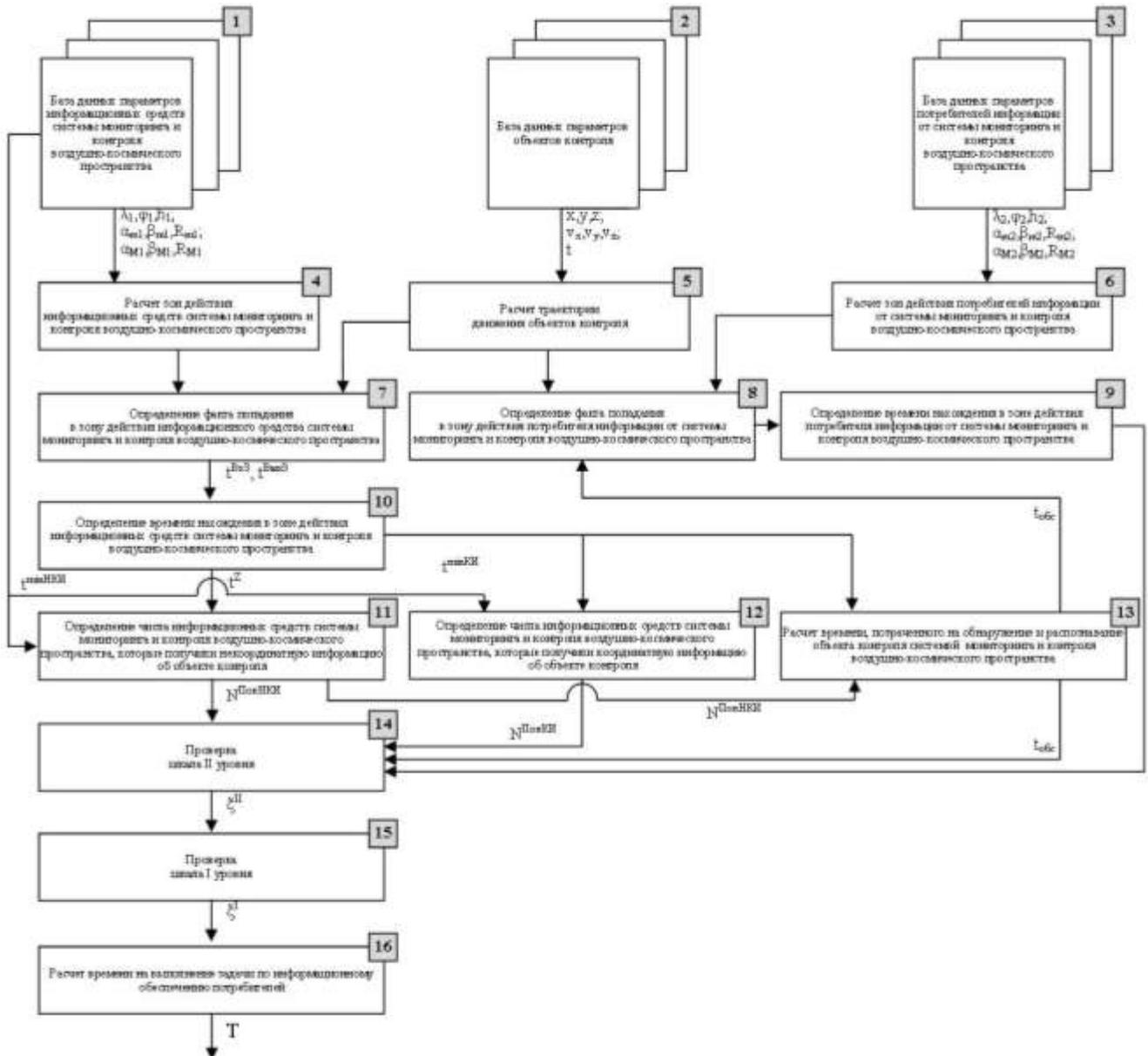


Рис. 2. Структура модели СКМ ВКП

В блоке 16 производится расчет времени, которое необходимо на выполнение задач потребителями информации от СКМ ВКП.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Исходными данными для моделирования процесса обнаружения и сопровождения ОК с помощью ИнфСр и определения параметров, представленных в табл. 2, будут координаты ОК в ИГСК и координаты самого ИнфСр в геоцентрической СК.

Задачу обнаружения и сопровождения ОК предлагается решать в несколько этапов, учитывая особенности функционирования ИнфСр, выбранных для моделирования. Так, напри-

мер, для ОЭК необходимо учитывать условия видимости, для РЛС – обнаружение в некоторой области (барьере), а для РТК – условие излучения объекта наблюдения.

Результатом решения задачи обнаружения и сопровождения объекта СМК будет сам факт обнаружения, который предлагается отображать визуально (для удобства оператора), а также параметры, приведенные в табл. 4 с 1 по 8 пункты соответственно. Указанные параметры будут являться исходными данными для проверки выполнения критериев ИО.

Задачу обнаружения и сопровождения ОК предлагается решать в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема выполнения задачи обнаружения и сопровождения ОК СМК ВКП

Первым этапом задачи обнаружения и сопровождения является решение геометрической задачи попадания ОК в зону действия ИнфСр. Для этого необходимо выполнить следующее:

– пересчитать координаты ОК из инерциальной геоцентрической системы координат (ИГСК) в ПЗ-90;

– пересчитать координаты из ПЗ-90 в местную прямоугольную СК;

– пересчитать координаты из местной прямоугольной СК в радиолокационную СК;

– проверить условия нахождения полученных значений в заданных пределах:

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}, R_{\min} \leq R \leq R_{\max}. \quad (4)$$

Следующим этапом является проверка выполнения специфических условий, таких как:

– обнаружение объекта (то есть последовательное обнаружение «отраженного сигнала» по правилу  $m$  из  $M$ );

– учет изменения значения угла места ОК относительно ИнфСр по времени;

– обнаружение объекта в определенной области (барьере);

– выполнение условий видимости.

При моделировании «отраженный сигнал» не имитируется, данное понятие используется умышленно, для того чтобы подчеркнуть особенности работы ИнфСр (активная радиолокация с пассивным ответом) СМК ВКП.

Для моделирования процесса обнаружения «отраженного сигнала» от ОК необходимо создать блок, который бы в соответствии с определенным принципом имитировал процесс обнаружения. Для этого в модели, рассмотренной в работе [2], предлагается использовать формулу для расчета вероятности обнаружения сигнала

$$D = F^{1/(1+q)}. \quad (5)$$

Определение вероятности обнаружения будем производить при фиксированном значении вероятности ложной тревоги (на уровне  $10^{-4}$ ), а значение отношения сигнал/шум можно найти из основного уравнения радиолокации (6) через минимальную мощность принимаемого сигнала  $q = P_{\min}/N_0$ :

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_u \cdot G_A \cdot \sigma \cdot S_A}{(4\pi)^2 \cdot P_{\min}}} = \sqrt[4]{\frac{P_u \cdot G_A \cdot \sigma \cdot S_A}{(4\pi)^2 \cdot q \cdot N_0}}. \quad (6)$$

где  $P_u$  – мощность, излучаемая антенной системой, Вт;

$G_A$  – коэффициент направленного действия;

$\sigma$  – эффективная поверхность рассеяния,  $m^2$ ;

- $S_A$  – площадь антенны, м<sup>2</sup>;  
 $N_0$  – мощность внешнего шума, Вт;  
 $P_{\min}$  – минимальная мощность принимаемого сигнала, Вт.

В качестве исходных данных для вычислений в соответствии с (6) целесообразно использовать характеристики одной из известных РЛС. Теперь, зная в каждый момент времени для каждого значения дальности от ИнфСр до ОК вероятность обнаружения сигнала, можно использовать генератор случайных чисел, который в случае положительного исхода генерирует значение «1», что означает «отраженный сигнал» есть, и «0» – в противном случае. Если «отраженный сигнал» последовательно будет обнаружен более чем три раза, то в этом случае принимается решение об обнаружении ОК.

Следующей особенностью моделирования ИнфСр первой группы является то, что значение угла места  $\beta$  должно последовательно расти в процессе обнаружения объекта. Если у ОК такой тенденции не наблюдается, то процесс обнаружения не начинается.

Если моделировать процесс обнаружения объекта с помощью РЛС, то необходимым условием является обнаружение объекта в некоторой области (барьере). Для этого после решения геометрической задачи дополнительно проверяются условия нахождения объекта в барьерной зоне.

Если речь идет об оптических средствах, то при моделировании их функционирования необходимо учитывать условия видимости, т. е. выполнение соотношения углов между наблюдателем, Землей, Солнцем и ОК, Землей и Солнцем. Для проверки данного условия нам понадобятся в качестве исходных данных координаты ОК, ИнфСр и Солнца. Координаты ОК переводятся в ИГСК, и производится расчет вышеуказанных углов. Далее проверяется выполнение условий видимости.

Кроме того, необходимо дополнительно учитывать, что ОК не находился в тени Земли [3], для этого можно воспользоваться следующей формулой [4]:

$$d = \sqrt{\frac{(x_{\text{ОК}}y_c - y_{\text{ОК}}x_c)^2 + (y_{\text{ОК}}z_c - z_{\text{ОК}}y_c)^2 + (z_{\text{ОК}}x_c - x_{\text{ОК}}z_c)^2}{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}} \quad (7)$$

и учесть условие

$$d > R_3, \quad (8)$$

- где  $x_{\text{ОК}}, y_{\text{ОК}}, z_{\text{ОК}}$  – текущие координаты объекта контроля в ИГСК, км;  
 $x_c, y_c, z_c$  – текущие координаты Солнца в ИГСК, км;  
 $d$  – расстояние от объекта контроля до линии «Солнце – Земля», км;  
 $R_3$  – радиус Земли, км.

Для определения взаимного расположения Солнца и Луны относительно Земли в интересах определения условий видимости для моделирования функционирования ОЭК предлагается воспользоваться системой

$$\begin{cases} x_k = r_k \cdot \xi_k \\ y_k = r_k \cdot \eta_k \\ z_k = r_k \cdot \zeta_k \end{cases} \quad (9)$$

- где  $x_k, y_k, z_k$  – координаты моделируемого объекта, км;  
 $\xi_k, \eta_k, \zeta_k$  – направляющие косинусы;

- $r_k$  – радиус-вектор от центра Земли до моделируемого объекта, км;  
 $k$  – индекс, изменяемый в зависимости от типа моделируемого объекта (с – Солнце, л – Луна).

Для расчета направляющих косинусов можно воспользоваться формулами, представленными в работах [5–7].

Учет влияния положения Луны относительно ИнфСр и ОК на процесс проведения измерений ОЭК осуществляется таким же образом, как и для Солнца, но с уточненными значениями  $\varphi_{\text{ОКmin}}^l$ ,  $\varphi_{\text{ОКmax}}^l$ ,  $\varphi_{\text{ИнфСрmin}}^l$ ,  $\varphi_{\text{ИнфСрmax}}^l$ . Еще одним отличием является то, что в данном случае не учитывается условие нахождения ОК в тени Земли.

При моделировании функционирования РТК необходимо принимать во внимание способность ОК излучать радиосигнал. Например, в предлагаемой модели ОК начинает излучать, если расстояние от него до некоторого населенного пункта менее 2000 км. Таким образом, если ОК начал излучать, он находится в зоне действия РТК, решена геометрическая задача и выполнены условия обнаружения сигнала, то он считается обнаруженным.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Расчет положения объекта на заданный момент времени предлагается проводить на основе численного интегрирования дифференциальных уравнений движения центра масс методом Рунге – Кутта 4-го порядка. В правых частях уравнений будут учитываться ускорения, определяемые геоцентрической константой гравитационного поля Земли с учетом атмосферы  $GM$  и зональным коэффициентом второй степени  $J_2^0$ , характеризующим полярное сжатие Земли [5–7].

Дифференциальные уравнения движения интегрируются в прямоугольной ИГСК  $Ox_0y_0z_0$ , начало которой  $O$  совпадает с началом координат системы ПЗ-90, ось  $Ox_0$  направлена в точку весеннего равноденствия, ось  $Oz_0$  направлена на Северный полюс мира и совпадает с осью  $OZ$  системы ПЗ-90, ось  $Oy_0$  дополняет систему до правой.

Начальными условиями для интегрирования системы уравнений являются координаты центра масс объекта и составляющие его вектора скорости в ИГСК. Для взаимного пересчета координат из ИГСК в связанной с Землей системе координат ПЗ-90 и наоборот предлагается воспользоваться формулами, представленными в [5].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Для верификации модели были использованы данные для контрольного просчета, приведенные в интерфейсном контрольном документе ГЛОНАСС [5].

Результаты моделирования (табл. 5) с помощью предлагаемой модели СМК ВКП показывают, что максимальное значение ошибки по координате составляет не более 3 см, а по скорости 2 мм/с, что позволяет сделать вывод об адекватности модели.

Таблица 5

**Разница между эталонными и расчетными эфемеридами объекта контроля в ПЗ-90.11**

$\Delta x = 0,025458$ м	$\Delta y = 0,002241216$ м	$\Delta z = 0,00479355$ м
$\Delta V_x = -6,66414 \cdot 10^{-5}$ м/с	$\Delta V_y = 7,1969 \cdot 10^{-4}$ м/с	$\Delta V_z = -1,51096 \cdot 10^{-3}$ м/с

После контрольного просчета была проведена экспериментальная апробация СМК ВКП. В качестве исходных данных были взяты элементы орбиты ОК, приведенные в табл. 6, которые были пересчитаны в  $x, y, z, V_x, V_y, V_z$ . Время начала моделирования было выбрано 7 ч 15 мин 7 июня 2012 г. Интервал моделирования соответствовал 4 периодам обращения ОК вокруг Земли с шагом, равным 4 с. Парк ИнфСр представлен 7 РЛС, предназначенными для получения КИ и 2 РЛС, 2 ОЭК и 1 РТК, предназначенными для получения НКИ. Что касается потребителей, то для моделирования были выбраны 5 средств, распределенных таким образом, чтобы зоны их действия перекрывали территорию РФ вдоль одной широты.

Таблица 6

## Элементы орбиты ОК

Эксцентриситет, $e$	Наклонение, в градусах, $i$	Частота об- ращения, виток/день, $N$	Аргумент перигея, в градусах, $w$	Долгота восхо- дящего узла, в градусах, $\Omega$	Средняя аномалия, в градусах, $M$
0,0006	67	14,52	121,94	158	260

Условием для начала формирования плана работ для средств второй подгруппы являлось превышение количества проведенных измерений по получению КИ  $N_{пор}^{КИ}$ , равного 1. В свою очередь, условием для начала формирования плана работ для потребителей являлось превышение количества проведенных измерений по получению НКИ  $N_{пор}^{НКИ}$ , равного 3. Планы работ считались сформированными, если после выполнения соответствующих условий проходило не менее 1500 с (время обработки и подготовки плана).

Результаты, полученные в ходе моделирования, представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

## Результаты применения модели СМК ВКП

$T^{обр}$ , с	$N^{КИ}$	$N^{НКИ}$	$T^{КИ}$ , с	$T^{НКИ}$ , с	$T$ , с	$\Delta t$ , с
5950,42	2	6	356	6668	12508	5840

В табл. 7  $\Delta t$  есть разница между началом формирования плана и выполнением работы одним из потребителей.

Таблица 8

## Распределение работ между ИнфСр

Вид подгруппы	ИнфСр первой подгруппы							ИнфСр второй подгруппы				
	РЛС							РЛС		ОЭК		РТК
Тип средства	1	2	3	4	5	6	7	1	2	1	2	1
Кол-во	–	1	–	1	–	–	–	2	2	1	–	1

В ходе моделирования ни один из критериев ИО выполнен не был, и шкалы приобрели красный цвет. Это связано с тем, что потребитель выполнил работы за время, которое превышало требуемое значение (2 периода обращения ОК вокруг Земли, что указано в табл. 7). Визуализация работы модели представлена на рис. 4.

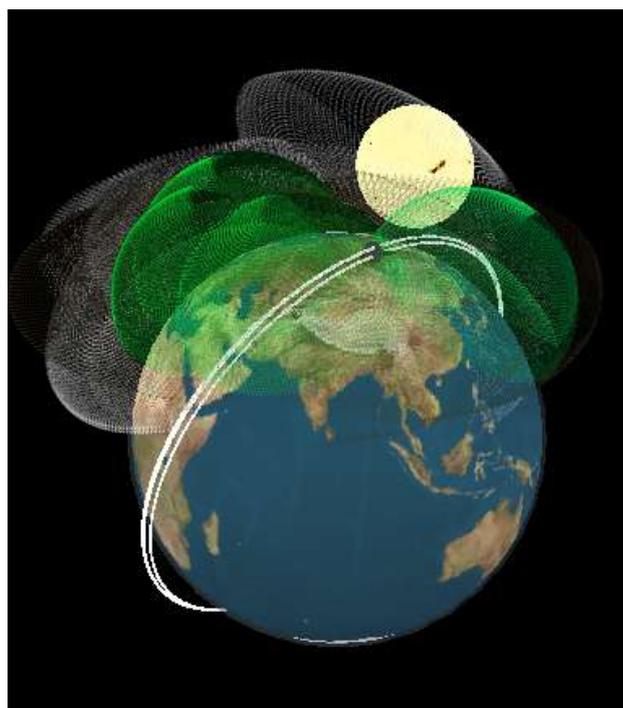


Рис. 4. Визуализация работы модели функционирования СМК ВКП

При изменении требуемого значения времени выполнения задач потребителями (3 периода обращения ОК вокруг Земли) и общего интервала моделирования (4 периода обращения ОК вокруг Земли) были получены результаты, приведенные в табл. 9.

Таблица 9

#### Распределение работ между потребителями

Вид группы	Потребители					Вероятность выполнения задачи
	1	2	3	4	5	
Кол-во	1	1	–	–	0	0,66
$T$ , с	13192	12508	–	–	–	
$\Delta t$ , с	6524	5840	–	–	–	

Из 5 потребителей 3 были способны выполнить задачу. При моделировании ИнфСр потребителей вероятность выполнения задачи была задана 0,9, поэтому в табл. 9 для 5-го ИнфСр стоит значение 0, то есть план работ был сформирован, ОК находился в зоне действия, но потребитель не смог выполнить поставленную задачу, в связи с этим вероятность выполнения задачи потребителями в целом составила 0,66.

При изменении  $i$  на 47 и  $N$  на 14,82 из табл. 6 были получены результаты, приведенные в табл. 10.

Таблица 10

#### Результаты применения модели СМК ВКП

$T^{обp}$ , с	$N^{ки}$	$N^{нки}$	$T^{ки}$ , с	$T^{нки}$ , с	$T$ , с	$\Delta t$ , с
5829,96	3	3	6376	18316	–	–

Как и в первом случае, ни один из критериев ИО выполнен не был и шкалы приобрели красный цвет, что связано с особенностями функционирования и взаимным расположением

ИнфСр и ОК, о чем свидетельствует большое значение времени, потраченного на получение НКИ, равное 18316 с при требуемом времени выполнения задачи потребителями 17489,9 с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье отражены результаты исследования модели функционирования СМК ВКП с целью определения пространственных и временных характеристик, достигаемых за счет использования сети географически распределенных ИнфСр.

В ходе исследования были последовательно решены следующие задачи: рассмотрены особенности оценивания эффективности работы СМК ВКП на основе применения шкал ИО; разработана структура модели СМК ВКП; рассмотрены особенности моделирования ИнфСр СМК ВКП; рассмотрены особенности моделирования движения ОК в ВКП; разработана модель СМК ВКП; проведена экспериментальная апробация СМК ВКП.

Разработанная модель позволит решать широкий спектр задач: оценивать эффективность СМК ВКП путем определения пространственно-временных и вероятностных характеристик ИнфСр как самой системы, так и потребителей; определять пространственное размещение, состав и структуру СМК ВКП при заданных показателях эффективности; оценивать пропускную способность ИнфСр; оценивать качество отождествления измерений от пространственно разнесенных ИнфСр и комплексирования информации; обосновывать технические требования к ИнфСр в целях обеспечения заданного уровня эффективности применения.

Анализ полученных данных показал, что на возможности СМК ВКП большое влияние оказывают параметры движения ОК, количество, возможности и географическое расположение как ИнфСр, так и потребителей информации. Ввиду того, что ИнфСр располагались только на территории РФ, СМК ВКП не всегда обеспечивала требуемый результат. В связи с этим предлагается рассмотреть вариант использования ИнфСр СМК ВКП морского и космического базирования.

## Список используемых источников

1. Селекция и распознавание на основе локационной информации / А.Л. Горелик, Ю.Л. Барабаш, О.В. Кривошеев и др.; под ред. А.Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990. – С. 45–63.
2. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1964. – 732 с.
3. Наблюдение и измерение характеристик космических объектов / В.Н. Алдохина, А.А. Бабишкин, В.О. Рогов и др.; под общ. ред. В.Н. Алдохиной. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 174 с.
4. Бронштейн И.Н. Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, Гл. ред. физико-мат. лит., 1986. – 544 с.
5. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1.0.: интерфейсный контрольный документ. – М.: АО «Российские космические системы», 2016. – 133 с.
6. Дубошин Г.Н. Небесная механика: Основные задачи и методы. – М.: Наука, 1975. – 800 с.
7. Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии. – М.: Наука, 1979. – 448 с.

В.Н. Калинин,  
доктор техн. наук, профессор

## О ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЯМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

В статье рассматривается задача космической кибернетики, связанная с оптимальным управлением операциями информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли в условиях целенаправленных возмущений. Космический аппарат при этом интерпретируется как информационный активный подвижный объект, который совершает неуправляемый полет по заданной орбите вокруг Земли. Динамическая модель информационного взаимодействия представлена в виде линейного интегрального оператора Фредгольма. Критерием оптимальности управления служит требование максимума линейного терминального функционала, характеризующего относительную ценность получаемой информации. Возмущающая среда носит антагонистический характер, и ее цель – минимизация указанного функционала в условиях ограниченности соответствующего ресурса допустимых возмущений, что приводит к рассмотрению соответствующей бесконечной антагонистической игры. Исследуется важный в прикладном отношении вариант рассмотренной общей теоретико-игровой задачи, для которого решение получено путем анализа эквивалентной дифференциальной игры с последующим использованием концепции погружения Лагранжа и принципа максимума Понтрягина.

Ключевые слова: космическая кибернетика, космический аппарат, информационный активный подвижный объект, операция информационного взаимодействия, бесконечная антагонистическая игра, точка равновесия, гильбертово пространство, компактность, принцип максимума Понтрягина.

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] изложены концептуальные и математические основы теории управления космическим аппаратом (КА), базирующиеся на концепции *активного подвижного объекта* (АПО) [2], под которым понимается сложная подвижная система, перемещающаяся в пространстве, предназначенная для информационного, энергетического либо вещественного взаимодействия с окружающей физической средой или с другими подобными системами и снабженная соответствующей бортовой аппаратурой и необходимым ресурсом. В соответствии с этими взглядами КА наблюдения за поверхностью Земли, совершающий свободный полет по околоземной орбите, может интерпретироваться как *информационный активный подвижный объект*, предназначенный для осуществления информационного взаимодействия с поверхностью Земли, под которым понимается сбор информации о состоянии объектов на земной поверхности с помощью бортовых оптических и радиоэлектронных средств. При этом целостный акт однородной деятельности по сбору указанной информации будем называть *операцией информационного взаимодействия*. В работах [4, 5] на основе соответствующих математических моделей рассмотрен ряд задач оптимального программного управления подобными операциями с учетом ограниченности имеющегося на борту КА ресурса, расходуемого в процессе информационного взаимодействия. При этом рассматривались континуальные и дискретные множества информационного взаимодействия на поверхности Земли.

Общей чертой всех указанных задач оптимального управления являлся их *детерминированный* характер, т. е. предполагалось, что возмущающие воздействия на информационные процессы отсутствуют. Однако в реальных условиях информационного взаимодействия это условие не выполняется – физическим носителем информации в рассматриваемых задачах являются электромагнитные волны, распространение которых в околоземном пространстве сопровождается сложными и априори неопределенными эффектами затухания, дифракции и преломления, что позволяет говорить о случайной природе возмущений (соответствующие

задачи рассмотрены в работе [6]). Наряду с этим следует ожидать, что реальные процессы информационного взаимодействия могут сопровождаться также более сложными возмущениями, носящими *целенаправленный* (как правило, *антагонистический*) характер, будучи ориентированными на воспрепятствование получению требуемой информации, в этом случае обычно говорят о *целенаправленной возмущающей среде*.

В настоящей статье рассматривается задача оптимального управления одномерным процессом информационного взаимодействия с учетом возмущений в предположении, что они носят *целенаправленный антагонистический характер* и проявляются в подавлении полезного сигнала и в соответствующем снижении количества принимаемой информации.

Для постановки указанной задачи уточним исходные допущения, лежащие в основе используемых моделей и общей характеристики рассматриваемых процессов информационного взаимодействия. А именно, примем следующие предположения:

1. КА совершает неуправляемый орбитальный полет в центральном гравитационном поле Земли при отсутствии механических возмущений.

2. Информационное взаимодействие с поверхностью Земли осуществляется с помощью одного прибора, ось диаграммы направленности которого совпадает с местной вертикалью КА.

3. Множество информационного взаимодействия представляет собой отрезок трассы полета КА на поверхности Земли.

4. На борту КА имеется один непополняемый ресурс, расходуемый в процессе информационного взаимодействия.

5. Запоздыванием информационных сигналов вследствие конечной скорости их распространения можно пренебречь.

6. При задании возмущающих воздействий будем предполагать, что их влияние на рассматриваемые информационные процессы характеризуется целенаправленным подавлением сигналов в среде распространения информации и носит антагонистический характер.

Для дальнейшего рассмотрения соответствующих задач управления уточним необходимые математические элементы их постановки.

## ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ

**Детерминированная математическая модель операции информационного взаимодействия КА с поверхностью Земли.** Будем рассматривать исследуемые процессы информационного взаимодействия на некотором заданном интервале времени

$$\sigma = [t_0, t_f] \subset [0, \infty), t_f > t_0. \quad (1)$$

В формуле (1)  $t_0$  – начальный, а  $t_f$  – конечный моменты времени.

При указанных выше допущениях центр масс КА в соответствии с законами Кеплера будет совершать движение по эллиптической орбите, один из фокусов которой совпадает с центром Земли. Будем считать это движение заданным и представленным кинематической моделью вида

$$\vec{r} = \vec{r}(t), t \in \sigma, \quad (2)$$

в которой  $\vec{r}$  – радиус-вектор, соединяющий центр Земли с центром масс КА, а  $\vec{r}(\cdot)$  – соответствующее заданное отображение  $\sigma \rightarrow R^3$ . Будем рассматривать этот радиус-вектор в относительной экваториальной геоцентрической декартовой системе координат, вращающейся вместе с Землей. При этом центр масс КА на временном отрезке (1) перемещается в пространстве из некоторого начального положения  $A_0$  в конечное  $A_f$ . На поверхности Зем-

ли движению КА соответствует трасса полета КА (геометрическое место подспутниковых точек пересечения радиуса-вектора центра масс КА с поверхностью Земли) и ее отрезок  $A'_0A'_f$ .

Уточним *множество информационного взаимодействия*, а именно, ограничимся предположением, что оно совпадает с указанным отрезком  $A'_0A'_f$  трассы полета КА. В этом случае целесообразно ввести естественную параметризацию этого отрезка, сопоставив каждой его точке длину дуги трассы, отсчитываемую до нее от точки пересечения трассы с плоскостью экватора. Обозначим эту длину через  $\rho$  и будем рассматривать ее как координату указанной точки. При этом участку трассы  $A'_0A'_f$  взаимно однозначно сопоставляется отрезок вещественной оси  $\Delta = [a_0, a_f] \subset R^1$ , где  $a_0$  и  $a_f$  – значения параметра  $\rho$ , отвечающие начальной и конечной точкам рассматриваемого участка трассы. Так как орбитальное движение КА предполагается заданным, то отрезок  $\Delta = [a_0, a_f] \subset R^1$  можно рассматривать как образ временного интервала (1) в соответствующем заданном биективном отображении

$$s = s(t), \quad t \in \sigma, \quad s \in \Delta. \quad (3)$$

В соответствии с математической моделью, предложенной в работах [2, 3], текущее *состояние информационного взаимодействия* для каждого момента времени будем характеризовать неотрицательной вещественной функцией  $\gamma(\cdot, t) : \Delta \rightarrow R^1$ , представляющей собой распределение полученной информации вдоль рассматриваемого участка трассы полета к моменту времени  $t \in \sigma$ . Как показано в работах [2, 3], при отсутствии возмущений соответствующее принятым допущениям *уравнение операции информационного взаимодействия* может быть представлено линейным интегральным оператором Фредгольма

$$\gamma(\rho, t) = \int_{t_0}^t M(\rho, \tau) u(\tau) d\tau, \quad (4)$$

в котором  $u = u(t)$  – интенсивность информационного взаимодействия, рассматриваемая в дальнейшем как управляющее воздействие, при этом  $\rho \in \Delta = [a_0, a_f]$ ,  $t \in \sigma = [t_0, t_f]$ ,  $M(\rho, \tau)$  – ядро оператора. Конкретный вид этого ядра в общем случае определяется движением центра масс КА – векторной функцией (2) и характеристиками вращения Земли, а также диаграммой направленности информационного взаимодействия. В дальнейшем будем полагать, что ядро оператора  $M(\rho, \tau)$  представляет собой *неотрицательную ограниченную и кусочно-непрерывную вещественную функцию*, заданную на  $\Delta \times \sigma \subset R^2$ .

**Класс допустимых управляющих воздействий.** Уточняя область определения рассматриваемого оператора (4), будем предполагать, что управляющее воздействие принадлежит *классу допустимых управляющих воздействий*, который зададим в следующем виде:

$$U_\sigma = \left\{ u_\sigma = u(\cdot) : \sigma \rightarrow R^1 \mid (\forall \tau \in \sigma)(0 \leq u \leq 1); S_u \right\}, \quad (5)$$

где  $S_u$  – теоретико-функциональные условия, накладываемые на управляющее воздействие и в данном случае трактуемые как измеримость по Лебегу.

**Математическая модель операции информационного взаимодействия КА с поверхностью Земли с учетом возмущений.** Перейдем теперь к варианту рассмотренной математической модели, учитывающему наличие возмущений в процессе информационного

взаимодействия. С этой целью (по аналогии с [6]) введем в состав описанной выше детерминированной модели характеризующий возмущения мультипликативный параметр

$$v = v(\rho), \quad (6)$$

который будем называть *коэффициентом прозрачности* околоземной геофизической среды, и будем рассматривать его как возмущающий фактор. В этом случае соответствующее уравнение информационного состояния примет следующий вид:

$$\gamma_c(\rho, t) = v(\rho)\gamma(\rho, t) = v(\rho) \int_{t_0}^t M(\rho, \tau)u(\tau)d\tau. \quad (7)$$

**Класс допустимых возмущающих воздействий.** Уточним класс допустимых возмущающих воздействий, а именно, зададим его в следующем виде:

$$V_{\Delta} = \left\{ v_{\Delta} = v(\cdot) : \Delta \rightarrow R^1 \mid (\forall \rho \in \Delta) (0 \leq v \leq 1); S_v \right\}, \quad (8)$$

где  $S_v$  – теоретико-функциональные условия, накладываемые на функции  $v(\cdot)$ . В качестве таких условий будем рассматривать требование измеримости по Лебегу.

**Показатель качества процесса управления информационным взаимодействием.** Показатель качества рассматриваемых процессов управления информационным взаимодействием зададим в виде *линейного терминального функционала* следующего вида:

$$J_0(u_{\sigma}, v_{\Delta}) = \int_{a_0}^{a_f} \xi(\rho)\gamma_c(\rho, t_f)d\rho, \quad (9)$$

где  $\xi(\rho)$  – заданная *ограниченная неотрицательная кусочно-непрерывная вещественная функция*, принимающая значения из отрезка  $[0, 1]$ , заданная на множестве  $\Delta = [a_0, a_f]$  и отражающая относительную ценность информации, полученной от подспутниковой точки с координатой  $\rho$ .

**Математическая модель ресурсных ограничений для управляющей стороны.** Будем предполагать, что на борту космического аппарата имеется один расходимый ресурс (запас носителя информации, энергии или т. п.), скорость расходования которого линейно зависит от величины управляющего воздействия, а имеющийся объем задан. Эти условия математически представим в виде интегрального равенства следующего вида:

$$\int_{t_0}^{t_f} u(\tau)d\tau = A, \quad (10)$$

в котором  $A$  – заданная положительная величина, не превышающая величины  $T = t_f - t_0$ .

**Математическая модель ресурсных ограничений для возмущающей среды.** Примем во внимание, что возможности среды по реализации соответствующего возмущающего воздействия  $v(\rho)$  также заданы. А именно, будем предполагать, что допустимые возмущающие воздействия удовлетворяют интегральному условию

$$\int_{a_0}^{a_f} v(s)ds = B, \quad (11)$$

в котором  $B$  – заданная положительная величина, не превышающая величины  $L = a_f - a_0$ .

Теперь все готово для постановки рассматриваемой проблемы. Перейдем к соответствующим формулировкам.

## ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ

**Общая математическая постановка задачи.** При рассмотрении задач управления информационным взаимодействием в детерминированных условиях требуется найти такое допустимое управляющее воздействие, которое доставляет заданному показателю качества *максимальное* из всех возможных значений. Если такое управляющее воздействие существует, то оно называется *оптимальным управлением*. Примеры решения соответствующих задач приведены в работах [2, 4, 5].

При наличии возмущений подобная постановка задачи выбора управляющего воздействия теряет смысл, поскольку терминальное состояние  $\gamma_c(\cdot, t_f)$  и значение показателя качества процесса зависят от двух аргументов  $\langle u_\sigma, v_\Delta \rangle$ , второй из которых лицу, принимающему решение, принципиально неизвестен. Оптимальное управление в каждом конкретном случае, возможно, существует, но не может быть найдено, так как соответствующая реализация возмущений принципиально неизвестна.

Однако при этом, как уже указывалось выше, предполагается, что известна цель возмущающей среды, которая носит *антагонистический* характер, т. е. в данном случае заключается в *минимизации* целевого функционала (9). Это обстоятельство дает основание представить рассматриваемую задачу оптимального управления как *бесконечную антагонистическую игру* [7] и воспользоваться для ее решения соответствующей теоретико-игровой методологией. С этой целью приведем рассматриваемую задачу к симметричной форме, а именно, произведем замену текущего времени на взаимно-однозначно связанную с ним координату подспутниковой точки трассы полета в соответствии с соотношением (3). Входящая в (3) функция  $S(t)$ , определенная на интервале времени  $\sigma = [t_0, t_f]$ , обладает важным свойством: в соответствии с введенной выше параметризацией трассы она определяет положение подспутниковой точки в момент времени  $\tau \in \sigma$  и является строго монотонно возрастающей аналитической (бесконечно дифференцируемой) функцией от  $\tau$ , т. е. представляет собой биективное отображение  $\sigma = [t_0, t_f] \rightarrow \Delta = [a_0, a_f]$ , поэтому для нее существует единственная и бесконечно дифференцируемая обратная функция  $\tau = \tau(s)$ ,  $\tau(\cdot) : \Delta = [a_0, a_f] \rightarrow \sigma = [t_0, t_f]$ . Обе указанные функции однозначно определяются заданием элементов орбиты космического аппарата и характеристиками вращения Земли. В дальнейшем будем считать их, как и ядро оператора (4), заданными и удовлетворяющими указанным условиям.

Отсюда следует, что уравнение операции информационного взаимодействия (7) можно представить в следующем виде:

$$\gamma_{1c}(\rho, s) = v(\rho) \int_{a_0}^s M_1(\rho, s) \tilde{u}(s) ds, \quad (12)$$

где

$$M_1(\rho, s) = M(\rho, \tau(s)) w^{-1}(s), \quad \tilde{u}(s) = u(\tau(s)), \quad (13)$$

а  $w(s)$  – скорость движения по трассе подспутниковой точки с координатой  $s$ , равная

$$w(s) = \dot{s}(\tau(s)) = \left. \frac{ds}{d\tau} \right|_{\tau=\tau(s)} \sqrt{b^2 - 4ac}. \quad (14)$$

Очевидно, что  $w(s) > 0$  всюду на  $\Delta$ . Новое ядро интегрального оператора (12)

$M_1(\rho, s)$  определено на квадрате  $\Delta^2$ , является на нем *неотрицательным, ограниченным и кусочно-непрерывным*. Указанная замена переменной делает запись уравнения информационного состояния более наглядной. При этом будем предполагать, что соответствующий класс допустимых управляющих воздействий согласно (5) с учетом введенных выше преобразований задан в виде

$$U_{\Delta} = \left\{ \tilde{u}_{\Delta} = \tilde{u}(\cdot) : \Delta \rightarrow R^1 \mid (\forall s \in \Delta)(0 \leq \tilde{u}(s) \leq 1); S_{\tilde{u}} \right\}, \partial, \quad (15)$$

где  $S_{\tilde{u}}$  – условие измеримости по Лебегу, а ресурсное ограничение (10) приобретает вид

$$\int_{a_0}^{a_f} \tilde{u}(s)w^{-1}(s)ds = A. \quad (16)$$

С учетом ограничений в виде равенств (16) и (11) сузим соответствующие классы допустимых управлений и возмущений, представив их в следующем виде:

$$U_{\Delta 1}(A) = \left\{ \tilde{u}_{\Delta} = \tilde{u}(\cdot) : \Delta \rightarrow R^1 \mid (\forall s \in \Delta)(0 \leq \tilde{u}(s) \leq 1) \wedge \int_{a_0}^{a_f} \tilde{u}(s)w^{-1}(s)ds = A; S_{\tilde{u}} \right\}, \quad (17)$$

$$V_{\Delta 1}(B) = \left\{ v_{\Delta} = v(\cdot) : \Delta \rightarrow R^1 \mid (\forall \rho \in \Delta)(0 \leq v \leq 1) \wedge \int_{a_0}^{a_f} v(s)ds = B; S_v \right\}, \quad (18)$$

В последующем будем рассматривать функциональные множества (17) и (18) как множества элементов соответствующего гильбертова пространства  $L^2(\Delta)$  всех вещественных функций, определенных и суммируемых с квадратом на отрезке  $\Delta$ .

Целевой функционал (9) с учетом введенных преобразований приобретает следующий вид:

$$J_1(\tilde{u}_{\Delta}, v_{\Delta}) = [\xi(\cdot), \gamma_{1c}(\cdot, a_f)] = \int_{a_0}^{a_f} \xi(\rho)\gamma_{1c}(\rho, a_f)d\rho = \int_{a_0}^{a_f} \int_{a_0}^{a_f} v(\rho)\xi(\rho)M_1(\rho, s)\tilde{u}(s)dsd\rho, \quad (19)$$

где  $[\cdot, \cdot]$  – символ скалярного произведения функций в  $L^2(\Delta)$ . С учетом введенных обозначений рассматриваемую задачу можно представить, как *бесконечную антагонистическую игру в нормальной форме* [7, 8] следующего вида:

$$\Gamma = \left\langle U_{\Delta 1}(A), V_{\Delta 1}(B), J_1(\tilde{u}_{\Delta}, v_{\Delta}) \right\rangle. \quad (20)$$

Для нахождения в поставленной задаче разумного решения целесообразно воспользоваться *принципом гарантированного результата* А. Вальда, который заключается в нахождении наилучшего результата в предположении, что возмущения будут носить наиболее неблагоприятный характер (принцип крайнего пессимизма), т. е. в определении *максимина*

$$J_n = \max_{\tilde{u}_\Delta \in U_{\Delta 1}(A)} \left[ \min_{v_\Delta \in V_{\Delta 1}(B)} J_1(\tilde{u}_\Delta, v_\Delta) \right], \quad (21)$$

называемого нижней ценой игры, и (исходя из предположения, что источник возмущений также руководствуется аналогичным принципом) *минимакса*

$$J_g = \min_{v_\Delta \in V_{\Delta 1}(B)} \left[ \max_{\tilde{u}_\Delta \in U_{\Delta 1}(A)} J_1(\tilde{u}_\Delta, v_\Delta) \right], \quad (22)$$

называемого верхней ценой игры. В теории игр принято считать, что оптимальное управление в подобной задаче существует тогда и только тогда, когда указанные максимум и минимум достигаются и, более того, совпадают:

$$J_n = \max_{\tilde{u}_\Delta \in U_{\Delta 1}(A)} \left[ \min_{v_\Delta \in V_{\Delta 1}(B)} J_1(\tilde{u}_\Delta, v_\Delta) \right] = \min_{v_\Delta \in V_{\Delta 1}(B)} \left[ \max_{\tilde{u}_\Delta \in U_{\Delta 1}(A)} J_1(\tilde{u}_\Delta, v_\Delta) \right] = J_g. \quad (23)$$

Их общее значение называется ценой игры, а соответствующая ситуация – ситуацией равновесия. При этом ситуация равновесия характеризуется парой  $\langle \tilde{u}_\Delta^*, v_\Delta^* \rangle$ , которая называется

*оптимальной стратегией в целом* и определяет искомое *оптимальное управление*  $\tilde{u}_\Delta^*$ .

**Анализ существования оптимального управления.** Известно [8], что для того, чтобы имела место ситуация равновесия, необходимо и достаточно, чтобы целевой функционал (19) на произведении множеств  $U_{\Delta 1}(A) \times V_{\Delta 1}(B)$  имел *седловую точку*. Рассмотрим вопрос о существовании седловой точки у этого функционала.

Прежде всего, рассмотрим топологическую структуру образующих множеств  $U_{\Delta 1}(A)$  и  $V_{\Delta 1}(B)$ . Введем в этих множествах метрическую топологию путем погружения их в гильбертово пространство  $L^2(\Delta)$  всех измеримых вещественных функций, определенных и суммируемых с квадратом модуля на интервале  $\Delta$ . Рассмотрим вначале класс допустимых управлений  $U_{\Delta 1}(A)$ . Из определения этого класса (17) следует, что он в соответствующей метрической  $L^2(\Delta)$ -топологии является ограниченным и замкнутым. Так как множество  $[0,1]$  выпукло, то класс  $U_{\Delta 1}(A)$  также является выпуклым, а это, в силу теоремы Мазура [9, с. 59; 10, с. 113], влечет за собой замкнутость  $U_{\Delta 1}(A)$  и в слабой  $L^2(\Delta)$ -топологии. Далее, так как класс  $U_{\Delta 1}(A)$  ограничен в метрической топологии, то вследствие рефлексивности  $L^2(\Delta)$  он относительно слабо компактен [11, с. 81], а следовательно, компактен в слабой  $L^2(\Delta)$ -топологии [11, с. 461]. Аналогичные рассуждения справедливы и в отношении класса допустимых возмущений  $V_{\Delta 1}(B)$ .

Таким образом, базисные множества рассматриваемой игры (20) представляют собой *выпуклые слабые компакты* в функциональном пространстве  $L^2(\Delta)$ .

Далее рассмотрим целевой функционал анализируемой игры (19), который представляет собой билинейную форму, заданную на произведении  $U_{\Delta 1}(A) \times V_{\Delta 1}(B)$ . При принятых выше предположениях относительно функций  $M_1(\rho, s)$  и  $\xi(s)$  он непрерывен в слабой

$L^2(\Delta)$ -топологии [9, с. 61] и является выпуклым и вогнутым по своим аргументам. Отсюда следует [12, с. 83], что максимин и минимакс в формулах (21), (22) достигаются и равны друг другу, т. е. рассматриваемый функционал имеет седловую точку  $\langle \tilde{u}_\Delta^*, v_\Delta^* \rangle$ , характеризующую соответствующую ситуацию равновесия. Это означает, что *искомое оптимальное решение в рассматриваемой игровой задаче существует* и определяется параметрами указанной седловой точки  $\langle \tilde{u}_\Delta^*, v_\Delta^* \rangle$ , т. е. аргументами соответствующих максимина и минимакса. Рассмотрим пример нахождения этого решения.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В УСЛОВИХ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА

**Математическая постановка рассматриваемого варианта общей задачи.** Рассмотрим важный в прикладном отношении вариант поставленной выше общей теоретико-игровой задачи управления информационным взаимодействием в условиях антагонистических возмущений, приняв ряд дополнительных допущений. Прежде всего предположим, что диаграмма направленности информационного взаимодействия симметрична относительно местной вертикали и ядро соответствующего уравнения состояния информационного взаимодействия (4) имеет вид

$$M(\rho, \tau) = K[\rho - s(\tau)]. \quad (24)$$

Функцию  $K(\alpha)$  представим в виде

$$K(\alpha) = 1/2\varepsilon \text{ при } |\alpha| \leq \varepsilon, \quad K(\alpha) = 0 \text{ при } |\alpha| > \varepsilon, \quad (25)$$

где  $\varepsilon$  – заданная положительная величина. Далее, предположим, что при этом  $\varepsilon \rightarrow 0$ , т. е. ядро уравнения информационного состояния представляет собой обобщенную  $\delta$ -функцию. В работе [3] этот вариант назван случаем *предельной локализации* информационного взаимодействия. Подобная модель имеет практическое значение в тех случаях, когда диаграмма направленности взаимодействия имеет вид достаточно узкого луча, ориентированного в подспутниковую точку КА. Тогда из выражения (12) и свойств  $\delta$ -функции следует, что уравнение финального информационного состояния с учетом (13) в этом случае определяется формулой

$$\gamma_{1c}(\rho, a_f) = w^{-1}(\rho)\tilde{u}(\rho), \sqrt{2}, \quad (26)$$

а целевой функционал (19) приобретает следующий вид:

$$J_1(u_\Delta, v_\Delta) = \left[ \xi(\cdot), \gamma_{1c}(\cdot, a_f) \right] = \int_{a_0}^{a_f} v(\rho)F(\rho)\tilde{u}(\rho)d\rho, \quad (27)$$

где

$$F(\rho) = \xi(\rho)w^{-1}(\rho) \quad (28)$$

– заданная неотрицательная ограниченная кусочно-непрерывная вещественная функция, определяемая условиями задачи.

Рассмотрим соответствующую бесконечную антагонистическую игру

$$\Gamma_1 = \langle U_{\Delta 1}(A), V_{\Delta 1}(B), J_1(u_\Delta, v_\Delta) \rangle. \quad (29)$$

В соответствии с вышеизложенным решение этой игры существует и соответствующее оптимальное управление определяется параметрами седловой точки функционала (27). Перейдем к нахождению указанного решения.

**Решение задачи – нахождение оптимального управления.** С целью получения решения игровой задачи (29) сведем эту задачу к эквивалентной *антагонистической дифференциальной игре* [10, 11]. Введем две новые переменные величины  $x_1$  и  $x_2$ , определив их как решение краевой задачи для следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_1' &= \frac{dx_1}{d\rho} = w^{-1}(\rho)\tilde{u}(\rho), \quad x_1(a_0) = 0, \quad x_1(a_f) = A; \\ x_2' &= \frac{dx_2}{d\rho} = v(\rho), \quad x_2(a_0) = 0, \quad x_2(a_f) = B, \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

и рассмотрим соответствующую *антагонистическую дифференциальную игру* с целевым функционалом (27) на произведении  $U_{\Delta} \times V_{\Delta}$  классов допустимых управлений (15) и возмущений (8). Очевидно, что решение подобной игровой задачи будет совпадать с решением для исходной задачи (29). Подобная редукция позволяет использовать для нахождения оптимального управления современный аппарат теории дифференциальных игр [13–15].

Заметим, что особенность исследуемой задачи заключается в том, что целевой функционал и правые части дифференциальных уравнений (30) не зависят от переменных величин  $x_1$  и  $x_2$ , что в теории оптимального управления характерно для так называемых *ляпуновских задач* [16, с. 312]. Это дает основание назвать рассматриваемую дифференциальную игру *ляпуновской дифференциальной игрой*.

Перейдем к решению задачи (27)–(30). Для нахождения искомой оптимальной стратегии в целом используем расширение *принципа максимума* Понтрягина применительно к дифференциальным играм [15]. Функцию Понтрягина (гамильтониан) в этом случае представим в следующем виде:

$$H(\rho, \tilde{u}, v) = \tilde{u}F(\rho)v - rw^{-1}(\rho)\tilde{u} - pv, \quad (31)$$

где  $r$  и  $p$  – постоянные неотрицательные [16, с. 312] неопределенные множители Лагранжа (сопряженные величины по Понтрягину), величины которых будут определены в дальнейшем.

Известно [15], что если пара  $\langle \tilde{u}_{\Delta}^*, v_{\Delta}^* \rangle$  определяет оптимальную стратегию в рассматриваемой задаче, то для любого значения  $\rho \in \Delta$  выполняется условие

$$H(\rho, \tilde{u}^*(\rho), v^*(\rho)) = \max_{0 \leq \tilde{u} \leq 1} \min_{0 \leq v \leq 1} H(\rho, \tilde{u}, v) = \min_{0 \leq v \leq 1} \max_{0 \leq \tilde{u} \leq 1} H(\rho, \tilde{u}, v), \quad (32)$$

которое означает, что в каждой точке отрезка  $\Delta$  оптимальная стратегия определяется седловой точкой функции Понтрягина (31) на единичном квадрате.

Седловая точка билинейной формы (31) на указанном квадрате существует и может быть найдена в результате соответствующего анализа максимина и минимакса функции (31). Этот анализ показывает, что оптимальная стратегия в данном случае, а следовательно, и искомое оптимальное управление, а также антагонистическая реакция среды определяются следующими соотношениями:

$$\tilde{u}^*(\rho; r, p) = \min \left\{ 1, \frac{p}{F(\rho)} \right\} \gamma_+ (F(\rho) - rw^{-1}(\rho)); \quad (33)$$

$$v^*(\rho; r, p) = 1 + \left[ \min \left\{ 1, \frac{rw^{-1}(\rho)}{F(\rho)} \right\} - 1 \right] \gamma_+(F(\rho) - p), \quad (34)$$

где

$$\gamma_+(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z \geq 0, \\ 0 & \text{при } z < 0 \end{cases} \quad (35)$$

– функция Хэвисайда.

Чтобы завершить решение рассматриваемой задачи, необходимо найти значения сопряженных величин (множителей Лагранжа)  $r$  и  $p$ , отвечающие краевым условиям, указанным в формулах (30). С этой целью введем следующие две функции:

$$f_1(r, p) = \int_{a_0}^{a_f} w^{-1}(\rho) \tilde{u}^*(\rho; r, p) d\rho, \quad f_2(r, p) = \int_{a_0}^{a_f} v^*(\rho; r, p) d\rho, \quad (36)$$

которые характеризуют расход ресурса обеих сторон конфликта при использовании оптимальной стратегии, определяемой формулами (33) и (34).

Очевидно, что искомые значения сопряженных величин  $r^*$  и  $p^*$  могут быть найдены как решение системы алгебраических уравнений:

$$f_1(r, p) = A, \quad f_2(r, p) = B, \quad (37)$$

при указанных выше условиях:

$$0 < A < T = t_f - t_0, \quad 0 < B < L = a_f - a_0. \quad (38)$$

Подставляя соответствующие значения  $r^*$  и  $p^*$  в формулы (33) и (34), получим искомое оптимальное управление и соответствующую реакцию среды, т. е. решение поставленной задачи.

Отметим, что рассмотренная теоретико-игровая задача является обобщением задачи Беллмана – Шиффмана, сформулированной авторами в 1949 году [17]. При этом в постановке задачи Беллмана – Шиффмана требуется монотонность функции  $F(\rho)$ , и, кроме того, в уравнениях (30) функция  $w^{-1}(\rho)$  тождественно равна единице. При этих условиях авторами получено решение на основе известной леммы Неймана – Пирсона [18, с. 272–279]. Решение, приведенное в настоящей статье и полученное на основе использования современных математических инструментов, свободно от указанных ограничений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача оптимального управления операцией информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли в условиях целенаправленных возмущающих воздействий. Приведена общая математическая формулировка этой задачи для линейного терминального функционала качества процесса управления в предположении, что возмущающее воздействие носит мультипликативный характер и возмущающая среда является антагонистической. Показано, что задача сводится к исследованию бесконечной антагонистической игры на классах допустимых управлений и возмущений с билинейным целевым функционалом. Доказано, что эта игра имеет решение, так как седловая точка указанного функционала существует. Рассмотрен конкретный пример решения соответствующей задачи оптимального управления для случая предельной локализации информационного взаимодействия. Задача сведена к рассмотрению дифференциальной игры второго

порядка, и найдены параметры соответствующей седловой точки функционала, т. е. оптимальная стратегия в целом. Полученные результаты могут быть использованы при решении практических задач оптимального планирования работы бортовой аппаратуры КА, предназначенной для информационного взаимодействия с окружающей физической средой.

### Список используемых источников

1. *Калинин В.Н.* Современная космическая кибернетика – методологические основы и направления исследований // *Информация и космос.* – 2007. – № 3. – С. 7–16.
2. *Калинин В.Н.* Теория управления космическим аппаратом (на основе концепции активного подвижного объекта): моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 188 с.
3. *Калинин В.Н.* Математическая модель информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли // *Труды СПИИРАН.* – 2014. – Вып. 3(34). – С. 33–56.
4. *Калинин В.Н.* О некоторых задачах оптимального управления информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли // *Труды СПИИРАН.* – 2015. – Вып. 4(41). – С. 34–56.
5. *Калинин В.Н.* Оптимальное планирование информационного взаимодействия космического аппарата с дискретной средой на поверхности Земли // *Информация и космос.* – 2015. – № 3. – С. 150–157.
6. *Калинин В.Н.* Оптимальное управление информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли в условиях случайных возмущений // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – 2018. – Вып. 660. – С. 6–18.
7. *Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Шевкопляс Е.В.* Теория игр. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 422 с.
8. *Васин А.А., Морозов В.В.* Введение в теорию игр. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – 278 с.
9. *Вайнберг М.М.* Функциональный анализ. – М.: Просвещение, 1979. – 128 с.
10. *Канторович Л.В., Акилов Г.П.* Функциональный анализ. – М.: Физматлит, 1997. – 744 с.
11. *Данфорд Н., Шварц Дж.* Линейные операторы. Общая теория. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – Ч.1. – 895 с.
12. *Балакришнан А.* Введение в теорию оптимизации в гильбертовом пространстве. – М.: Мир, 1974. – 259 с.
13. *Красовский Н.Н., Субботин А.И.* Позиционные дифференциальные игры. – М.: Наука, 1974. – 456 с.
14. *Понтрягин Л.С.* К теории дифференциальных игр // *Успехи математических наук.* – 1966. – Т. XXI, вып. 4 (130). – С. 219–274.
15. *Зеликин М.И., Тынянский Н.Т.* Детерминированные дифференциальные игры // *Успехи математических наук.* – 1965. – Т. XX, вып. 4(124). – С. 151–157.
16. *Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В.* Оптимальное управление. – М.: Физматлит, 2007. – 408 с.
17. *Bellman R., Shiffman M.* On the min-max of  $\int_0^1 f(x)a(x)d(x)dx$ . The RAND Corporation. RM-308. 1949.
18. *Беллман Р., Гликсберг И., Гросс О.* Некоторые вопросы математической теории процессов управления. – М.: ИЛ, 1962. – 336 с.

К.Г. Колесников,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
А.А. Масалкин,  
*кандидат техн. наук;*  
Б.В. Москвин,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В СЕТИ СВЯЗИ С ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ

Рассматриваются вопросы оптимизации параметров информационного обмена в сети связи с динамически изменяющейся структурой. Изменение структуры сети связано с перемещением космических пунктов связи. На основе анализа и прогноза изменения структуры сети выделяются интервалы постоянства возможностей передачи информации. В ситуациях, когда параметры сети (прежде всего пропускные способности каналов связи) не позволяют решать с должным качеством целевые задачи системы (передачу необходимых объемов целевой информации), целесообразно проводить оптимизацию параметров.

Ключевые слова: целевое функционирование, динамически изменяющаяся структура сети связи, статическая модель, параметрическая оптимизация, математическое программирование.

Развитие автоматизированных систем управления (АСУ) сложными территориально-распределенными комплексами, функционирование которых связано с переработкой и передачей больших объемов данных, приводит к необходимости использования в контуре управления систем подвижных элементов (ретрансляторов), обеспечивающих непосредственный информационный обмен между подсистемами АСУ. В качестве таких систем рассматриваются системы, состоящие из совокупности КА, выполняющих общую целевую задачу и осуществляющих между собой информационный обмен с целью координации действий. Анализ показывает, что структура такой сети в результате орбитального движения КА изменяется или, говоря другими словами, в пространстве образуется динамическая сеть связи. На основе анализа и прогноза изменения структуры сети можно выделить интервалы постоянства структуры передачи информации. В этих условиях создается возможность перехода от динамической модели, описывающей условия передачи информации, к ее статической интерпретации [1, 2]. В соответствующей задаче планирования информационного обмена учитываются ограничения пропускных способностей каналов передачи данных и динамика относительного перемещения КА. Вместе с тем возможны ситуации, когда параметры сети (прежде всего пропускные способности каналов связи) не позволяют решать с должным качеством целевые задачи системы (передачу необходимых объемов целевой информации). В этих условиях целесообразно проводить оптимизацию таких параметров.

Рассмотрим ситуацию, когда получаемая от источников информация передается в Центр обработки. Специфика функционирования системы заключается в том, что перемещение КА приводит к дискретному изменению структуры сети, т. е. потенциальных возможностей передачи информации в ней. Такое изменение происходит в моменты времени, когда КА входят в зоны (или выходят из них) доступности друг друга.

Упорядоченное множество моментов времени  $\{\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k\}$ , когда изменяется структура сети или ее характеристики, разбивает весь период управления  $T$  на интервалы, соответствующие постоянству структуры сети. Произвольному интервалу  $(\tau_{l-1}, \tau_l]$  постоянства

структуры сети и всех ее числовых характеристик сопоставим номер  $l \in L = \{1, \dots, k\}$ . Возможности передачи информации на  $l$ -м интервале постоянства структуры сети характеризуются графом  $G_l = (N, E_l)$ , где  $N$  – множество вершин графа (узлов связи);  $E_l$  – множество дуг графа (каналов связи),  $E_l \subseteq N \times N = \{(i, j), i, j \in N\}$ . Пример динамики структуры сети космической связи приведен на рис. 1.

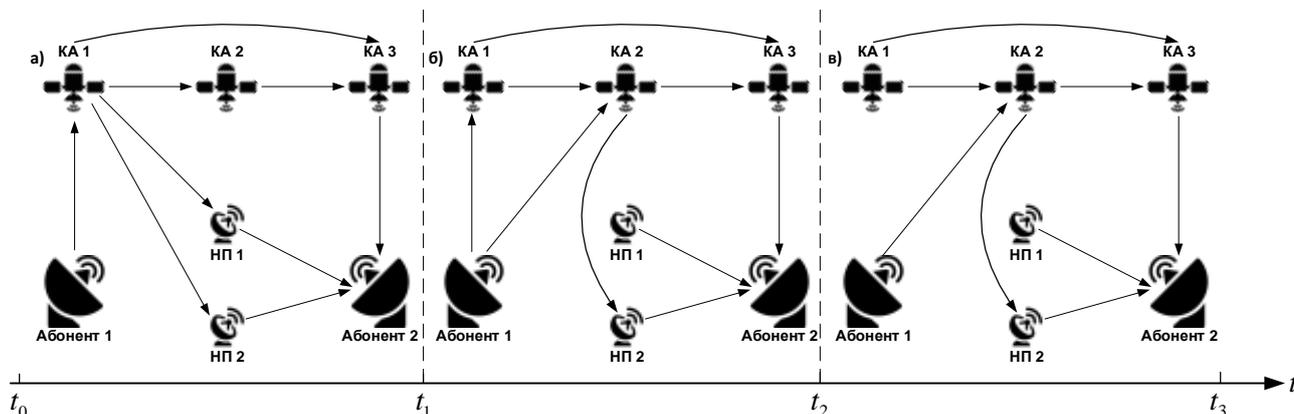


Рис. 1. Пример динамики структуры сети космической связи двух абонентов:

а – первый временной интервал постоянства структуры  $T_1 = (t_0, t_1]$ ;

б – второй временной интервал постоянства структуры  $T_2 = (t_1, t_2]$ ;

в – третий временной интервал постоянства структуры  $T_3 = (t_2, t_3]$

Основой сведения задачи в динамической интерпретации к статической интерпретации служит учет специфики функционирования системы, заключающегося в том, что перемещение КА приводит к дискретному изменению структуры сети, т. е. потенциальных возможностей передачи информации в ней, а все характеристики сети представляют кусочно-постоянные функции. Такое изменение происходит в моменты времени, когда КА входят (или выходят) из зон взаимной радиовидимости друг друга и наземных пунктов связи (НП).

План передачи информации можно описать вектором  $X = (x_{ij}^l)$  [3]-[5], где  $x_{ij}^l$  – время передачи информации между  $i$ -м и  $j$ -м узлами на  $l$ -м интервале постоянства структуры сети,  $l \in L, i, j \in N$ . Вектор  $X$  имеет число компонентов, равное сумме дуг графов  $g = \sum_{l=1}^k g_l$  на каждом интервале постоянства структуры сети;  $g_l$  – количество дуг графа, характеризующих структуру сети на  $l$ -м интервале постоянства.

Математическую модель планирования передачи максимального объема информации в сети связи с динамически изменяющейся структурой можно представить в следующем виде:

$$I_0 = \sum_{j \in N} \sum_{l \in L} \varphi_j^l \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in Q_{jl}^{(+)}} \psi_{ij}^l x_{ij}^l + y_j^{l-1} + \varphi_j^l = \sum_{r \in Q_{jl}^{(-)}} \psi_{jr}^l x_{jr}^l + y_j^l \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in W_k^l} x_{ij}^l \leq T_l, W_k^l \in W_0^l, l \in L, \quad (3)$$

$$t_{ij}^l \geq 0, 0 \leq y_j^l \leq V_j, i, j \in N, l \in L. \quad (4)$$

- Здесь  $N$  – множество узлов связи (КА);  
 $L$  – множество интервалов постоянства структуры;  
 $\Psi_{ij}^l$  – интенсивность (скорость) передачи информации между  $i$ -м и  $j$ -м узлами на  $l$ -м интервале постоянства структуры;  
 $x_{ij}^l$  – время передачи информации между  $i$ -м и  $j$ -м узлами на  $l$ -м интервале постоянства структуры;  
 $y_j^l$  – количество информации, поступившей в буферный накопитель  $j$ -го узла на  $l$ -м интервале;  
 $\phi_j^l$  – количество информации, поступившей в  $j$ -й узел на  $l$ -м интервале постоянства структуры от внешних поставщиков информации;  
 $Q_{jl}^{(+)}$  – множество узлов, из которых в  $j$ -й узел может поступить информация на  $l$ -м интервале (полустепень входа  $j$ -й вершины графа);  
 $Q_{jl}^{(-)}$  – множество узлов, в которые может передаваться информация из  $j$ -го узла на  $l$ -м интервале (полустепень выхода  $j$ -й вершины графа);  
 $T_l$  – длительность интервала постоянства структуры на  $l$ -м интервале,  $T_l = \tau_l - \tau_{l-1}$ ;  
 $W_0^l$  – множество путей передачи информации на  $l$ -м интервале (пути в графе  $G_l$ );  
 $W_k^l$  – множество каналов передачи информации на  $k$ -м пути  $l$ -го интервала;  
 $V_j$  – объем буферного накопителя  $j$ -го узла.

Ограничения (2) описывают условия поступления (передачи) информации в  $j$ -й узел на  $l$ -м интервале постоянства структуры динамической сети. В левой части ограничений описывается поступление информации. Она может поступать из других узлов сети, от внешних источников информации ( $\phi_j^l$ ) и из буферного накопителя с предыдущего интервала. Правая часть равенства описывает условия передачи информации в другие узлы сети, а также накопление информации в буферном накопителе для ее последующей передачи на других интервалах постоянства структуры ( $y_j^l$ ) (рис. 2). Ограничения (3) описывают требование работы каналов связи во временных пределах интервала постоянства структуры ( $T_l$ ).

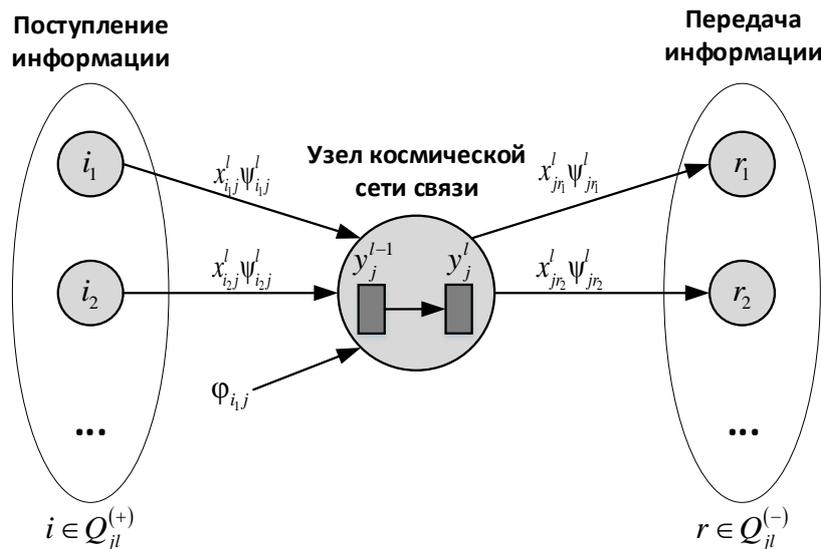


Рис. 2. Условие поступления (передачи) информации в  $j$ -й узел на  $l$ -м интервале постоянства структуры динамической сети

На рис. 2 представлено прохождение информации через  $j$ -й узел космической сети связи на  $l$ -м интервале постоянства структуры. Количество поступившей в узел информации  $I_1$

определяется интенсивностью (скоростью) передачи информации между узлами –  $\{\Psi_{i_1j}, \Psi_{i_2j}, \dots\}, i \in Q_{jl}^{(+)}$  и временем работы каналов связи –  $\{x_{i_1j}, x_{i_2j}, \dots\}, i \in Q_{jl}^{(+)}$ , а также состоянием буферного накопителя на предыдущем интервале постоянства –  $y_j^{l-1}$  и количеством информации, поступившей от внешних поставщиков информации –  $\phi_j^l$ ,  $I_1 = \sum_{i \in Q_{jl}^{(+)}} \Psi_{ij}^l x_{ij}^l + y_j^{l-1} + \phi_j^l$ . Аналогичным образом определяется количество покинувшей узел информации –  $I_2 = \sum_{i \in Q_{jl}^{(-)}} \Psi_{j_1i}^l x_{j_1i}^l$ . Количество принятой информации должно равняться количеству переданной информации:  $I_1 = I_2$ .

Здесь решением (неизвестными переменными) являются  $x_{ij}^l, i, j \in N, l \in L$  и  $y_j^l, \phi_j^l, j \in N, l \in L$ ; параметрами (известными величинами) являются  $\Psi_{ij}^l, i, j \in N, V_j, j \in N$  и характеристики структуры динамической сети. В результате решения задачи (1)–(4) возможны ситуации, когда максимальный объем целевой информации ( $I_0$ ), который может передаваться в сети с заданными параметрами, меньше необходимого ( $I_{\text{зад}}$ ). Если динамические характеристики, описывающие изменения структуры сети, и величины  $V_j, j \in N$  (объем буферного накопителя КА) при решении задачи планирования изменять невозможно, то параметры  $\Psi_{ij}^l, i, j \in N$  – интенсивность (скорость) передачи информации между  $i$ -м и  $j$ -м узлами на  $l$ -м интервале постоянства структуры можно модифицировать с целью передачи заданного объема целевой информации ( $I_{\text{зад}}$ ).

Действительно, в связи с тем, что по сети связи передаются потоки различной дополнительной (базовой) информации, то интенсивность (скорость) передачи заданного объема информации ( $I_{\text{зад}}$ ) между  $i$ -м и  $j$ -м узлами на  $l$ -м интервале постоянства структуры  $\Psi_{ij}^l$  вычисляется как [6]

$$\Psi_{ij}^l = \omega_{ij} - \delta_{ij}^l / T_l, i, j \in N, l \in L. \quad (5)$$

- Здесь  $\omega_{ij}$  – скорость передачи информации между  $i$ -м и  $j$ -м узлами (техническая характеристика канала);  
 $\delta_{ij}^l$  – объем базовой информации, передаваемой между  $i$ -м и  $j$ -м узлами на  $l$ -м интервале постоянства структуры;  
 $T_l$  – длительность интервала постоянства структуры на  $l$ -м интервале.

Таким образом, для передачи заданного объема информации ( $I_{\text{зад}}$ ) необходимо повысить скорость передачи информации  $\Psi_{ij}^l$ , или, в соответствии с (5), сократить объем передаваемой базовой информации  $\delta_{ij}^l$ . Ограничения, описывающие данные условия, будут иметь вид:

$$\sum_{j \in N} \sum_{l \in L} \phi_j^l = I_{\text{зад}}, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in Q_{jl}^{(+)}} \Psi_{ij}^l x_{ij}^l + y_j^{l-1} + \phi_j^l = \sum_{r \in Q_{jl}^{(-)}} \Psi_{jr}^l x_{jr}^l + y_j^l, j \in N, l \in L, \quad (7)$$

$$\Psi_{ij}^l \geq 0, 0 \leq y_j^l \leq V_j, i, j \in N, l \in L. \quad (8)$$

Здесь величины  $x_{ij}^l$ , найденные в результате решения задачи (1)–(4), являются параметрами;  $\Psi_{ij}^l, y_j^l, \phi_j^l$  – неизвестные переменные.

В соответствии с (5) сокращение объема базовой информации  $\Delta\delta_{ij}^l$ , передаваемой на  $l$ -м интервале постоянства структуры между  $i$ -м и  $j$ -м узлами, можно определить как

$$\Delta\delta_{ij}^l = \delta_{ij}^l - \omega_{ij} |T_l| + \psi_{ij}^l |T_l|, (i, j) \in E_l, l \in L. \quad (9)$$

Тогда в качестве критерия оптимизации целесообразно выбрать критерий минимизации сокращения объема базовой информации, который будет иметь следующий вид:

$$\sum_{l \in L} \sum_{(i, j) \in E_l} \Delta\delta_{ij}^l \rightarrow \min. \quad (10)$$

Базовая информация неоднородна по своему составу и содержит различные виды информации  $Z = \{1, \dots, z\}$  – множество видов информации, обладающие различной важностью  $\alpha_z, 0 \leq \alpha_z \leq 1, \sum_{z \in Z} \alpha_z = 1$ . Тогда объем базовой информации  $z$ -го вида, передаваемой на  $l$ -м интервале постоянства структуры между  $i$ -м и  $j$ -м узлами, обозначим как  $\delta_{ij}^{zl}$ , соответственно  $\Delta\delta_{ij}^{zl}$  – сокращение объема базовой информации  $z$ -го вида. В этом случае критерий (10) с учетом важности базовой информации можно переписать:

$$\sum_{z \in Z} \sum_{l \in L} \sum_{(i, j) \in E_l} \alpha_z \Delta\delta_{ij}^l \rightarrow \min. \quad (11)$$

Здесь  $\alpha_z \in [0, 1]$ , причем для наиболее важной информации  $\alpha_z = 0$ .

В определенных условиях обстановки целесообразно минимизировать максимальное сокращение базовой информации какого-либо вида ( $C$ ):

$$C \rightarrow \min, \quad (12)$$

причем

$$\Delta\delta_z = \sum_{l \in L} \sum_{(i, j) \in E_l} \Delta\delta_{ij}^{zl} \leq C^z, z \in Z. \quad (13)$$

Ограничения (13) отражают тот факт, что сокращение объема базовой информации  $z$ -го вида  $\Delta\delta_z$ , передаваемой в сети, не должно превышать величину  $C^z$ . Эти ограничения включаются в систему ограничений (6)–(8). Критерием оптимизации в этом случае является выражение (12).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ представленной модели позволяет заключить, что соответствующая оптимизационная задача является задачей линейного программирования с двусторонними ограничениями на переменные, которая может решаться методами последовательного улучшения планов. Специфические особенности матрицы условий, задаваемой ограничениями, выражаются в том, что она имеет блочно-диагональную структуру с верхним окаймлением. В качестве блоков выступают модели выбора параметров передачи информации на интервалах постоянства структуры. В качестве координирующей части выступают условия, связанные с использова-

нием буферных накопителей. Для решения такого рода задач были разработаны специальные алгоритмы декомпозиционного планирования, в частности, алгоритм Данцига – Вулфа [7].

Использование модели в системно-аналитических исследованиях позволяет устанавливать связь между различными характеристиками системы и на этой основе определять рациональный облик и технические особенности построения системы передачи данных с динамической структурой в различных условиях обстановки.

### Список используемых источников

1. Комбинированные модели управления структурной динамикой информационных систем / Б.В. Москвин, Е.П. Михайлов, А.Н. Павлов и др. // Изв. высших учебных заведений. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, № 11. – С. 7–12.

2. Кочкаров А.М., Кочкаров А.А., Никищенко С.П. Структурная динамика и исследование структурно-временных характеристик дискретных систем // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2006. – № 9. – С. 235–238.

3. Павлов А.Н., Павлов Д.А., Слинко А.А. Структурно-параметрический синтез системы информационного взаимодействия кластера перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и оценка ее робастности // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – № 5. – С. 6–16.

4. Модель планирования операций устойчивого информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.А. Слинко, А.Н. Павлов, Д.А. Павлов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016 – Вып. 654. – С. 8–13.

5. Павлов Д.А. Методика планирования операций информационного взаимодействия кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 649. – С. 37–47.

6. Москвин Б.В. Оптимизация передачи данных в вычислительной сети с коммутацией пакетов // Труды 5-й Всесоюзной конференции КОМПАК-87 «Вычислительные сети с коммутацией пакетов». – Рига, 1987. – С. 168–171.

7. Данциг Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения. – М.: Прогресс, 1966. – 600 с.

А.Е. Привалов,  
*кандидат техн. наук;*  
С.Г. Хлебников,  
*кандидат военных наук*

## **МНОГОАГЕНТНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМОДРОМА НА УРОВНЕ APS-СИСТЕМЫ**

В публикации представлены результаты разработки и реализации новой имитационной модели функционирования космодрома на уровне APS-систем. В основу разработанной модели положен подход, базирующийся на многоагентных технологиях, применение которого обусловлено динамически меняющейся из-за отказов технологического оборудования структурой космодрома, а также структурой решаемых задач. Обосновано применение модели для решения задачи анализа и оптимизации управления ресурсными потоками космодрома.

Ключевые слова: APS-система, управление ресурсами, космодром, запуск космического аппарата.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Управление современным космодромом, который представляет собой сложную организационно-техническую систему, осуществляется на нескольких уровнях. Вследствие сложности процесса управления в настоящее время особенно остро стоит задача комплексной автоматизации, которая решается путем разработки и внедрения интегрированной автоматизированной системы управления (АСУ) космодромом. Традиционно она рассматривается на трех уровнях (рис. 1), на каждом из которых выполняются собственные задачи [1, 2]. Основу нижнего уровня составляют SCADA-системы, выполняющие функции автоматизации сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации, разработки автоматических и автоматизированных систем технологическим оборудованием ракетно-космического комплекса. Второй уровень представляет собой MES-систему, выполняющую функции управления процессом подготовки и пуска РКН от прибытия составных частей РКН на космодром до применения ее по назначению. Верхний уровень ERP-систем предназначен для управления всеми ресурсами и информацией космодрома. Следует отметить, что в современные интегрированные АСУ сложными объектами включают в себя уровень APS-систем (Advanced Planning and Scheduling), целью которых является выполнение укрупненных директив со стороны ERP-систем для всего космодрома с детализацией до уровня рабочего центра (технического и стартового комплексов, заправочной станции космического аппарата и ракеты-носителя и т. д.). Детально модели планирования на каждом уровне, а также их взаимодействие, рассмотрены в [3].

Систематизация особенностей поступающей телеметрической информации выявила ее неоднородность, что не позволяет классическими методами провести синтез алгоритмов оперативной обработки и выполнить требования по качеству обработки информации в условиях жестких временных ограничений [5].

Необходимым компонентом любой АСУ является модель объекта управления. Иерархичность построения интегрированной АСУ космодрома требует разработки иерархической модели объекта управления, рассматриваемой на нескольких уровнях абстрагирования (стратах) [4]. Достоинством такого подхода является самостоятельность каждой страты и возможность выбрать отдельную концепцию моделирования для каждой из них. В настоящее время разработаны модели уровней ERP-систем [5], MES-систем [6,7], SCADA-систем [8]. Применение разработанных моделей на уровне APS-системы не представляется возможным по ряду причин.

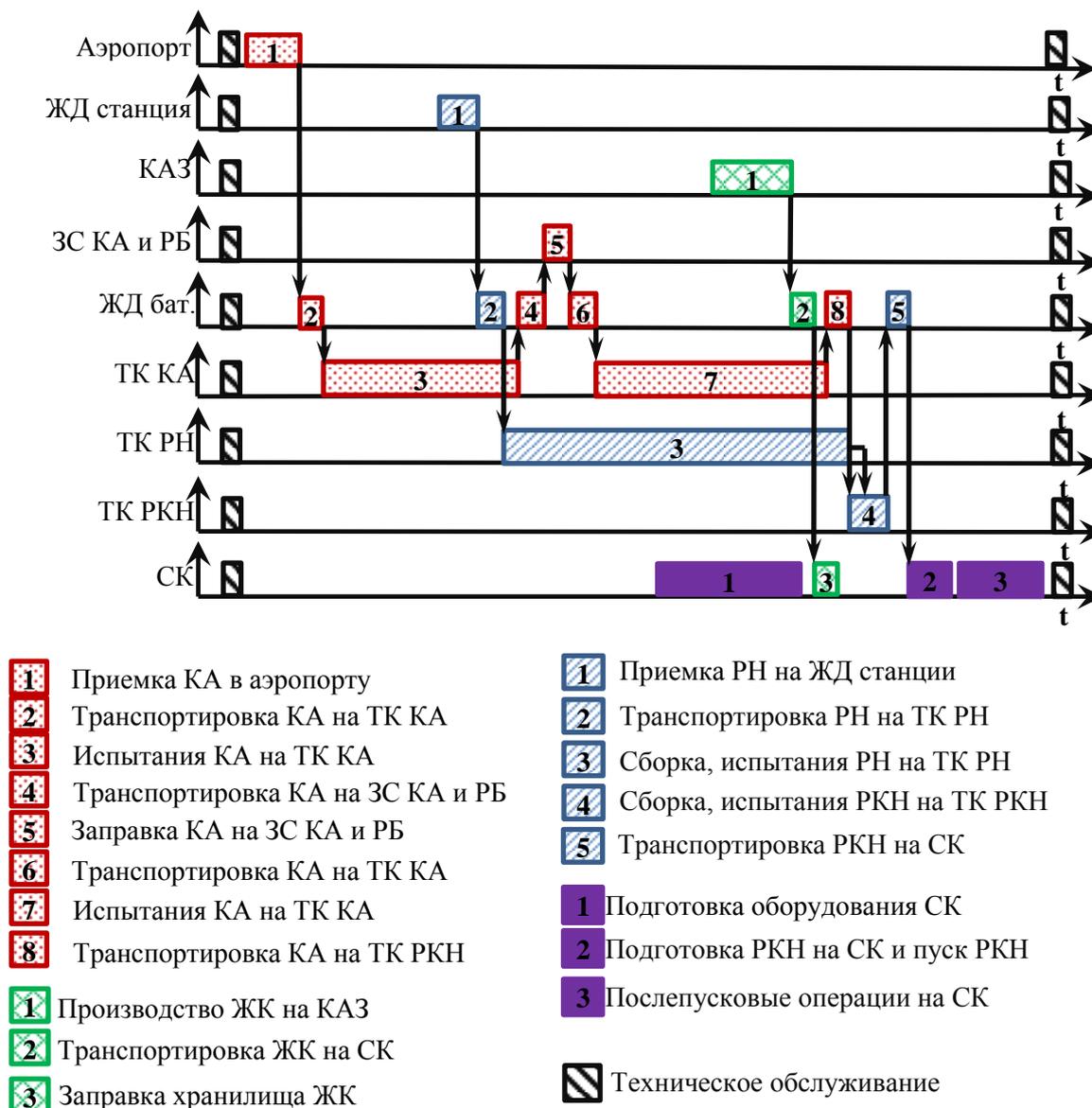


Рис. 1. План задействования средств космодрома по запуску одного КА

С одной стороны, применяемая на уровне ERP концепция системной динамики не позволяет учесть параметры расписаний рабочих центров, с другой – модель сетевого графика, применяемая в MES-системах, не отражает взаимодействия между рабочими центрами. Таким образом, требуется разработка новой модели, описывающей процесс функционирования всего космодрома на уровне APS-системы, которая предназначена для оценивания эффективности функционирования космодрома в целом, а также для оценивания частных показателей, таких как временные параметры отдельных задач, загруженность рабочих центров и т. д.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМОДРОМА

Задачей APS-систем [9] является управление цепочками движения ресурсов, причем этот функционал APS имеет двойное назначение – он реализуется как для всего космодрома, выступающего объектом всей цепочки в структуре системы макроуровня, так и для рабочих центров самого космодрома, к которым относятся технический и стартовый комплексы, кис-

лородно-азотный завод, железнодорожная станция и т. п. Планирование в APS-системе включает в себя планирование сети рабочих центров и детальное планирование их деятельности по преобразованию ресурсов. Основанием для планирования деятельности является технология запуска каждого отдельного КА. На рисунке также показано движение ресурсов и их преобразование. В качестве ресурсов для запуска КА следует выделить сам КА, ракету-носитель, компоненты ракетного топлива и т. д. Примерный план запуска одного КА в APS-системе можно представить в форме совокупности диаграмм задействования рабочих центров (рис. 1). Следовательно, постановка задачи разработки модели функционирования космодрома выглядит следующим образом.

Дано:

1. Модель структуры космодрома, представляющая собой множество рабочих центров, имеет вид

$$SP = \langle W, E, Q, P, \xi \rangle,$$

где  $W$  – множество рабочих центров космодрома;

$E$  – множество образцов технологического оборудования;

$Q$  – множество вариантов количества исправных комплектов технологического оборудования;

$\xi$  – отображение

$$\xi: W \times E \times Q \rightarrow P,$$

ставящее в соответствие каждому образцу технологического оборудования  $e_j \in E$  рабочего центра  $w_i \in W$  вероятностную меру  $p_{ij} \in P$ , заданную на множестве  $Q$ , такую, что

$$\xi_{ij}: Q \rightarrow p_{ij}, \xi_{ij} \in \xi, \xi_{ij}(Q) = 1.$$

2. Модель применения космодрома, которая имеет вид

$$APP = \langle G, T_{begin}, T_{end}, \gamma, \delta \rangle,$$

где  $G$  – множество задач макроуровня (целей);

$T_{begin}$  – множество моментов времени постановки задач;

$T_{end}$  – множество моментов времени выполнения задач;

$\gamma$  – отображение, определяющее время постановки задач,

$$\gamma: G \rightarrow T_{begin};$$

$\delta$  – отображение, определяющее время выполнения задач,

$$\delta: G \rightarrow T_{end}.$$

3. Модель выполнения задач макроуровня, которую можно записать в виде

$$F = \langle G, W, E, T, A, \chi, \rho, \tau \rangle.$$

Здесь  $A$  – множество операций, выполняемых оборудованием рабочих центров;

$T$  – множество длительностей выполнения операций;

$\chi$  – множество отношений, взаимно однозначно соответствующее множеству задач макроуровня, каждое из которых отражает топологию графика выполнения соответствующей задачи,

$$\chi_k = \langle A, R_k \rangle, R_k = \{ \langle a_l, a_m \rangle \mid \omega_1(a_l, a_m) = 1 \}, R_k \subseteq A \times A; k = \overline{1, |G|},$$

где

$$\omega_1(a_l, a_m) = \begin{cases} 1 & \text{если } a_l \text{ предшествует } a_m; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$\rho_k$  – отношение, отражающее назначение технологического оборудования на операции

$$\rho_k = \langle A, E, P_k \rangle, P_k = \{ \langle a_l, e_j \rangle \mid \omega_2(a_l, e_j) = 1 \}, P_k \subseteq A \times E;$$

где

$$\omega_2(a_l, e_j) = \begin{cases} 1 & \text{если } e_j \text{ назначен на } a_l; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$\tau$  – отношение,

$$\tau: P_k \times T \rightarrow P,$$

ставящее в соответствие каждому назначению  $\langle a_l, e_j \rangle \in P_k$  вероятностную меру  $p_{lj} \in P$ , заданную на множестве  $T$ , такую, что

$$\tau_{lj}: T \rightarrow p_{lj}, \tau_{lj} \in \tau, \tau_{lj}(T) = 1.$$

*Разработать:* модель оценивания эффективности функционирования космодрома:

$$\exists = P \prod_{k=1}^{|G|} ((\hat{T}_k < \delta(g_k) \setminus (T_k^0 = \gamma(g_k))), g_k \in G,$$

где  $T_k^0$  – время начала выполнения задачи макроуровня;

$\hat{T}_k$  – оценка времени окончания выполнения задачи макроуровня.

## СТРУКТУРА МНОГОАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ

Многоагентную модель можно описать кортежем [10]:

$$MAS = \langle ENV, AGENT1, AGENT2, \alpha, \beta \rangle.$$

Модель внешней среды  $ENV$  представляет собой модель применения космодрома, т. е.

$$ENV \sim APP.$$

В модели используются два типа агентов:

1) агенты, моделирующие задачи макроуровня  $G$ :

$$AGENT1 = \{AGENT1_k\}, k = \overline{1, |G|};$$

2) агенты, моделирующие технологическое оборудование рабочих центров:

$$AGENT2 = \{AGENT2_j\}, j = \overline{1, |E|}.$$

Для каждой задачи макроуровня создается отдельный агент, модель которого задается конечным автоматом:

$$AGENT1^{(k)} = \langle X, Y, Z, \varphi, \psi, z_0 \rangle.$$

Множество входных сигналов

$$X^{(k)} = \{x_0^{(k)}, x_1^{(k)}, x_2^{(k)} \dots\},$$

где  $x_0^{(k)}$  – сигнал начала выполнения задачи;

$x_l^{(k)}$  – множество сигналов, формируемых при выполнении операции  $a_l$  ( $l = \overline{1, |A|}$ ).

Множество выходных сигналов

$$Y^{(k)} = \{y_1^{(k)}, y_2^{(k)} \dots\},$$

где  $y_l^{(k)}$  – сигнал начала выполнения операция  $a_l$  ( $l = \overline{1, |A|}$ ).

Состояние автомата задается вектором переменных состояния

$$z^{(k)} = \langle z_1^{(k)}, z_2^{(k)} \dots \rangle,$$

где  $z_l^{(k)}$  – индикатор выполнения операции  $a_l$  ( $l = \overline{1, |A|}$ ),

$$z_l^{(k)} = \begin{cases} 1 & \text{— операция } a_l \text{ выполнена;} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

В начальный момент времени автомат находится в состоянии

$$z_0^{(k)} = \langle z_l^{(k)} : \forall l = \overline{1, |A|} (z_l^{(k)} = 0) \rangle.$$

Функция переходов конечного автомата имеет вид

$$\varphi^{(k)}: \forall l = \overline{1, |A|} \quad z_l^{(k)}(t+1) = \begin{cases} z_l^{(k)}(t), & l|(X \neq x_l^{(k)}); \\ 1, & l|(X = x_l^{(k)}). \end{cases}$$

Функцию выходов конечного автомата можно записать в виде

$$\psi: y^{(k)}(t+1) = \{y_m^{(k)}\}, m | \left( (a_m \in A_l^+) \cap \left( \prod_{s|a_s \in A_m^-} z_s^{(k)}(t+1) = 1 \right) \right), l|(X = x_l).$$

Здесь  $A_l^+$  – множество последующих операций для операции  $a_l$

$$A_l^+ = S_{\Pi}(a_l, \chi_k),$$

где  $S_{\Pi}(a_l, \chi_k)$  – левое сечение отношения  $\chi_k$  по элементу  $a_l$ ;

$A_m^-$  – множество предшествующих операций для операции  $a_m$

$$A_m^- = S_{\Pi}(a_m, \chi_k),$$

где  $S_{\Pi}(a_m, \chi_k)$  – правое сечение отношения  $\chi_k$  по элементу  $a_m$ .

Сущность работы модели агента  $AGENT1^{(k)}$  заключается в следующем. При поступлении входного сигнала  $x_l^{(k)}$ , который обозначает выполнение операции  $a_l$  одним из экземпляров технологического оборудования рабочего центра, автомат переходит в новое состояние  $z^{(k)}(t+1)$ , отличающееся от предыдущего  $z^{(k)}(t)$  значением переменной состояния  $z_l^{(k)}(t+1) = 1$ . Также при переходе автомат формирует выходное воздействие  $y^{(k)}(t+1) = \{y_m^{(k)}\}$ , которое представляет собой множество последующих для  $a_l$  операций. При этом осуществляется проверка возможности начала операций, для чего по вектору состояния  $z^{(k)}$  анализируется состояние предшественников.

Работа технологического оборудования по выполнению операций для различных задач макроуровня является, по сути, процессом обслуживания. В связи с этим модель агента  $AGENT2^{(j)}$  задается системой массового обслуживания вида G/G/n. Для построения модели принято допущение о неограниченной длине очереди. Количество каналов обслуживания определяется количеством исправных на текущий момент времени комплектов технологического оборудования  $e_j$  рабочего центра  $w_i$ :

$$n = q | q \in Q, p_n = \xi_{ij}(q),$$

где  $p_n$  – вероятность того, что количество каналов обслуживания равно  $n$ .

Заявка в системе массового обслуживания представляет собой операцию какой-либо задачи макроуровня из множества  $AGENT1$ , которую выполняет технологическое оборудование  $e_j$ . Модель заявки можно представить вектором

$$b = \langle j, k, l, \tau \rangle.$$

Здесь  $j$  – номер технологического оборудования  $e_j$ ;

$k$  – номер задачи макроуровня, которой принадлежит операция;

$l$  – номер операции  $a_l$ , которой соответствует заявка;

$\tau$  – длительность выполнения операции,

$$\tau \in T, p_{\tau} = \tau_{lj}(\tau),$$

где  $p_{\tau}$  – вероятность того, что заявка  $b$  будет обслужена за время  $\tau$ .

Входной поток заявок  $B_{in}^{(j)}$  формируется при изменении выхода конечных автоматов  $\{y_m^{(k)}\}$ . Поток заявок обладает следующими свойствами:

- поток неординарный ( $|B_{in}^{(j)}| \geq 1$ );
- поток неоднородный ( $b_{m_1}^{(j)} \neq b_{m_2}^{(j)}$ ,  $b_{m_1}^{(j)}, b_{m_2}^{(j)} \in B_{in}^{(j)}$ , так как длительности операций в общем случае отличаются);
- поток с последствием (поступление последующей заявки зависит от времени поступления предыдущей заявки).

Длительность обслуживания заявки  $b_m^{(j)}$  определяется распределением времени  $\tau$  выполнения операции технологическим оборудованием  $e_j$ .

На выходе агента формируется выходной поток обслуженных заявок  $B_{out}^{(j)}$ .

Неоднородность потоков заявок и обслуживания не позволяют осуществить аналитический расчет известными методами теории массового обслуживания (уникальность заявок делают невозможным применение самого термина «массовое»). В связи с этим для проведения исследований выбран метод имитационного моделирования.

Функцию взаимодействия между агентами  $\alpha$  можно представить кортежем

$$\alpha = \langle \alpha_1, \alpha_2 \rangle.$$

Здесь  $\alpha_1$  – функция, формирующая входной поток заявок для  $AGENT2^{(j)}$ , который имеет вид

$$B_{in}^{(j)} = \{b = \langle j, k, l, \tau \rangle, k = \overline{1, |G|}, l \in \{y_l^{(k)}\} \subseteq \{y_m^{(k)}\}, a_l \in S_{\Pi}(e_j, \rho_k),$$

где  $S_{\Pi}(e_j, \rho_k)$  – правое сечение  $\rho_k$  по элементу  $e_j$ ;

$\alpha_2$  – функция, определяющая входную ситуацию конечных автоматов  $AGENT1^{(k)}$ , которая имеет вид

$$X^{(k)} = x_l^{(k)}, (k, l) | b = \langle j, k, l, \tau \rangle \in B_{out}^{(j)}, j = \overline{1, |E|}.$$

Функцию взаимодействия с внешней средой  $\beta$  запишем в следующем виде:

$$X^{(k)} = x_0^{(k)} | t = \gamma(g_k), k = \overline{1, |G|},$$

где  $t$  – текущее (модельное) время.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В СИСТЕМЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с постановкой задачи целью разработки имитационной модели является оценивание эффективности функционирования космодрома. Однако ввиду того, что модель разрабатывается для применения в структуре интегрированной АСУ космодрома, ее программная реализация должна обеспечить выполнение таких задач, как:

- визуализация процесса функционирования космодрома в различном масштабе времени (реальном или виртуальном);
- оценивание показателя эффективности функционирования космодрома;
- оптимизация функционирования космодрома по показателю эффективности.

Все данные, представленные в постановке задачи, хранятся в базе исходных данных. На их основании формируется структура основных модулей имитационной модели (рис. 2). Для обеспечения функционирования модели и решения указанных задач в состав модели включены ряд служебных модулей.

Необходимость применения различных подходов к моделированию (конечных автоматов для агентов  $AGENT1$  и систем обслуживания для агентов  $AGENT2$ ) обуславливают выбор для разработки модели системы имитационного моделирования AnyLogic.

Результат визуализации работы имитационной модели представлен на рис. 3.

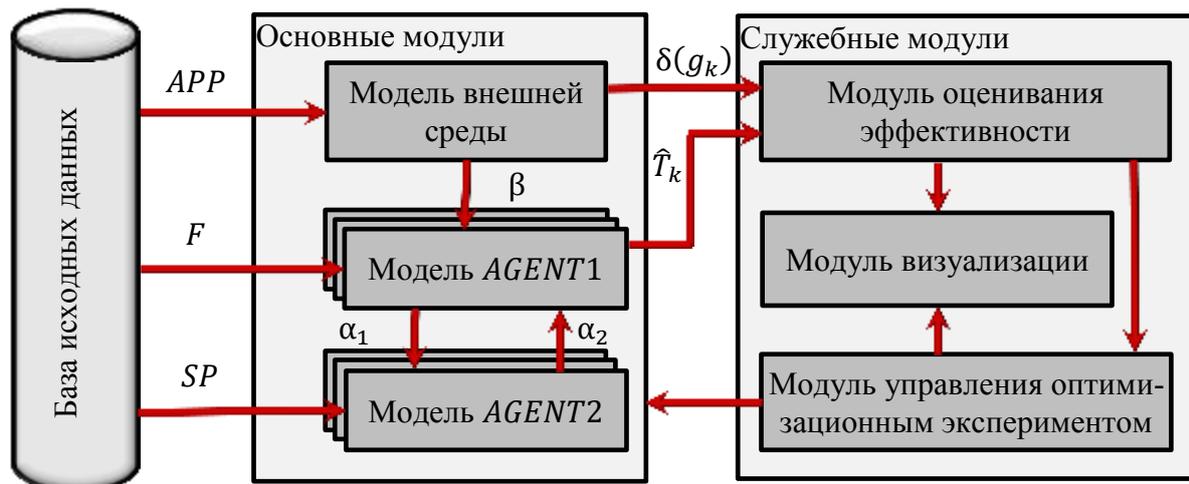


Рис. 2. Структура имитационной модели

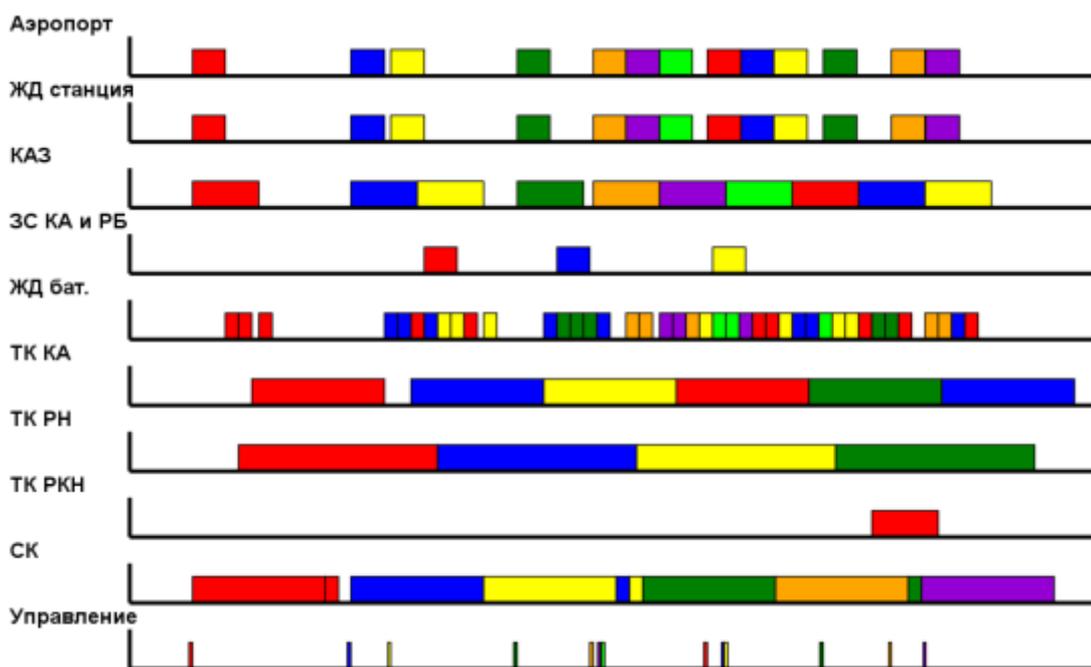


Рис. 3. Визуализация работы имитационной модели

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимым компонентом любой АСУ является модель объекта управления. В статье представлены результаты разработки и реализации новой имитационной модели функционирования космодрома на уровне APS-систем. В основу разработанной модели положен подход, базирующийся на многоагентных технологиях, применение которого обусловлено динамически меняющейся из-за отказов технологического оборудования структурой космодрома, а также структурой решаемых задач. Модель позволяет исследовать зависимость эффективности функционирования космодрома от следующих случайных факторов: отказы оборудования, время поступления задач, длительность выполнения задач и т. д. Модель может быть использована в составе APS-системы космодрома для оценивания и оптимизации

показателей эффективности функционирования космодрома, а также обоснования управленческих решений на применение средств космодрома.

### Список используемых источников

1. *Шмелев В.В.* Корпоративная информационная система автоматизированной системы управления подготовкой и пуском ракеты космического назначения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 29–37.
2. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов / В.А. Зеленцов, А.П. Ковалев, М.Ю. Охтилев и др. // Труды СПИИРАН. – 2013. – № 5 (28). – С. 7–81.
3. *Привалов А.Е., Дудалев Г.В., Александров М.А.* Повышение эффективности планирования деятельности космодрома в интегрированной автоматизированной системе управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 10. – С. 517–524.
4. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1972. – 344 с.
5. *Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю., Хлебников С.Г.* Имитационная модель управления ресурсами космодрома // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 25–35.
6. *Привалов А.Е., Хлебников С.Г.* Имитационная модель управления проектами с использованием сетевого графика // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2016. – №2 (130). – С. 26–33.
7. Имитационная модель процесса подготовки ракеты космического назначения к пуску на стартовом комплексе с учетом возможных нештатных ситуаций / А.Е. Привалов, А.Г. Тарасов, А.Л. Копейка и др. // Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» 14–15 декабря 2016 г. – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 151–155.
8. *Осипов Н.А., Тарасов А.Г.* SCADA системы: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 36 с.
9. *Загидуллин Р.Р.* Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2015 – 372 с.
10. *Бугайченко, Д.Ю., Соловьев И.П.* Формально-логическая спецификация мультиагентных систем реального времени // Вестник СПбГУ. Сер. 1. – 2007. – № 3. – С. 49–57.

Д.В. Скворцов,  
кандидат техн. наук

## **ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Представлен подход к моделированию функционирования космических аппаратов (КА), объединяющий статистическое имитационное моделирование функционирования КА в условиях воздействий факторов космического пространства (ФКП) и искусственную нейронную сеть (ИНС), обучаемую с использованием данных, полученных в ходе численного эксперимента. Рассмотрен алгоритм синтеза ИНС, предназначенной для оценивания технического состояния КА, представлен пример реализации алгоритма. На основании полученных результатов дано обоснование возможности применения ИНС с ограниченной номенклатурой исходных данных для оценивания технического состояния КА в условиях недостатка информации о моделируемом процессе.

Ключевые слова: космический аппарат, техническое состояние, искусственная нейронная сеть.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современный космический аппарат (КА) представляет собой сложную техническую систему, нормальное функционирование которой обеспечивается рядом бортовых систем (БС). В процессе функционирования КА на эти системы действуют различные факторы космического пространства (ФКП), что становится причиной деградации характеристик отдельных элементов КА. Значительная часть сбоев и отказов аппаратуры КА происходит вследствие воздействия ФКП (корпускулярной радиации, электромагнитного излучения, метеорных тел, в том числе космического мусора и др.). Результатом подобных воздействий является ухудшение качества функционирования отдельных бортовых систем КА и КА в целом. Тенденция увеличения сроков активного существования современных КА обуславливает важность учета указанных факторов при проектировании перспективных КА.

В настоящее время существует большое количество моделей и программных комплексов, позволяющих оценить техническое состояние КА, функционирующих в условиях воздействия ФКП. Они предназначены как для моделирования деградации свойств отдельных элементов КА, так и для комплексного моделирования функционирования бортовых систем и КА в целом в условиях воздействия факторов космического пространства.

Однако большинство из них ориентированы на использование аналитических зависимостей, требующих задания точных значений величин большого количества исходных данных. Для учета вероятностного характера некоторых данных широко используется имитационное моделирование, в основу которого заложен численный метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Подобный подход описан в [1, 2] и реализован в программном комплексе «Моделирование функционирования космического аппарата в условиях внешних воздействий» [3], который позволяет оценивать вероятность сохранения работоспособного состояния КА при наличии апробированных математических моделей деградации характеристик элементов КА вследствие воздействия конкретных ФКП. В настоящее время наиболее полно проработаны модели воздействия микрометеорных тел и космического мусора на КА.

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию научно-методического аппарата оценивания результатов воздействия дестабилизирующих факторов на КА и направлена на учет неопределенностей, возникающих при функционировании КА в условиях воздействия ФКП.

## СИНТЕЗ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В целом программный комплекс моделирования функционирования КА в условиях воздействия ФКП состоит из трех модулей. Место предлагаемого модуля (модуль 3) в общей структуре комплекса представлено на рис. 1.



Рис. 1. Структурно-логическая схема программного моделирующего комплекса

Первый модуль реализован в виде программы для ЭВМ, которая предназначена для оценивания работоспособности КА и его элементов, функционирующих в условиях воздействия ФКП, и может применяться для прогнозирования состояния КА с большим сроком активного функционирования, а также обоснования средств защиты КА от воздействий. Подробнее модель, реализованная в первом модуле, рассмотрена в [1, 2].

Второй модуль программного комплекса позволяет обрабатывать данные первого модуля и строить индикатрисы стойкости любого КА к воздействию ФКП на любом участке орбиты, то есть рассматривается топологический аспект стойкости КА, под которым понимается свойство КА, характеризующее его восприимчивость к воздействию направленных ФКП с различных ракурсов. Результаты работы второго модуля могут быть применены для обоснования решений при разработке и применении космических средств, в частности, позволяют судить о рациональности компоновки внешних элементов КА с точки зрения его защищенности с различных ракурсов.

Основной сложностью при оценивании результатов воздействия является наличие множества неопределенностей, связанных прежде всего с ограниченностью сведений о возможных ситуациях воздействия ФКП и об их характеристиках, с недостаточной изученностью механизмов воздействия и т. п. С учетом указанных особенностей разработан третий модуль программного комплекса, позволяющий строить искусственные нейронные сети (ИНС) для оценивания результатов воздействия ФКП на КА в условиях недостатка информации об объекте воздействия, что обуславливается:

- возможностью получения прогноза при неполных исходных данных;
- возможностью анализа доли вклада каждого входного параметра в результаты воздействия и сокращения номенклатуры требуемых входных переменных для расчетов характеристик без потери существенных данных;
- устойчивостью при работе с зашумленными и недостоверными данными;

- возможностью адаптации к новым условиям путем дообучения;
- способностью эффективно обрабатывать данные большой размерности, разнотипные данные.

Под техническим состоянием КА понимается совокупность подверженных изменению в процессе эксплуатации его свойств, характеризуемая в определенный момент времени признаками, установленными технической документацией на него [6]. При этом видами технического состояния являются работоспособное или неработоспособное. Под оцениванием технического состояния подразумевается оценка вероятности нахождения КА в одном из указанных видов состояния, то есть определение вероятности перехода КА в неработоспособное состояние  $P_{\text{нрс}}$  или, аналогично, вероятности сохранения работоспособного состояния  $P_{\text{рс}}$ , которые связаны соотношением  $P_{\text{рс}}=1- P_{\text{нрс}}$ . На вероятность перехода КА из одного состояния в другое влияет ряд его свойств, основным из которых в рамках рассматриваемого вопроса является стойкость.

В случае оценивания стойкости КА к воздействию ФКП задача сводится к идентификации и обработке входных сигналов с последующим прогнозированием технического состояния. Задача прогнозирования может быть решена с помощью следующих типов нейронных сетей: многослойных перцептронов (МП), радиально-базисных сетей (РБС), обобщенно-регрессионных сетей (ОРГС), сетей Вольтерри и сетей Эльмана [7]. Выбор конкретного типа ИНС зависит от особенностей моделируемого процесса, вычислительных и временных ресурсов и в общем случае может быть решен простым перебором сетей различных типов и топологий с последующим определением нейросетевой модели, показавшей наилучший результат. Независимо от выбранного типа ИНС общая схема их формирования показана на рис. 2.



Рис. 2. Общая схема формирования нейросетевой модели

Предлагается алгоритм оценивания технического состояния КА на основе ИНС для аппроксимации функции нескольких переменных по заданному набору данных. Общая схема решения задачи при помощи нейросети представлена на рис. 3.

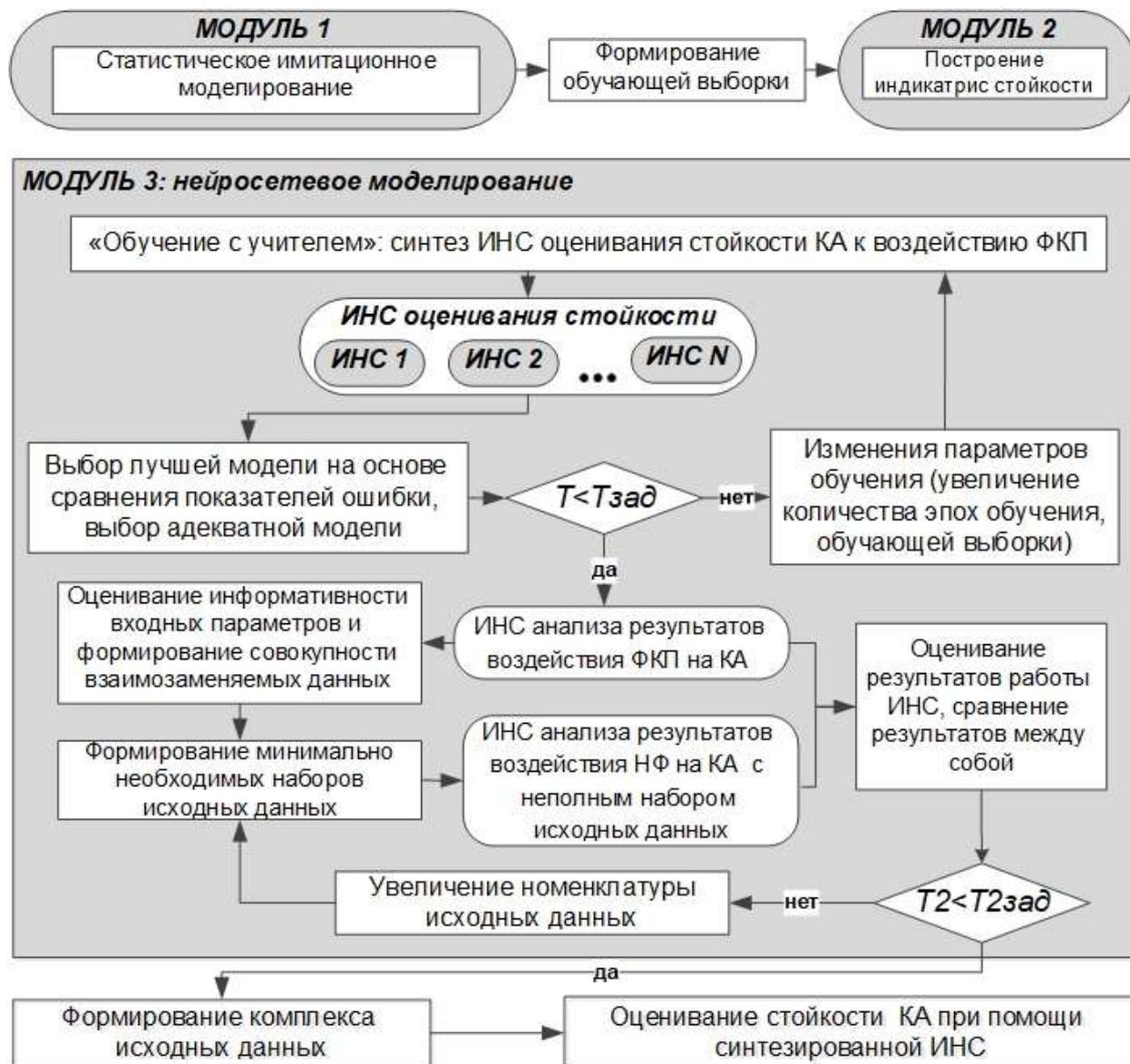


Рис. 3. Структурно-логическая схема синтеза нейросетевой модели

Процедура трансформации аналитической модели в нейросетевую реализуется следующим образом:

1. Формируется обучающая выборка:

- задается объект оценивания. Проводятся расчеты по исходной математической модели на основе метода статистического имитационного моделирования;
- по результатам численного эксперимента для построения аппроксимационной модели формируется база данных наблюдений (табл. 1).

Для формирования базы данных наблюдений варьируемыми параметрами являются элементы трех множеств: множества характеристик субъекта воздействия, параметров механизма воздействия и технических характеристик КА. Интервалы варьирования параметров выбираются исходя из физического значения характеристик и практически достижимого значения.

Таблица 1

## Вид базы данных наблюдений

№ п/п	Переменные				
	Независимые				Зависимые
	$X_1$	$X_2$	...	$X_N$	
1	$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{1N}$	$Y_1$
2	$X_{21}$	$X_{22}$	...	$X_{2N}$	$Y_2$
...	...	...	...	...	...
$m$	$X_{M1}$	$X_{M2}$	...	$X_{MN}$	$Y_m$

Адекватность модели и ее способность к прогнозированию определяются по значениям ошибок обучения, контрольной и тестовой. Качество работы сети оценивается отношением стандартного отклонения ошибки к стандартному отклонению данных. Это отношение для данного типа сетей должно быть не выше 0,4 [70].

2. На основе базы данных наблюдений формируется ИНС. На этом этапе выбираются архитектура сети и структура связей между нейронами. Тип сети и вариант архитектуры предлагается выбирать на конкурсной основе путем перебора множества вариантов возможных архитектур.

3. В ходе верификации прогноза анализируются показатели качества работы сформированной на предыдущем этапе ИНС и осуществляется проверка адекватности модели и обоснованности прогноза. Под адекватностью модели понимается степень соответствия результатов, полученных по разработанным моделям, данным эксперимента или тестовой задачи. Поскольку экспериментальные данные по результатам воздействия ФКП на КА получить затруднительно, адекватность полученной модели оценивается в основном по тестовой задаче, то есть качество работы сети проверяется на контрольной выборке значений из базы данных, которые не участвовали в обучении. Делается вывод об адекватности и точности нейросетевой модели.

Наиболее важным показателем является отношение стандартных отклонений, представляющее собой отношение стандартного отклонения ошибки прогноза к стандартному отклонению данных из обучающей выборки. В случае недостаточного качества работы сети увеличивается количество наблюдений в базе данных, проверяется условие репрезентативности выборки, корректируются интервалы варьирования.

4. На основе созданной и обученной сети проводится анализ информативности входных параметров, после чего делается вывод об относительной важности входных переменных для конкретной нейронной сети и удаляются входы с низкой чувствительностью к входным переменным.

5. Сравниваются результаты работы ИНС для полного перечня исходных данных и сокращенного, делается вывод о величинах погрешностей.

Поскольку в качестве выхода моделируемая НС должна выдавать число (вероятность сохранения работоспособного состояния), то наиболее простой и самой распространенной оценкой точности является квадрат разности выданного сетью выходного сигнала и требуемого значения из контрольной (тестовой) выборки:

$$H = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S (Y_i^P(\bar{x}_i) - Y_i^*(\bar{x}_i))^2, \quad (1)$$

где  $Y_i^P(\bar{x}_i)$  – значение выходного сигнала ИНС на  $i$ -м опыте;

$Y_i^*(\bar{x}_i)$  – требуемое значение выходного сигнала на  $i$ -м опыте;

$S$  – число примеров;

$H$  – оценка качества работы ИНС.

При составлении базы данных величина  $Y^*$ , являющаяся выходом проектируемой сети, оценивалась с точностью  $\varepsilon_\beta$ . В данном случае нецелесообразно требовать от сети в качестве ответа выдавать точное значение  $Y^*$ . Необходимо, чтобы выданный сетью ответ был в интервале  $(Y^* - \varepsilon_\beta, Y^* + \varepsilon_\beta)$ . Тогда оценка качества ИНС, удовлетворяющая этому требованию, будет иметь вид:

$$H = \begin{cases} 0 & \text{при } |Y^P - Y^*| \leq \varepsilon_\beta, \\ (|Y^P - Y^*| - \varepsilon_\beta)^2 & \text{при } |Y^P - Y^*| > \varepsilon_\beta. \end{cases} \quad (2)$$

Полученная ИНС является основой для оценивания технического состояния КА в условиях недостатка информации об объекте воздействия.

Моделируемая зависимость является сложной и многомерной, поэтому целесообразно использовать иерархическую систему оценивания технического состояния КА, формируя ИНС для каждой бортовой системы (рис. 4).

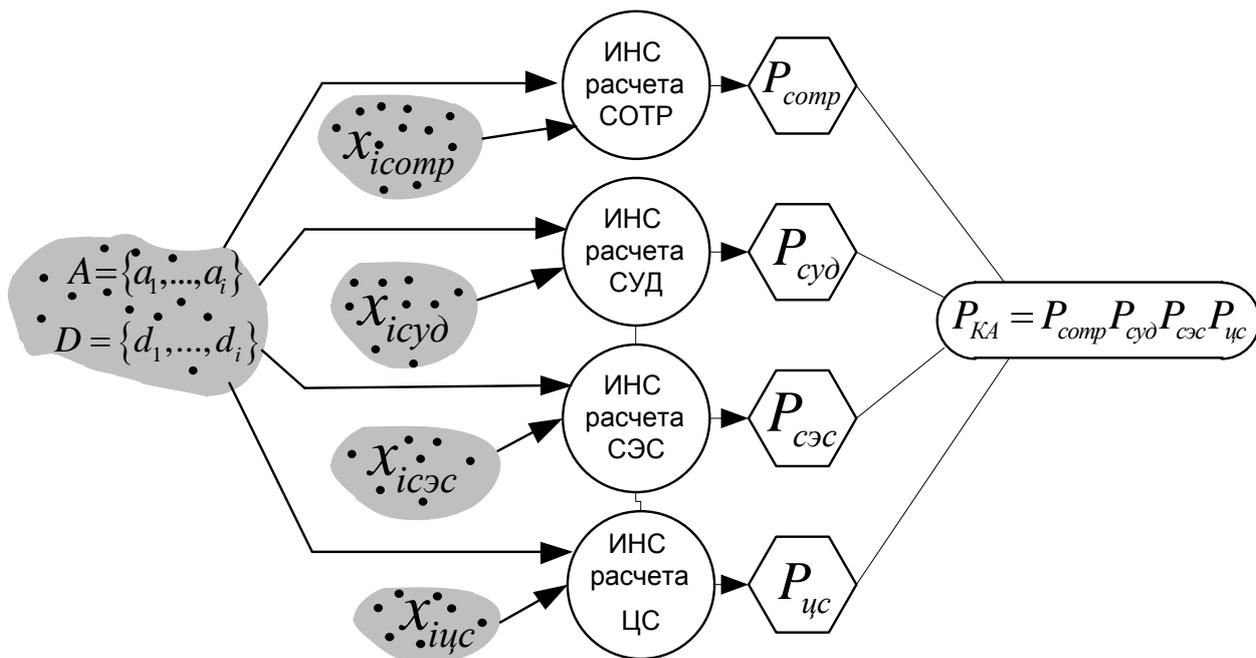


Рис. 4. Иерархическая структура системы оценивания технического состояния КА

Иерархическая система позволяет преодолеть «проклятие размерности». Преимущество ее и в том, что она позволяет меньшим количеством нейронов и связей между ними адекватно описать многомерные зависимости «входы – выход».

## ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве примера для реализации предложенной методики рассмотрено воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения (микрометеороидов,

фрагментов космического мусора и т. п.) на систему электроснабжения (СЭС) КА, что обусловлено значительным влиянием потоков малых метеорных тел (ММТ) дисперсностью 1–100 мкм на работу СЭС.

Необходимым условием работоспособности СЭС любого КА в течение длительного времени является превышение суммарного количества электроэнергии, генерируемой СФЭУ, над энергией, потребляемой бортовой аппаратурой КА.

С учетом методического аппарата, предложенного в [3], для оценивания снижения работоспособности СЭС воспользуемся коэффициентом снижения мощности солнечных батарей (СБ):

$$k_{сб} = \frac{N_{сб}^n}{N_{сб}^0},$$

где  $N_{сб}^n$ ,  $N_{сб}^0$  – мощность неповрежденной СБ и мощность СБ после воздействия ММТ.

В соответствии с предложенным алгоритмом поэтапно рассмотрим оценивание технического состояния КА, функционирующего в условиях воздействия ММТ.

**Формирование комплекса исходных данных.** Все параметры, используемые для описания воздействия на КА, при анализе их влияния на результаты функционирования аппарата в соответствии с предложенной методологией разделим на три группы.

К первой группе отнесены  $f_{ММТ}$  – флюенс – плотность потока ММТ, характеризуемая количеством частиц, падающих на единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению движения потока ММТ;  $d_0$  – диаметр ММТ;  $\rho_0$  – плотность материала частиц.

Вторую группу параметров составляют параметры, определяющие механизм воздействия:

–  $V_{ММТ}$  – величина относительной скорости;

–  $\alpha_{ММО}$ ,  $\delta_{ММТ}$  – углы восхождения и склонения вектора относительной скорости в орбитальной системе координат (ОСК) соответственно, характеризующие ракурс воздействия МДЧ;

– характеристики положения КА в пространстве (параметры орбиты) – долгота восходящего узла  $\Omega$ , наклонение орбиты  $i$ , большая полуось  $a$ , относительный эксцентриситет  $e$ , аргумент широты перигей  $\omega$ .

Третью группу составляют характеристики объекта воздействия – СЭС КА:

– характеристики солнечных батарей (мощность неповрежденной СБ  $N_{сб}$  и толщина защитного покрытия  $T_{зщ}$ );

– коэффициенты удара для фотоэлектрических преобразователей и защитного покрытия  $k_{зп}$ ,  $k_{фп}$ , коэффициент формы дефекта  $k_{фд}$ , эмпирический коэффициент затенения  $k_{зат}$ );

– сведения о графике электропотребления;

– средняя (средневитковая) потребляемая мощность КА  $N_{ср}$ .

В качестве примера рассмотрен типовой КА ДЗЗ, числовые характеристики которого представлены интервалами. Следует заметить, что свойства рассматриваемого КА могут быть описаны в виде как номинальных, так и числовых данных. Анализ конструктивно-компоновочных схем, проектных решений и физических принципов функционирования КА позволяет обосновать допустимый интервал изменения всех входных параметров для формирования базы данных обучающей выборки.

Проектируемая ИНС имеет 19 входов и один выход – вероятность сохранения работоспособного состояния системы электроснабжения  $P_{сэс}$ , принимающий значение в интервале  $[0,1]$ .

Комплекс исходных данных, необходимых для оценивания технического состояния КА, функционирующего в условиях воздействия, представлен в табл. 2.

Таблица 2

## Информационная модель КА

№ п/п	Характеристика КА	Тип переменной (номинальная/числовая)	Значение
1	Тип энергосистемы	н	На основе СБ и АБ
2	Мощность неповрежденной СБ, Вт	ч	3200-3600
3	Материал ЗП	н	Закаленное стекло
4	Толщина защитного покрытия, мкм	ч	0,2-0,6
5	Коэффициенты удара для ФЭП, м <sup>3</sup> /Дж	ч	(2-3,5) 10 <sup>-11</sup>
6	Коэффициент удара для ЗП м <sup>3</sup> /Дж	ч	(4-6) 10 <sup>-11</sup>
7	Коэффициент формы дефекта ЗП	ч	0,09-0,15
8	Коэффициент формы дефекта ФП	ч	0,15-0,21
9	Эмпирический коэффициент затенения ЗП	ч	5,5-6,5
10	Эмпирический коэффициент затенения ФП	ч	4,5-5,5
11	Эмпирический коэффициент пропорциональности	ч	3-8
12	Средняя (средневитковая) потребляемая мощность, Вт	ч	2000 – 3000
13	Тип ФЭП	н	Арсенид-галлиевые
14	Площадь СБ, м <sup>2</sup>	ч	27-36
15	Тип ориентации СБ и КА	н	Трехосная ориентация
16	Параметры орбиты	ч	$i=97,884^\circ$ , $e=0,0544895$ , $\omega=131,386^\circ$ , $a=6871$ км, $\Omega=267,615^\circ$
17	Тип АБ	н	Никель-водородные
18	Емкость АБ	ч	80-100 Ah
19	Количество АБ	ч	6

**Статистическое имитационное моделирование КА, функционирующего в условиях воздействия ФКП, и формирование обучающей выборки.** Для реализации этапа формирования базы данных использовалась разработанная программа для ЭВМ [3], что позволило автоматизировать процесс формирования выборки большого количества наблюдений. Набор данных (рис. 5) предварительно верифицировался с целью корректировки методических и случайных погрешностей.

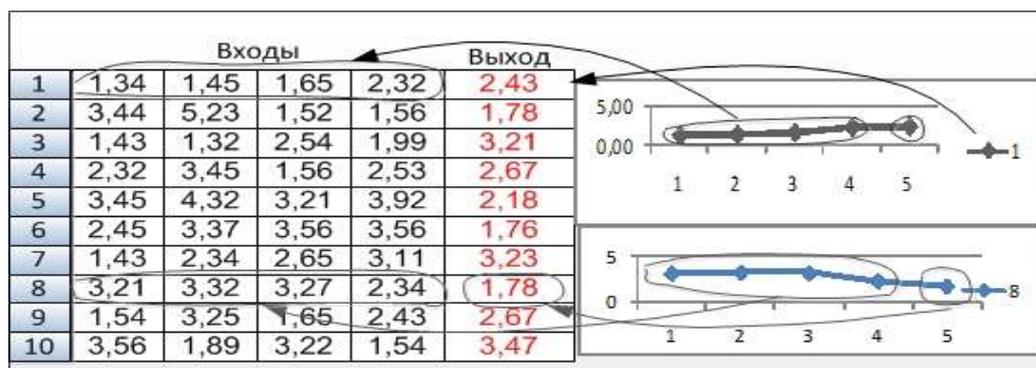


Рис. 5. Фрагмент обучающей выборки с предварительной верификацией данных

**Синтез ИНС.** Для обучения ИНС все данные разбивались на три множества – обучающее, контрольное и тестовое. На обучающем множестве производилось непосредственное обучение сети, т. е. изменялись значения весовых коэффициентов нейронов пропорционально ошибке на выходе. В использовавшемся алгоритме формирования ИНС конкретного типа отслеживался эффект «переобучения» и при завершении обучения сеть возвращалась в наилучшее состояние. Тестовое множество не участвовало в обучении. Оно использовалось для расчета производительности полученной сети и ее ошибки на данных, которые не участвовали в обучении и контроле результатов.

На основе сформированной обучающей выборки ( $10^6$  наблюдений) синтезированы ИНС оценивания технического состояния системы электроснабжения (рис. 3). Тестировалось несколько типов ИНС различной топологии. Лучший результат (табл. 3) показала ИНС на основе МП.

Таблица 3

### Результаты работы ИНС различных топологий

№ п/п	Тип ИНС	Архитектура (входы: слой1-слой2-слой3: выход)	Методы обучения (метод/количество эпох)	Ошибка			Отношение стандартных отклонений		
				обучения	контрольная	тестовая	обучения	контрольное	тестовое
1	Многослойный персептрон	11:11-9-1:1	ОР100, СГ20, СГ85	0,144	0,149	0,151	0,333	0,337	0,345
2	Многослойный персептрон	19:19-19-8-1:1	ОР100, СГ20, СГ85	0,066	0,065	0,065	0,071	0,071	0,070
3	Многослойный персептрон	9:9-9-1:1	ОР100, СГ20, СГ85	0,156	0,162	0,161	0,360	0,367	0,366
4	Многослойный персептрон	11:11-10-9-1:1	ОР100, СГ20, СГ85	0,102	0,103	0,104	0,235	0,235	0,231
5	Линейная	15:15-1:1	ЛО	0,305	0,305	0,310	0,611	0,608	0,705
6	Линейная	14:14-1:1	ЛО	0,320	0,322	0,326	0,713	0,705	0,718
7	Радиально-базисные функции	14:14-134-1:1	ПВ, КБ, ЛО	0,670	0,672	0,688	0,289	0,287	0,296
8	Радиально-базисные функции	14:14-67-1:1	ПВ, КБ, ЛО	0,789	0,795	0,797	0,372	0,383	0,369
9	Обобщенно-регрессионная ИС	15:15-2203-2-1:1	ПВ	0,833	0,843	0,847	0,909	0,912	0,914
10	Обобщенно-регрессионная ИС	15:15-2203-2-1:1	ПВ	0,901	0,922	0,912	0,921	0,934	0,936

Использовались следующие методы обучения: ОР – метод обратного распространения ошибки; СГ – метод сопряженных градиентов; ЛО – линейная оптимизация методом наименьших квадратов; ПВ – метод выборки; КБ – метод  $k$ -ближайших соседей.

Сети радиального базиса, основанные на разбиении признакового пространства гиперсферами, показали неудовлетворительный результат, что объясняется необходимостью предварительной кластеризации данных и неспособностью сетей такого типа эффективно решать задачи экстраполяции. Линейные сети, имеющие два слоя – входной и выходной, также по-

казали свою неэффективность, что объясняется сложностью и нелинейностью поставленной задачи аппроксимации многомерных данных. Лучший результат показала модель на основе многослойного персептрона (МП 19:19-19-8-1:1). Синтезированная сеть имеет два скрытых слоя. Тестирование модели проходило на данных, представленных в выборке, но не использовавшихся в обучении. Отклонение прогнозируемых значений от фактических в среднем составило не более 0,1 %. Архитектура ИНС представлена на рис. 6.

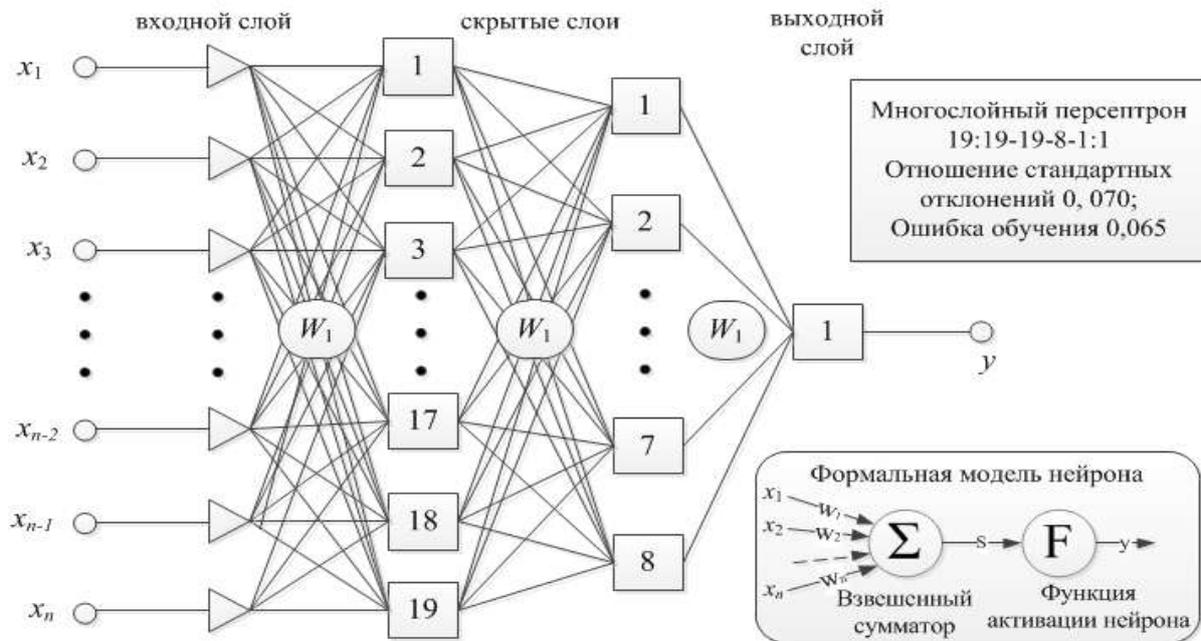


Рис. 6. Структура ИНС оценивания технического состояния на основе трехслойного персептрона

МП представляет собой сеть из входного слоя, двух скрытых слоев и выходного слоя, состоящих из формальных нейронов МакКаллока и Питтса. Входной слой распределяет вектор исходных данных  $X_i$  на следующий скрытый слой, не производя при этом никаких преобразований. Работа многослойного персептрона в скрытых и выходном слое описывается формулами:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i - T; Y = F(S),$$

где  $S$  – взвешенная сумма входных сигналов;

$x_1, \dots, x_n$  – сигналы, поступающие на входы нейрона;

$w_1, \dots, w_n$  – веса синапсов;

$T$  – порог нейрона;

$F(S)$  – функция активации нейрона, преобразующая взвешенную сумму в выходной сигнал  $y$ .

В качестве функции активации использовалась сигмоидная функция:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-kx}},$$

где  $k$  – параметр наклона сигмоидной функции активации.

Выбор сигмоидной функции обусловлен ее монотонностью и дифференцируемостью на всей оси абсцисс и способностью усиливать слабые сигналы.

Общее выражение, математически формализующее работу выбранной ИНС оценивания технического состояния КА, можно представить в виде

$$y = F \left( \sum_{i_1=1}^{N_1} w_{i_3 j_3} F \left( \sum_{i_2=2}^{N_2} w_{i_2 j_2} F \left( \sum_{i_3=3}^{N_3} w_{i_1 j_1} - T_{j_1} \right) - T_{j_2} \right) - T_{j_3} \right).$$

Сеть обучалась широко распространенным для МП алгоритмом обучения «с учителем» – методом обратного распространения ошибки, т. е. нейросеть обучалась воспроизводить зависимость, заданную из  $N$  пар обучающих сигналов  $\langle \vec{x}_n, y_n \rangle$ ,  $n=1, 2, \dots, N$  с минимизацией суммарной квадратичной ошибки

$$E = \sum_{n=1}^N (y_n - \mathcal{G}_n)^2,$$

где  $\mathcal{G}_n$  – выход сети при поступлении на вход вектора  $\vec{x}_n$ .

С целью определения относительной важности входных переменных для синтезированной ИНС проведен анализ ее чувствительности (рис. 7), что позволило уменьшить количество требуемых исходных данных для оценивания технического состояния СЭС без значительной потери точности модели. Анализ показывает, что наибольшее влияние на показатель технического состояния оказывают характеристики воздействия – относительная скорость  $V_{\text{ММТ}}$  и флюенс  $f_{\text{ММТ}}$  потока ММТ, углы воздействия  $\alpha_{\text{ММТ}}$ ,  $\delta_{\text{ММТ}}$  и ключевые характеристики объекта воздействия – мощность неповрежденной СБ  $N_{\text{сб}}$  и средняя потребляемая мощность  $N_{\text{ср}}$ , отношение между которыми  $N_{\text{сб}}/N_{\text{ср}}$  определяет «запас по мощности».

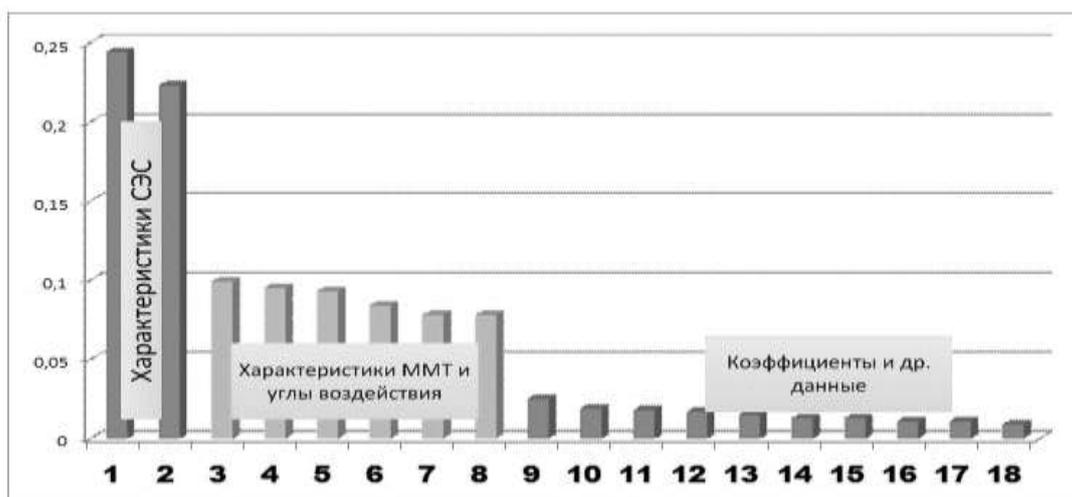


Рис. 7. Диаграмма относительной важности входных переменных нейросетевой модели оценивания технического состояния СЭС КА

Сравнение результатов, полученных с использованием метода СИМ и нейросетевых моделей различных топологий, приведено в табл. 4. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- ошибка прогнозирования нейросетевой модели несколько превышает ошибку метода СИМ и составляет до 3 %;

- при сокращении мощности множества исходных данных практически в два раза (с 19 до 10 входов) ошибка ИНС увеличивается незначительно (приблизительно на 4 %), что позволяет обоснованно рекомендовать использование ИНС оценивания технического состояния КА с уменьшенным числом входов, которая имеет несколько меньшую точность расчета показателя технического состояния по сравнению с методом СИМ, однако позволяет использовать ограниченную номенклатуру исходных данных.

Таблица 4

**Результаты тестов модели метода СИМ и нейросетевых моделей  
с различным числом входов**

Уровень воздействующего фактора	Метод СИМ		Нейросетевая модель				
	Прогнозиру- емое значение показателя стойкости	Точность метода СИМ при дове- рительной веро- ятности 0,95)	19:19-19- 8-1:1	18:18-19- 8-1:1	16:16-19- 8-1:1	14:14- 19-8-1:1	10:14- 19-8- 1:1
			Отклонение				
$f_{\text{мдо}}=0,002 \text{ кг/м}^2$ , $d_0=75 \text{ мкм}$ , $\sigma_0=12000 \text{ кг/м}^3$ , $V_{\text{ММТ}}=13 \text{ м/с}$	0,897	$\pm 0,01$	$\pm 0,025$	$\pm 0,027$	$\pm 0,031$	$\pm 0,035$	$\pm 0,062$
$f_{\text{мдо}}=0,002 \text{ кг/м}^2$ , $d_0=84 \text{ мкм}$ , $\sigma_0=12000 \text{ кг/м}^3$ , $V_{\text{ММТ}}=9,8 \text{ м/с}$	0,550	$\pm 0,02$	$\pm 0,017$	$\pm 0,019$	$\pm 0,021$	$\pm 0,029$	$\pm 0,038$
$f_{\text{мдо}}=0,002 \text{ кг/м}^2$ , $d_0=84 \text{ мкм}$ , $\sigma_0=12000 \text{ кг/м}^3$ , $V_{\text{ММТ}}=7,1 \text{ м/с}$	0,125	$\pm 0,01$	$\pm 0,004$	$\pm 0,005$	$\pm 0,005$	$\pm 0,006$	$\pm 0,008$

В итоге проведенный анализ доказывает несколько меньшую точность результатов, полученных с помощью ИНС, по сравнению с результатами метода СИМ, однако существенный выигрыш нейросетевой модели при неполных, зашумленных исходных данных, при анализе значимости вклада каждого входного параметра и формировании сокращенной номенклатуры исходных данных, необходимых для оценивания результатов воздействия ФКП на КА.

Разработанная нейросетевая модель позволяет построить закон изменения технического состояния КА (рис. 8) в зависимости от приведенной интенсивности воздействующего фактора (удельной энергии). Для удобства восприятия на рисунках представлен закон изменения вероятности выхода КА из строя (обратного показателя к вероятности сохранения работоспособного состояния  $P_{\text{вых}}=1-P_{\text{СЭС}}$ ).

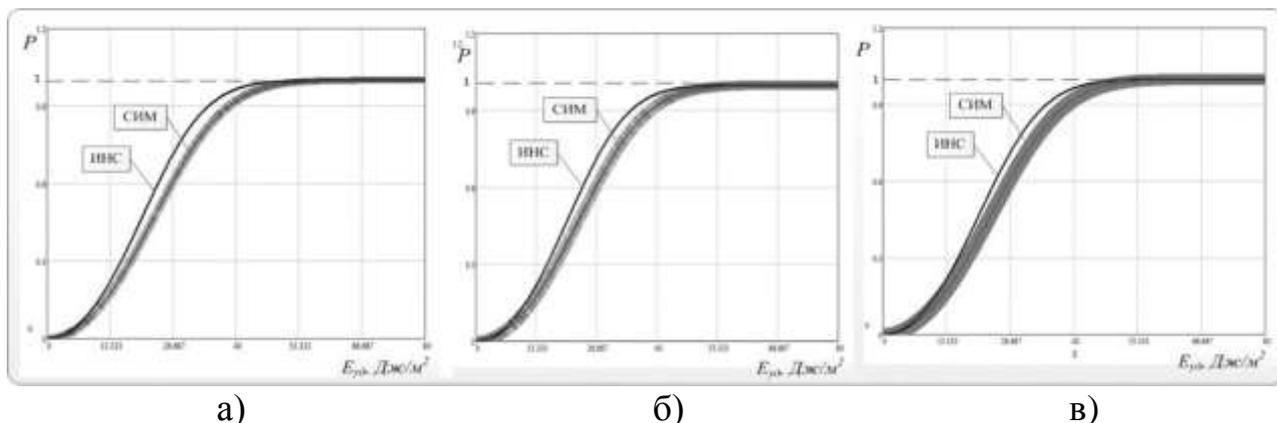


Рис. 8. Изменение технического состояния СЭС КА, рассчитанное с использованием ИНС при различном количестве входов  $N$ :  
а –  $N=19$ , б –  $N=16$ ; в –  $N=10$

Видно, что при значительном сокращении мощности множества исходных данных (в два раза) ошибка прогноза возрастает, но незначительно (с 2 до 9%). С учетом неопределенности

отброшенных исходных данных рационально для прогноза технического состояния КА использовать ИНС с сокращенным числом входов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что для оценивания технического состояния КА, функционирующего в условиях воздействия ФКП, рекомендуется использовать методику с применением нейросетевой модели с уменьшенным числом входов, которая имеет несколько меньшую точность расчета по сравнению с методом СИМ, однако позволяет использовать ограниченную номенклатуру исходных данных. Уменьшение мощности множества исходных данных необходимо проводить с учетом анализа чувствительности синтезированной ИНС, что позволяет сделать вывод об относительной важности входных переменных и уменьшить количество требуемых исходных данных для оценивания технического состояния КА без значительной потери точности модели.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке тактико-технических требований к КА в части требований по стойкости к воздействию ФКП. Кроме того, синтезированная нейросетевая модель может использоваться как элемент автономной интеллектуальной системы управления КА.

## Список используемых источников

1. *Абдурахимов А.А., Скворцов Д.В.* Методологические основы обеспечения живучести космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 640. – С. 7–19.
2. *Абдурахимов А.А., Скворцов Д.В.* Применение метода статистического имитационного моделирования для исследования функционирования космических аппаратов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Сборник трудов XXX научно-технической конференции космодрома Плесецк. – 2013. – С. 18–23.
3. Программное обеспечение моделирования функционирования космического аппарата в условиях внешнего воздействия: программа для ЭВМ / А.А. Абдурахимов, Д.В. Скворцов, М.М. Полуян. – № 2012616839, зарегистрировано в ФИПС 01.08.12.
4. *Скворцов Д.В., Краснощеков С.Н., Вилисов Д.В.* Программный комплекс имитационного моделирования орбитальных группировок космических аппаратов нано класса // Сборник алгоритмов и программ прикладных задач.– СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. 34. – С. 13–21.
5. *Скворцов Д.В., Краснощеков С.Н., Осипова И.В.* Исследование возможности аэродинамического управления структурой группировки сверхмалых космических аппаратов // Информатика и космос. – 2018. – № 3. – С. 147–156.
6. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2001. – 36 с.
7. Нейронные сети Statistica neural Networks: справочное издание / под ред. В.П. Боровикова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 392 с.

Я.А. Скороходов,  
кандидат техн. наук

## **МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

В работе представлен модельно-алгоритмический комплекс оценивания показателей качества функционирования космических систем автоматической идентификации и определения местоположения воздушных и морских судов (далее именуемых подвижными объектами) на основе приема сигналов бортовых радиотехнических средств, предназначенных для повышения безопасности движения и предупреждения столкновений маневрирующих объектов в воздушном и надводном пространстве. Разработанные алгоритмы апробированы на реальных экспериментальных данных, в частности, Автоматической идентификационной системы, и могут использоваться для обоснования требований при проектировании опытных образцов космической техники.

Ключевые слова: автоматическая идентификационная система, автоматическое зависимое наблюдение – вещание, AIS, ADS-B, имитационное моделирование, орбитальная группировка, космические системы, обработка информации.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В течение последних десяти лет активно развиваются и внедряются в практику организации и управления движением воздушных и морских судов технологии и системы их автоматической идентификации и определения местоположения, предназначенные для повышения безопасности движения и предупреждения столкновений объектов в воздушном и надводном пространстве при совершении маневров и других условиях (например, недостаточной видимости). Система автоматического зависимого наблюдения – вещания (АЗН-В) и Автоматическая идентификационная система (АИС) являются примерами систем обеспечения безопасности движения воздушных и морских судов соответственно, техническая реализация которых отличается, но принцип работы является схожим и заключается в передаче всеми участниками движения в режиме широковещания (т. е. друг другу и центрам управления) сообщений, содержащих идентификационные данные, координаты местоположения и параметры состояния.

Системы автоматической идентификации обеспечивают экономию энергетических ресурсов, позволяя оптимизировать маршруты движения воздушных и морских судов в режиме реального времени, своевременное оповещение при возникновении нештатных и аварийных ситуаций, более эффективное осуществление логистических операций с учетом высокоточных прогнозов прибытия их в пункт назначения. Существующие интернет-сервисы, наиболее популярные из которых Flyradar24, ADS-B Exchange, MarineTraffic, VT Explorer и др. [10, 11, 12, 17], публикуют сведения о местоположении и маршрутах движения воздушных и морских судов (в большинстве случаев на платной основе), однако их использование в критически важных отраслях хозяйственной деятельности сопряжено с определенным риском, связанным с достоверностью, оперативностью и полнотой предоставляемой информации.

Развитие микроэлектроники способствовало широкому внедрению многоспутниковых систем малых и сверхмалых космических аппаратов (КА), в том числе с полезной нагрузкой, обеспечивающей прием, обработку и ретрансляцию сигналов системы АЗН-В и АИС, предназначенных для определения местоположения и сбора сведений о маршрутах движения воздушных и морских судов в удаленных регионах, недоступных для наблюдения наземными пунктами сбора и обработки информации [2, 9, 7, 16, 18]. Учитывая относительно недоро-

гую стоимость изготовления и запуска наноспутников, достаточно широкий перечень стран имеют или планируют иметь группировку космических аппаратов с возможностью приема сигналов системы АЗН-В и/или АИС, обеспечивающую независимый информационный доступ к передаваемым в радиоэфир данным.

Систематизация сведений о составе и характеристиках космических систем автоматической идентификации подвижных объектов позволила сделать вывод о том, что наибольшей динамикой их развитие характеризуется в США, планирующих иметь в составе национальной группировки КА не менее 5 подобных систем, а также повышенный интерес, проявляют Германия, Дания, Китай, Испания, Канада, Норвегия, Индонезия и Япония [8, 14].

В России в 2014 г. был запущен КА «Ресурс-П» № 2, на борту которого в качестве дополнительной нагрузки установлен радиокомплекс, предназначенный для приема радиосигналов с морских судов и автоматической идентификации последних. В настоящее время КА «Ресурс-П» № 2 не выполняет задачи по предназначению и выведен из состава российской орбитальной группировки [14]. Полученные с его помощью экспериментальные данные подлежали детальному анализу.

Целью исследования является разработка имитационной модели функционирования космических систем идентификации и определения местоположения подвижных объектов, включающей математическое описание пространственного распределения и маршрутов движения источников радиоизлучений (ИРИ), протоколов передачи сообщений участниками движения, среды распространения сигналов анализируемых систем связи и орбитальных группировок космических аппаратов с возможностью их приема, а также алгоритма оценивания показателей их качества с учетом различных пространственных и энергетических факторов и условий распространения радиосигналов, реального размещения источников радиоизлучений, маршрутов и динамики их движения.

## МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Модель функционирования космической системы автоматической идентификации подвижных объектов включает частные модели, а именно, модель пространственного распределения ИРИ, модель распределения сигналов по времени (модель распределения числа излучений в единицу времени) и частоте, модель распределения ИРИ по мощности радиопередатчиков, модель среды распространения сигналов и модель орбитальной группировки КА. Взаимосвязь компонентов модели схематически изображена на рис. 1.

*Динамическая модель пространственного распределения ИРИ* представляет собой множество трасс  $T = \{ t \}$  движения ИРИ, где  $t = C \times T = \{ (c, t) : c \in C, t \in T \}$ ,  $C = \{ (b, l, h) : -90 \leq b \leq 90, -180 \leq l \leq 180, h \in \mathbb{R} \}$  – множество геодезических координат ИРИ,  $T = [t_0, t_0 + \tau]$ ,  $t_0$  – момент начала моделирования,  $\tau$  – интервал моделирования, т. е. трасса  $t \in T$  есть множество  $\{ c(t_k) \}$  координат, соотнесенных с моментом времени  $t_k \in [t_0, t_0 + \tau]$ ,  $\mathbb{R}$  – множество рациональных чисел. Трассы движения ИРИ определяются из анализа воздушного или морского трафика за определенный промежуток времени [5].

Частным случаем динамической модели распределения ИРИ является *статическая*, при этом  $\text{card}(t) = 1, t \in T$ . Статическая модель может быть также задана функцией распределения местоположений ИРИ в пространстве (как правило, используется двумерный равномерный закон распределения ИРИ на земной поверхности в области, ограниченной радиусом зоны обзора КА). При условии равномерного распределения ИРИ в зоне обзора КА можно сравнивать результаты имитационного моделирования и аналитических вычислений путем проверки гипотезы о незначимом отличии значений количества безошибочно принятых сообщений за анализируемый интервал наблюдения, полученных различными способами [1].

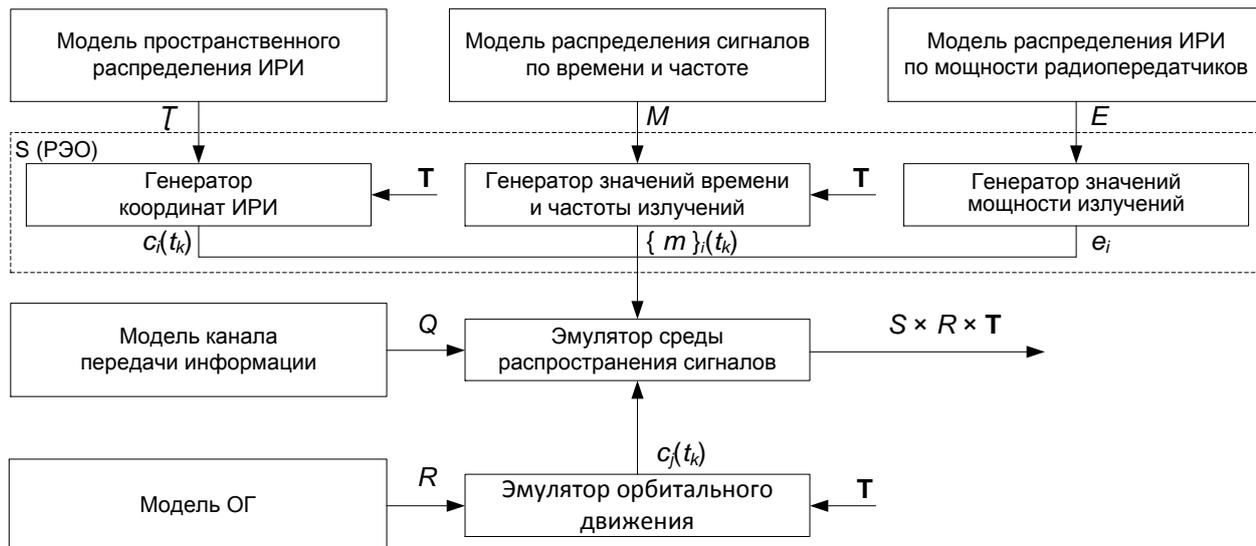


Рис. 1. Модель функционирования космической системы автоматической идентификации подвижных объектов

Достоинством статической модели распределения источников излучений является простота программной реализации, в то же время результаты моделирования для воздушных объектов, учитывая высокую скорость их перемещения, будут адекватными лишь на коротких интервалах времени [5].

Генератор местоположения реализует отображение  $\varphi$ :

$$\varphi : I \rightarrow T,$$

где  $I$  – индексное множество,  $I = \{1, \dots, N_S\}$ ;

$N_S$  – количество моделируемых ИРИ.

Генератор местоположения задает трассы  $T$  движения ИРИ в геодезической системе координат (СК). Отображение  $\varphi$  является инъекцией.

Например, распределение источников сигналов АИС для заданного момента времени (статический случай) изображено на рис. 2.

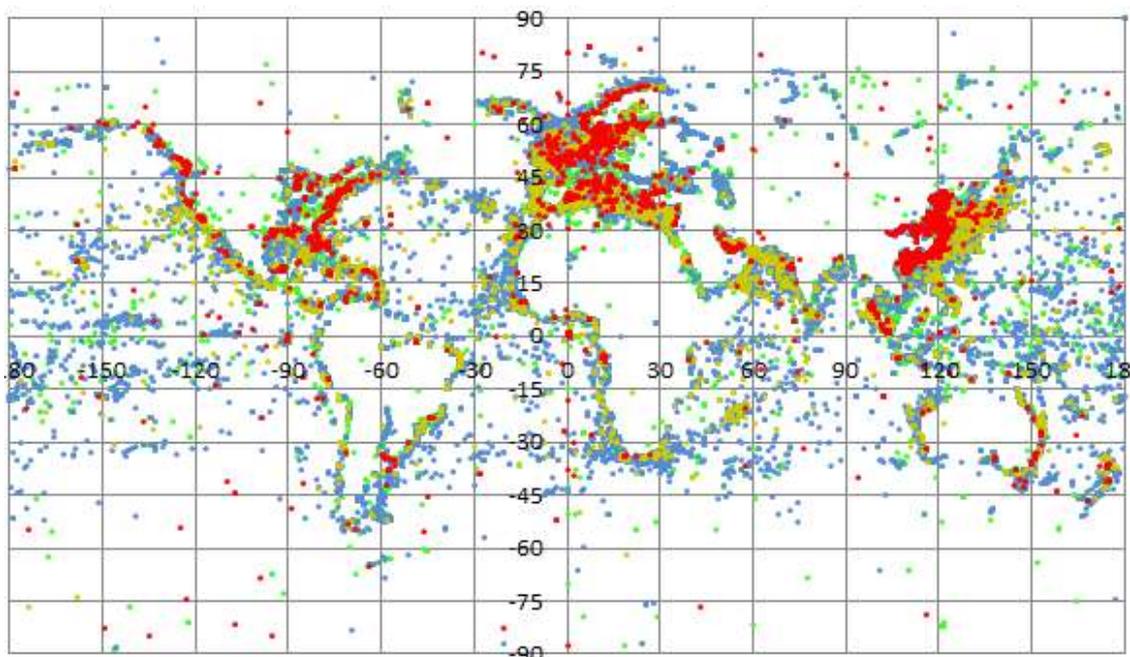


Рис. 2. Распределение источников сигналов АИС на земной поверхности

На рис. 2 использована следующая цветовая схема: красным цветом обозначены суда со скоростью передвижения  $v > 23$  уз.; желтым –  $v \in (14; 23]$  уз.; синим –  $v \in (3; 14]$  уз.; зеленым –  $v < 3$  уз. Распределение источников сигналов АИС, изображенное на рис. 2, позволяет получать адекватные результаты применения космической системы (КС) с учетом неоднородности распределения судов на земной поверхности и других факторов.

*Модель распределения сигналов по времени* (числа излучений в единицу времени) зависит от особенностей анализируемой системы автоматической идентификации. Так, для АИС распределение сигналов зависит от используемого алгоритма планирования задействования слотов для передачи сообщений (SOTDMA, ITDMA и др.) [6], для авиационных систем связи количество переданных сигналов типов MODE A/C, MODE S обусловлено количеством радиоэлектронных станций, в радиолокационном поле которых движется объект, количество сигналов типа АЗН-В фиксировано. ICAO (от англ. «International Civil Aviation Organization» – международная организация гражданской авиации) предложена статистическая модель распределения сигналов на частоте 1090 МГц, которая использовалась при моделировании функционирования систем авиационного наблюдения [7].

Генератор распределения сигналов реализует отображение  $\psi$ :

$$\psi : I \rightarrow M.$$

Здесь  $M$  – множество сигналов,  $M = \{ (t, d, f) : t \in T, d \in D, f \in F \}$ , где  $t$  – момент излучения сигнала,  $d$  – длительность сигнала,  $f$  – частота сигнала,  $D$  – множество значений длительности сигналов,  $F$  – множество значений частоты передачи сигналов. Множества  $D$  и  $F$  зависят от типа исследуемой системы. Множество  $D$  длительностей сигналов системы ADS-B составляют значения  $D_{\text{ADS}} = \{ 3,5 \text{ мкс}, 20,3 \text{ мкс}, 64 \text{ мкс}, 120 \text{ мкс} \}$ , длительностей сигналов АИС – значение  $D_{\text{AIS}} = \{ 26,7 \text{ мкс} \}$ . Сигналы системы ADS-B передаются на частоте 1090 МГц, т. е. множество  $F_{\text{ADS}} = \{ 1090 \text{ МГц} \}$ . Частота излучения сигналов АИС выбирается из множества  $F_{\text{AIS}} = \{ 161,975 \text{ МГц}, 162,025 \text{ МГц} \}$ , при этом каждый источник передает сигналы поочередно на одной из выделенных частот.

Генератор распределения сигналов АИС фактически повторяет один из алгоритмов планирования использования временных слотов для передачи сообщений – SOTDMA [6], использующийся в реальных условиях, в соответствии с которым для каждого элемента множества  $I = \{ 1, \dots, N_S \}$  в зависимости от динамических условий  $x$  движения судна (скорости и изменения курса) определяются частота передачи сообщений (количество сообщений в единицу времени), множество  $T_i = \{ t_1, \dots, t_{n_i} \}$ ,  $n_i = \text{card}(T_i)$ ,  $T_i \in T$ ,  $T = \{ 0, \dots, 2249 \}$  тайм-слотов, исходя из чего задается множество  $M$ . Динамические характеристики  $x$  движения судна могут определяться статистически по заданной функции распределения  $F(x)$ , где  $x$  принимает значения из конечного множества  $X = \{ 1, \dots, 8 \}$  [1] или на основе данных веб-скрепинга интернет ресурсов, предоставляющих соответствующие сведения [122, 17].

Генератор распределения сигналов авиационных систем связи представляет собой последовательность датчиков случайных чисел [7].

*Модель распределения ИРИ по мощности* может быть задана либо вероятностным распределением различных типов радиопередатчиков по множеству ИРИ, либо правилом, в соответствии с которым каждому ИРИ назначается тип радиопередатчика.

Генератор значений мощности излучений реализует отображение  $\alpha$ :

$$\alpha : I \rightarrow E,$$

где  $E$  – множество значений мощности радиопередатчиков, зависит от типа системы,  $E_{\text{ADS}} = \{ 21 \text{ дБВт}, 23 \text{ дБВт}, 25 \text{ дБВт}, 29 \text{ дБВт} \}$ ,  $E_{\text{AIS}} = \{ 2,5 \text{ Вт}, 12,5 \text{ Вт} \}$ .

Отображение  $\alpha$  является сюръекцией. Распределение различных типов радиопередатчиков по парку воздушных судов в мире приведено в работе [7], в этом случае мощность  $e_i$  ( $i = 1, \dots, N_S$ ) источников излучений сигналов определяется статистически по заданной функции распределения  $F(e)$ , где  $e$  – дискретная случайная величина, принимающая значения из

множества  $E$ . Класс оборудования АИС назначается исходя из типа морского судна и его габаритных характеристик в соответствии с рекомендациями международного союза электросвязи (МСЭ) [1, 6].

Таким образом, радиоэлектронная обстановка в полосе частот, предназначенной для передачи сообщений АИС или авиационных систем радиотехнического обеспечения, является подмножеством декартова произведения множеств  $I$ ,  $T$ ,  $M$  и  $E$ :

$$S \subset I \times T \times M \times E,$$

где  $S$  – множество источников излучений, каждый из которых характеризуется кортежем  $(i, \{t\}, \{m\}, e)$ ,  $i \in I$ ,  $t \in T$ ,  $m \in M$ ,  $e \in E$ .

Таким образом, каждому элементу множества  $S = \{s_i : i \in I\}$  соответствует множество  $\{t\}_i$  трасс движения, множество  $\{m\}_i$  сигналов, их мощность  $e_i$ .

*Модель ОГ* определяется множеством  $R \subset J \times C \times T = \{(\Omega, i, r_a, r_p, \omega, \theta, t) : 0 < \Omega < 360, 0 < i < 180, r_a, r_p \in \mathbb{R}, 0 < \omega < 360, 0 < \theta < 360, t \in \mathbb{R}\}$ , где  $J$  – индексное множество,  $J = \{1, \dots, N_R\}$ ,  $\Omega$  – долгота восходящего узла,  $i$  – наклонение орбиты,  $r_a$  – высота апогея,  $r_p$  – высота перигея,  $\omega$  – широта перицентра,  $\theta$  – истинная аномалия.

Структура ОГ описывается множеством  $c_{<N_R>}(t_0) = \{c_j(t_0) : j \in J\}$ , где  $c(t_0) = [\Omega, i, r_a, r_p, \omega, \theta(t_0)]$ ,  $N_R$  – количество моделируемых КА, входящих в состав ОГ.

Эмулятор орбитального движения вычисляет координаты  $c_j(t_k)$  для каждого КА  $r_j \in R$ , входящего в состав ОГ, для момента времени  $t_k$  по заданным начальным условиям (положению  $c_j(t_0)$  в момент  $t_0$  начала моделирования) [15]:

$$c_j(t_k) = f[c_j(t_0), t_k - t_0], j = 1, \dots, N_R.$$

*Модель канала передачи информации* является аналитической и определяет потери мощности сигналов анализируемых систем радиотехнического обеспечения исходя из взаимного расположения источников радиоизлучения и КА. Структура модели зависит от множества  $Q$  факторов, влияющих на ослабление мощности сигналов.

В эмуляторе среды распространения рассчитываются суммарные потери  $L_\Sigma$  мощности сигналов на входе РПУ с учетом потерь  $L_1(d, f)$  передачи в свободном пространстве, атмосферных потерь (потерь  $L_2(f, \beta)$  в газах атмосферы и потерь  $L_3(\beta, f, h_0, J)$  в гидрометеорах), поляризационных потерь (потерь  $L_4(\varphi)$  из-за расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, потерь  $L_5(\beta)$  из-за эффекта Фарадея), диаграмм направленности передающей и приемной антенн [3, 5]:

$$L_\Sigma = L_1(d, f) + L_2(f, \beta) + L_3(\beta, f, h_0, J) + L_4(\varphi) + L_5(\beta) + g_s(\beta) + g_r(\theta), \text{ [дБ]} \quad (1)$$

- где
- $d$  – расстояние между ИРИ и КА;
  - $f$  – частота излучения сигнала (161,975 или 162,025 МГц для АИС);
  - $\beta$  – угол места КА в топоцентрической системе координат, связанной с ИРИ;
  - $h_0$  – высота  $h_0$  изотермы  $0^\circ\text{C}$  над средним уровнем моря;
  - $J$  – интенсивность дождя;
  - $\varphi$  – угол между фокальными осями антенн ИРИ и КА;
  - $\theta$  – угол отклонения луча от оси главного лепестка спутниковой антенны;
  - $g_s$  – коэффициент направленного действия (КНД) передающей антенны;
  - $g_r$  – КНД приемной антенны.

Научная новизна разработанной модели заключается в том, что она представляет унифицированное формализованное описание систем автоматической идентификации воздушных и морских судов, принцип работы которых заключается в передаче всеми участниками движения в режиме широковещания (друг другу и центрам управления) сообщений, содержащих их идентификационные данные, местоположение и параметры состояния, в части пространственного распределения, маршрутов и динамики движения источников радиоизлучений,

протоколов передачи сообщений участниками движения, а также описание среды распространения сигналов анализируемых систем связи и орбитальных группировок космических аппаратов с возможностью их приема.

Разработанная модель может использоваться для оценивания показателей качества функционирования систем автоматической идентификации воздушных и морских судов [3, 5]. Математическая постановка задачи оценивания показателей качества функционирования космической системы автоматической идентификации и определения местоположения подвижных объектов описана ниже.

*Дано:* множество  $S$  ИРИ, образующих радиоэлектронную обстановку, множество  $R$  КА, составляющих орбитальную группировку, отображения  $\varphi, \psi, \alpha, \rho$ .

*Ограничения:* модель среды распространения сигналов представлена выражением (1).

*Найти:* вектор  $\mathbf{Y}$  показателей качества функционирования КС автоматической идентификации подвижных объектов, т. е. отображение  $\lambda$ :

$$\lambda : S \times R \times \mathbf{T} \xrightarrow{q} \mathbf{Y},$$

где  $S \subset I \times T \times M \times E \times F$ ;

$R \subset J \times C \times T$ ;

$\mathbf{T}$  – множество моментов времени,

$\mathbf{T} = \{ t_0, t_0 + 1, \dots, t_0 + \tau \}$ .

С учетом перечисленных исходных данных и ограничений разработан алгоритм оценивания показателей качества функционирования КС автоматической идентификации и определения местоположения подвижных объектов.

## АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Исходными данными для алгоритма являются:

- время  $t_0$  начала и интервал  $T$  моделирования;
- количество  $N_S$  моделируемых источников радиоизлучения (ИРИ);
- координаты  $c_i$  ( $i = 1, \dots, N_S$ ) ИРИ в геодезической системе координат (СК),  $c_i \in C = \{ (b, l, h) : -90 \leq b \leq 90, -180 \leq l \leq 180, h \in \mathbb{R}^+ \}$  (в случае статической модели распределения ИРИ) или множество трасс  $T_i = \{ t_{ij} : i = 1, \dots, N_S, j = 1, \dots, n_i \}$ ,  $n_i = \text{card}(T_i)$  движения ИРИ, где трасса  $f_{ij}$  – множество координат  $\{ c(t_k) \}$ , соотнесенных с моментом времени  $t_k \in [t_0, t_0 + T]$  (в случае динамической модели);
- распределение ИРИ по их динамическим характеристикам (скорости и курсу движения) – только для морских судов [1];
- распределение различных типов сигналов (MODE A/C, MODE S, MODE S ADS-B) по частоте (количество раз в секунду) передачи – только для воздушных судов [7];
- распределение ИРИ по мощности излучений, мощность сигналов радиопередатчиков для воздушных судов определяется типом судна (удовлетворяющих стандарту ИКАО или нет, с ADS-B или без) и выбирается из множества  $E = \{ 21 \text{ дБВт}, 24 \text{ дБВт}, 27 \text{ дБВт}, 29 \text{ дБВт} \}$  [7], для морских судов – классом судна (грузовое, пассажирское и др.) и массово-габаритными характеристиками в соответствии с рекомендациями МСЭ и выбирается из множества  $E = \{ 2,5 \text{ Вт}, 12,5 \text{ Вт} \}$  [1, 6];
- частота излучений, для АЗН-В множество частот состоит из одного элемента  $F = \{ 1090 \text{ МГц} \}$ , для АИС –  $F = \{ 161,975, 162,025 \text{ МГц} \}$ ;
- количество  $N_R$  КА, входящих в состав орбитальной группировки (ОГ);
- начальные значения оскулирующих элементов орбит  $c_j(t_0)$ ,  $c_j \in C = \{ (\Omega, i, r_a, r_n, \omega, \theta) : 0 < \Omega < 360, 0 < i < 180, r_a, r_n \in \mathbb{R}, 0 < \omega < 360, 0 < \theta < 360 \}$ ,  $j = 1, \dots, N_R$ ;

- максимальный КНД  $g_{max}$ , ширина  $\theta_{3дв}$  диаграммы направленности спутниковой антенны, направление максимального усиления антенны относительно оси;
- чувствительность  $q$  радиоприемного устройства (РПУ).

Алгоритм состоит из нескольких этапов. На предварительном этапе формируется множество ИРИ  $S \subset I \times T \times E \times F$ , где  $I = \{1, \dots, N_S\}$  – индексное множество, т. е. каждому из ИРИ  $s_i$  ( $i = 1, \dots, N_S$ ) в соответствии с заданными распределениями назначаются координаты  $c_i$  (трассы  $T_i$ ), мощность  $e_i$  и частота  $f_i$  излучений.

В процессе моделирования для каждого момента времени  $t_k \in [t_0, t_0 + T]$  выполняется следующая последовательность действий:

1) рассчитывается текущее положение КА  $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$ , входящих в состав ОГ, по заданным начальным значениями оскулирующих элементов орбиты и координаты активных ИРИ  $s_i$  (в случае динамической модели распределения ИРИ), активным называется ИРИ, для которого индикатор  $s_i | a_i(t_k) = 1$ , т. е. его радиопередатчик включен. В любой момент времени  $t_k \in [t_0, t_0 + T]$  выполняется условие  $\sum_{i=0}^{N_S} a_i(t_k) < N_S$ ;

1\*) (пункт выполняется только для источников сигналов АИС) проверяется условие  $t_k \% t_u(i) = 0, i = 1, \dots, N_S$ , где  $t_u(i) \in T_u = \{(3, \dots, 7) \times 60\}$  – время резервирования временных слотов [6]. Для ИРИ  $s_i | t_k \% t_u(i) = 0$  выполняется алгоритм планирования использования тайм-слотов – SOTDMA, значение  $t_u$  интервала обновления для каждого объекта генерируется датчиком случайных чисел, результатом выполнения алгоритма является множество  $T_i = \{t_1, \dots, t_{n_i}\}$ ,  $n_i = \text{card}(T_i)$  индексов слотов, принадлежащее объекту  $s_i$ ;

2) для КА  $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$  определяется пространственно-энергетическая доступность  $v_r(s_i, r_j)$  источников излучений  $s_i$  ( $i = 1, \dots, N_S$ ) исходя из условий превышения минимально допустимого угла места  $\beta(s_i, r_j)$  КА  $r_j$  в топоцентрической системе координат, связанной с местоположением анализируемого источника излучений  $s_i$ , и требуемого потока мощности сигналов АИС на входе приемника  $r_j$  в соответствии с заданной моделью среды распространения сигналов (с учетом потерь передачи в свободном пространстве, атмосферных потерь, потерь из-за расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенны, эффекта Фарадея, диаграмм направленности типовой судовой антенны АИС и спутниковой антенны), мощностью излучений и чувствительностью РПУ;

3) для всех объектов наблюдения  $s_i | v_r(s_i, r_j) = 1$ , находящихся в зоне покрытия КА  $r_j$ , выполняется алгоритм генерирования сигналов и формируется список  $M_j = \{M_{ji} : v_r(s_i, r_j) = 1\}$  сообщений с привязкой к источнику излучения  $s_i$  и его характеристикам (мощности передатчика), алгоритм генерирования имеет особенности в зависимости от типа ИРИ (источник излучения сигналов АИС или авиационных систем связи):

3.а) для источников сигналов АИС – проверяется условие  $T_i \cap \{[(t_k \% 60) / 0,0267] \div [((t_k + 1) \% 60) / 0,0267]\}$  задействования слотов для передачи сообщений в анализируемом секундном интервале  $t_k$ , где  $[x]$  – операция округления в большую сторону значения  $x$ . Если  $t_l \in T_i$  и условие выполняется, сообщение заносится в список  $M_{ji}$ , момент начала его передачи вычисляется как произведение  $t_l \times 0,0267$ ,  $t_l \in T_i \cap \{[(t_k \% 60) / 0,0267] \div [((t_k + 1) \% 60) / 0,0267]\}$ ;

3.б) для источников сигналов авиационных систем связи – количество сигналов типов MODE A/C, MODE S генерируется случайным образом, используя статистическую модель их распределения, количество сигналов MODE S ADS-B фиксировано, время излучения сигналов выбирается случайно в интервале  $[0, 1)$  таким образом, чтобы сигналы, переданные одним объектом, не накладывались друг на друга и были равномерно распределены в секундном интервале  $t_k$ ;

4) для каждого из сообщений в списке  $M_j$  проверяется условие наличия коллизии с другими сообщениями  $m_{ji}, m_{jk}$ , где  $m_{ji}, m_{jk} \in M_j, i, k = 1, \dots, |M_j|, i \neq k$ , учитывая задержки распространения сигналов от различных источников, потери мощности и т. д., вычисляется вероятность безошибочного приема сообщения (вид модуляции и длительность сигнала за-

висит от моделируемой системы) для отношения сигнал/шум, где энергия шума при наличии интерференции сигналов соответствует максимальной энергии одного из «мешающих» сообщений. Решение о безошибочном приеме сообщения принимается в случае попадания равномерно распределенной величины от 0 до 1 в интервал, длина которого зависит от вычисленной на предыдущем шаге вероятности правильного декодирования;

5) в случае правильного детектирования сообщения источник  $s_i$ , его передавший, считается идентифицированным, кроме того, если сообщение содержит координаты (сигналы AIS или ADS-B) – локализованным;

6) формируется информация как интегрированная за интервал моделирования  $t \in [t_0, t_k]$ , так и текущая, относящаяся к секунде  $t_k$ .

Результатом работы алгоритма являются показатели  $Y$  качества функционирования систем контроля движения воздушных и морских судов [3, 5].

### АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В качестве апробации разработанного алгоритма произведен расчет полноты добываемых сведений о перемещении морских судов спутниковой АИС. В соответствии со сведениями, опубликованными на интернет-сайтах [12, 17] количество зарегистрированных объектов (как морских судов, так и объектов специального назначения) с установленным оборудованием АИС на текущий момент составляет свыше 900 тыс., однако за сутки в среднем наблюдается от 160 до 200 тыс. (в зависимости от времени года). Введем обозначение  $a_i(t_k)$  активности ИРИ в момент времени  $t_k$ , т. е. радиопередатчик которого включен. Источники излучений, для которых индикатор активности является истинным  $a_i(t_k) = 1$ , составляют текущую радиоэлектронную обстановку.

Исходные данные для алгоритма: модель надводной радиоэлектронной обстановки является статической и включает приблизительно 160 тыс. ИРИ (рис. 2), является результатом веб-скреппинга интернет-сервисов, позволяющих следить за перемещением морских судов [12, 17]. Распределение ИРИ по регионам изображено на рис. 3.



Рис. 3. Распределение моделируемых ИРИ по регионам

Моделировалось движение КА со следующими параметрами орбиты: долгота восходящего узла  $\Omega = 0$  град.; наклонение  $i = 98$  град.; апогей  $r_a = 500$  км.; перигей  $r_p = 500$  км.; широта перицентра  $\omega = 0$  град. Интервал моделирования составляет сутки ( $T = 86400$  с.), время  $t_0$  начала моделирования соответствует положению КА на орбите с истинной аномалией  $\theta_0 = 0^\circ$ .

Приемная антенна – полуволновой диполь, диаграмма направленности (ДН) рассчитана с помощью программы MMANA-GAL [13] и изображена на рис. 4, коэффициент направленного действия равен 1,7, ширина ДН  $90^\circ$ , угол между направлением максимального усиления и силой земного притяжения  $90^\circ$ , поляризация – вертикальная.

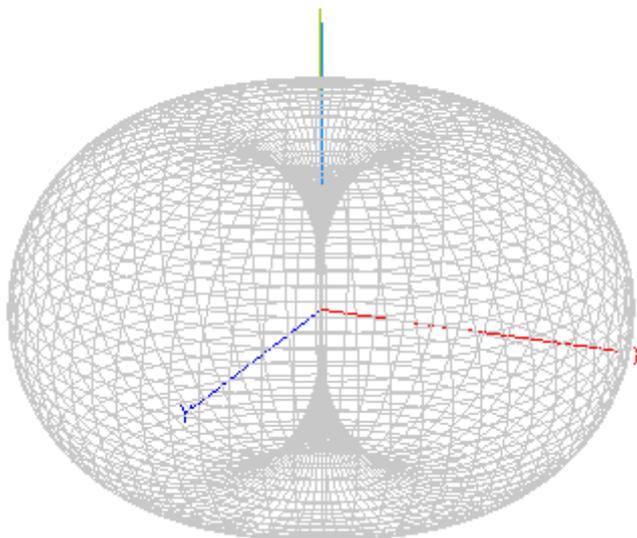


Рис. 4. Трехмерная модель диаграммы направленности спутниковой антенны

Графики количества  $v(S, t)$  судов в зоне обзора и количества  $v_r(S, t)$  судов, находящихся в зоне обзора КА с учетом их энергетической доступности, показаны на рис. 5.

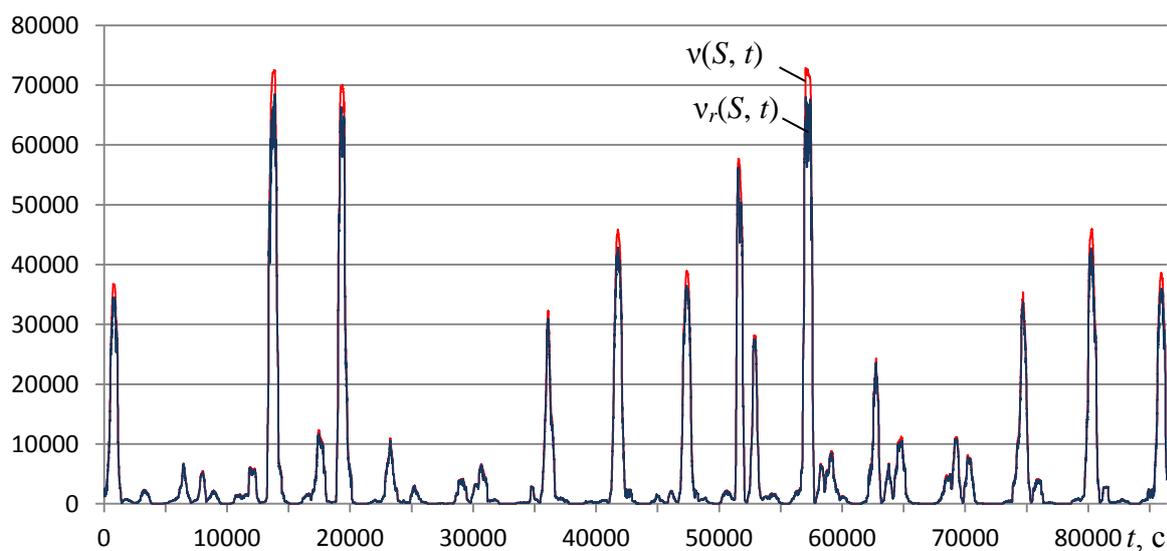
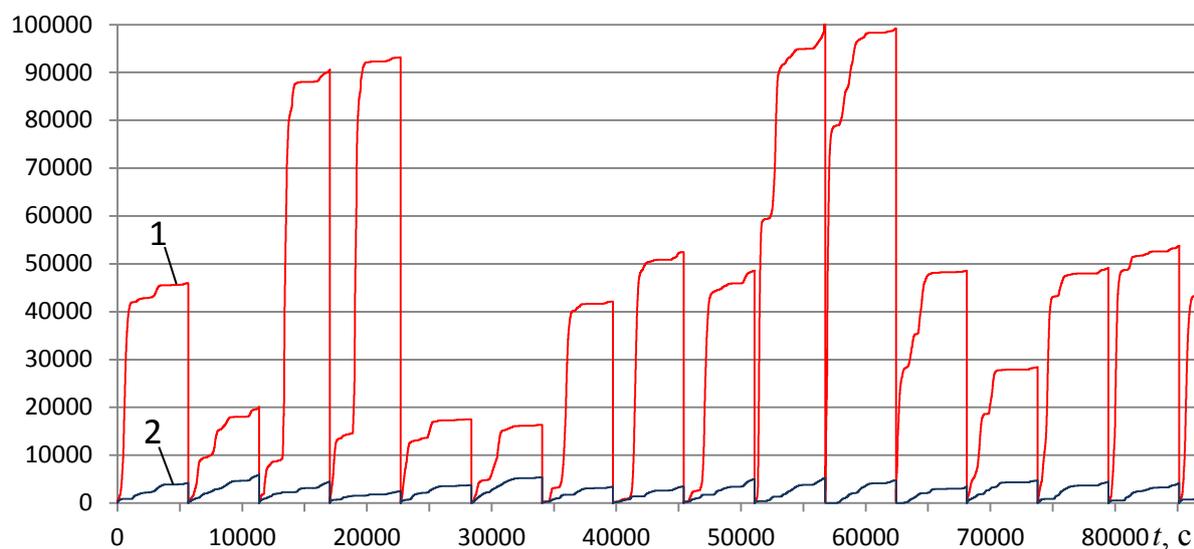
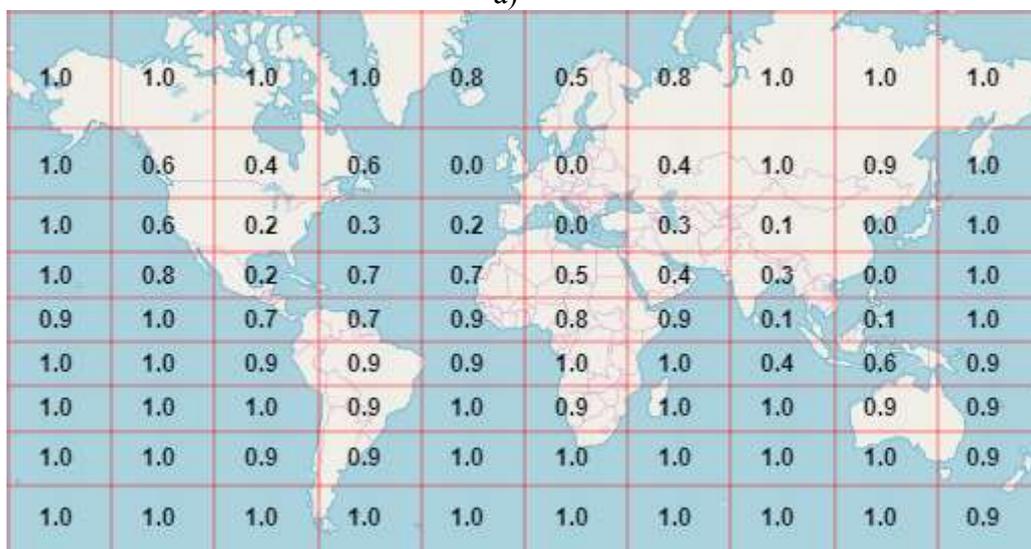


Рис. 5. Количество судов  $v(S, t)$ , попавших в зону обзора КА, и судов  $v_r(S, t)$  в зоне обзора с учетом энергетической доступности

Общее количество обнаруженных объектов за интервал наблюдения составляет 24992, количество детектированных сообщений – 354 тыс. На рис. 6,а цифрами 1 и 2 обозначены графики изменения количества объектов, для которых  $v_r(s_i, t_k) = 1$ , и передавших хотя бы одно сообщение в секундный интервал  $t_k$  (т. е. потенциально идентифицируемых), и количества обнаруженных объектов соответственно. На рис. 6,б представлены значения отношения числа обнаруженных судов к общему количеству судов в зависимости от региона наблюдения.



а)



б)

Рис. 6. Результаты моделирования:

а – изменение количества потенциально идентифицируемых и количества обнаруженных морских судов; б – зависимость вероятности обнаружения судов от региона наблюдения

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в ряде регионов с повышенной плотностью ИРИ вероятность идентифицировать объект близка к нулю вследствие внутрисистемных помех (интерференции сигналов от разных источников в зоне покрытия КА). Для решения этой проблемы необходимы дополнительные схемно-технические решения, например использование плоских антенных решеток, что, с одной стороны, приведет к увеличе-

нию количества обнаруженных ИРИ за интервал наблюдения, с другой стороны, к повышению сложности, а соответственно, и стоимости бортовой приемной аппаратуры и КА в целом.

Верификация модели осуществлялась сравнением с результатами аналитических расчетов при упрощенном комплексе условий, а также в реальной помеховой обстановке с использованием бортовой аппаратуры приема сигналов, установленной на летно-подъемном средстве [4].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны модель и алгоритм оценивания показателей качества функционирования космических систем автоматической идентификации воздушных и морских судов, которые могут быть использованы для подготовки исходных данных и обоснования тактико-технических требований для проектируемых опытных образцов космической техники.

Поскольку при числе моделируемых ИРИ, составляющем десятки и сотни тысяч, выполнение алгоритма оценивания показателей качества космических систем может занимать достаточно продолжительное время, даже несмотря на распараллеливание вычислений для каждого КА в ОГ, требуется разработать способ ускорения вычислений на основе применения гетерогенных систем.

Планируется также разработать метод синтеза орбитальных структур космических систем автоматической идентификации и определения местоположения подвижных объектов, а также оптимального выбора характеристик бортовой аппаратуры приема сигналов на основе модельно-кибернетических экспериментов.

## Список используемых источников

1. Обнаружение сообщений системы автоматической идентификации с помощью спутников: отчет МСЭ-R М.2084. – URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2084-2007-PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2084-2007-PDF-R.pdf) (дата обращения: 17.09.2016).
2. Романов А.А., Романов А.А., Тюлин А.Е. Малоразмерные космические аппараты мониторинга подвижных объектов ОАО «Российские космические системы»: состояние и перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 3–10.
3. Скороходов Я.А., Андреев А.М. Моделирование функционирования космического сегмента системы автоматической идентификации морских судов // Информационно-управляющие системы. – 2018. – Вып.2(93) – С. 36–48.
4. Скороходов Я.А., Махров К.Б., Калинин С.В. Модель функционирования и экспериментальные исследования системы автоматической идентификации морских судов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 9–17.
5. Скороходов Я.А. Моделирование функционирования космических и наземных систем наблюдения за воздушными движениями // Труды СПИИРАН. – 2018. – Вып. 6(61). – С. 29–60.
6. Технические характеристики системы автоматической идентификации, использующей многостанционный доступ с временным уплотнением каналов в полосе ОБЧ морской подвижной службы / Международный союз электросвязи. – URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-4-201004-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-4-201004-S!!PDF-R.pdf) (дата обращения: 10.09.2016).
7. Dynamic Statistical Studies on Satellite Reception of the ADS B Signal for Global Flight Tracking for Civil Aviation. World Radiocommunication Conference (WRC-15). Geneva, 2–27 November 2015. – URL: <https://www.itu.int/md/R15-WRC15-C-0100/en> (дата обращения: 17.05.2016).

8. Earth Observation Resources. – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/home> (дата обращения: 06.12.2018).
9. Space-based AIS for global maritime traffic monitoring / G. Hoye, T. Eriksen, B.J. Meland, and G. Narheim // *Acta Astronautica*, London. – 2008. – Vol. 62. – P. 240–245.
10. ADS-B Exchange. – URL: <https://www.adsbexchange.com> (дата обращения: 06.12.2018).
11. Flightradar24. – URL: <https://www.flightradar24.com> (дата обращения: 06.12.2018).
12. Marine Traffic. – URL: <https://www.marinetraffic.com/ru> (дата обращения: 05.11.2016).
13. MMANA-GAL. – URL: <http://gal-ana.de/basicmm/ru> (дата обращения: 05.11.2016).
14. N2YO. – URL: <https://www.n2yo.com> (дата обращения: 06.12.2018).
15. Roy A.E. *Orbital Motion*. – Bristol (UK): Institute of Physics Publishing, 2005. – 526 p.
16. Constellation of Small Quick-Launched and Self-Deorbiting Nano-Satellites with AIS Receivers for Global Ship Traffic Monitoring / Trong T.V., Dinh Q.T., Van T.D., Quang H.P., Nguyen H. Proc. 2nd Nano-Satellite Symp., March 2011, Tokyo, Japan – URL: <https://uu.divaportal.org/smash/get/diva2:424564/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 05.09.2016).
17. VT Explorer. – URL: <http://www.vtexplorer.com> (дата обращения: 05.11.2016).
18. Werner K., Bredemeyer J., Delovski T. ADS-B over satellite: Global air traffic surveillance from space // *Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications – Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV)*, 2014. – P. 47–52.

Е.С. Абазина,  
*кандидат техн. наук;*  
К.Ю. Цветков,  
*доктор техн. наук, профессор;*

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТЕГОСИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СОСТАВЕ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ**

В публикации представлен подход к формированию концептуальной модели взаимодействия стеганографических систем, функции каждого из уровней этой модели, определены задачи, решение которых позволит продолжать исследования по построению перспективных стегосетей. Уточнены элементы стегосетей, их классификация по решаемым задачам.

Ключевые слова: цифровая и компьютерная стеганография, скрытая передача информации, стегосистема, стегосеть, стегоканал, концептуальная модель взаимодействия стегосистем.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Стеганография – перспективное направление защиты информации, использование стеганографии совместно с методами шифрования данных позволяет одновременно сохранять в тайне смысл передаваемых сообщений и факт такой передачи. Большинство работ в области стеганографии посвящены рассмотрению вопросов организации скрытого обмена типа «точка – точка». Основные направления, цели, задачи и принципы осуществления сокрытия информации в цифровых данных и компьютерных программах изложены в работах [1–3]. Однако описанные в [1–3] понятия цифровой и компьютерной стеганографии во многих трудах иных авторов [4, 5] определены различными терминами. Кроме того, попытки расширения тезауруса цифровой и компьютерной стеганографии на основе прямой аналогии понятиям открытых систем связи введены в статье [6]. Анализ публикаций в области сокрытия информации [1–10] показал, что цифровая и компьютерная стеганография интенсивно развиваются. Это позволяет прогнозировать появление подходов к созданию стеганографических сетей, ориентированных на организацию скрытого обмена типа «точка – многоточка», «многоточка – многоточка». Такие тенденции требуют уточнения и формализации функций, целей и правил взаимодействия на каждом уровне концептуальной модели взаимодействия стеганографических систем и между уровнями системы, а также правил взаимодействия с эталонной моделью взаимодействия открытых систем (ЭМВОС), т. е. требуют разработки концептуальной модели взаимодействия стегосистем (КМВС) в составе эталонной модели взаимодействия открытых систем. Обобщение и уточнение функций каждого уровня КМВС, а также определение научных задач, требующих поиска решений при разработке стегосетей, являются целью настоящей статьи.

Основная проблемная ситуация состоит в определении взаимодействия стегосистем и открытых систем и сетей связи, выступающих транспортной средой для скрытого обмена. Понятия и определения, используемые при этом, требуют конкретизации. Для определенности в терминологии в статье используется приставка «стего», обозначающая принадлежность к скрытому информационному обмену.

Опишем стегосвязь как процесс тайного обмена информацией, скрываемой в другой открыто передаваемой информации системы электросвязи.

Для обмена стегосообщениями (форма представления скрываемой информации) между абонентами стегосвязи (участниками скрытого обмена информацией, стегосообщениями)

необходимо наличие на оконечном и узловом стегооборудовании согласованного набора ключевой информации, определяющей порядок сокрытия стегосообщений. Стегооборудование – оборудование для выполнения операций подготовки, передачи, приема и восстановления стегосообщений и стегоконтейнеров. Обработка и встраивание (обнаружение и извлечение) стегосообщений в открытую информацию – контейнер (стегоконтейнер) – осуществляется в соответствии с ключевой информацией стегокодерами (стегодекодерами), входящими в состав стегооборудования, и имеющими как программную, так и аппаратно-программную реализацию.

В зависимости от формы представления стегосообщений при встраивании в контейнер можно выделить виды стегосвязи, например: стегоизображение – скрываемое изображение; стеготекст – скрываемая текстовая информация; стегопереговоры – скрываемая аудио информация; стегозакладка – скрываемая программа; стегоданные – скрываемый набор данных (баз данных). В зависимости от вида контейнера, в котором осуществлено сокрытие стегосообщений, можно выделить род стегосвязи, например: программная стегосвязь – встраивание в программный код; видеостегосвязь – встраивание в подвижные и неподвижные видеоданные; аудиостегосвязь – встраивание в аудиоданные; текстовая стегосвязь – встраивание в текст; служебная стегосвязь – встраивание в служебные поля и заголовки.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Элемент, предназначенный для предоставления абонентам стеговизи услуг по обмену стегосообщениями, будем называть стегоузлом. Возможно классифицировать стегоузлы на оконечные, транзитные и ретрансляционные. Оконечные стегоузлы – стегоузлы, позволяющие с помощью стегокодеров/стегодекодеров встраивать и извлекать стегосообщения, а также формировать, мультиплексировать и демультимплексировать стегосообщения разных абонентов стегосвязи. Транзитные стегоузлы – стегоузлы, предназначенные для последовательной передачи стегосообщений между оконечными стегоузлами без изменения рода стегосвязи между ними. Ретрансляционные стегоузлы – стегоузлы, предназначенные для последовательной передачи стегосообщений между оконечными стегоузлами с выполнением дополнительных операций и преобразований при изменении рода стегосвязи между ними, также операций мультиплексирования и демультимплексирования стегосообщений разных абонентов стегосвязи. Функции преобразования стегосообщения в информацию, доступную для восприятия абонентом стегосвязи, возложены на оконечное стегооборудование, которое может быть представлено в программном (стегоприложение) или аппаратно-программном (стеготерминал) виде. Объединение методов и средств, используемых для передачи, приема и обработки стегосообщений (стегообмена) в одном определенном роде стегосвязи между соседними стегоузлами, образует стегоканал. Тогда направление стегосвязи (стегонаправление) есть совокупность стегоканалов и стегоузлов, обеспечивающих стегообмен между двумя стегоабонентами.

Объединение стегоканалов и ретрансляционных стегоузлов с целью организации стегообмена будем называть сетью стегосвязи (стегосетью).

В широком смысле стеганографическая система связи (стегосистема) – совокупность взаимоувязанных и согласованных по задачам, месту и времени методов и средств оконечного стегооборудования, стегоузлов и стегоканалов, функционирующих в интересах обслуживания абонентов стегосвязи.

Основное противоречие, которое необходимо разрешить при реализации стегосвязи, состоит в поиске рационального компромисса между достоверностью стегосвязи ее своевременностью и стегоскрытностью. Стегосвязь должна обеспечить обмен стегосообщениями между стегоабонентами в установленный срок без искажений и с сохранением в тайне от противника самого факта этого обмена. Стегосвязь выполняет свои задачи лишь при выпол-

нении данных условий. Если хотя бы одно из этих требований не выполнено, стегосообщение считается недоставленным.

Введем необходимые определения.

*Достоверность стегосвязи* – способность стегосвязи обеспечивать требуемую точность воспроизведения стегосообщений в оконечном стегооборудовании, а также способность сохранять эту точность при преобразовании стегосообщений и стегоконтейнера в процессе стегообмена (определяется вероятностью ошибочного приема бита стегосообщения).

*Своевременность стегосвязи* – способность стегосвязи обеспечивать стегообмен всеми видами стегосообщений между стегоабонентами в требуемые сроки (определяется временем доставки стегосообщения).

*Стегоскрытие* – способность стегосвязи обеспечивать сокрытие факта, времени и места передачи стегосообщений и ее предназначения, а также противостоять вводу ложной информации (определяется вероятностью необнаружения за заданное время).

Таким образом, наиболее критическим требованием к стегосвязи является стегоскрытие: невыполнение этого требования приводит к компрометации стегосвязи, а следовательно, к ее подавлению. Очевидна необходимость наличия в составе стегосистемы системы управления стегосвязью, обеспечивающей функционирование стегосистемы с требуемым качеством.

Для обеспечения указанных требований по своевременности, достоверности стегосвязи и стегоскрытности система стегосвязи (СВС) должна обладать перечисленными ниже качествами.

*Боевая готовность стегосистемы* – способность стегосистемы в любых условиях обстановки в установленные сроки выполнять задачи по обмену стегосообщениями с требуемым качеством.

*Управляемость стегосистемы* – способность стегосистемы изменять свое состояние в требуемых пределах при воздействиях на нее органов управления связью или средств автоматизации управления в соответствии с изменениями обстановки.

*Доступность стегосистемы* – способность стегосистемы обеспечивать отдельным стегоабонентам различных звеньев управления возможность пользования ее услугами при сохранении установленных приоритетов и способов установления стегосвязи.

*Мобильность стегосистемы* – способность стегосистемы в установленные сроки разворачиваться, свертываться, изменять структуру и род стегосвязи, объединять и разделять потоки стегосообщений при подготовке и в ходе операции в соответствии с реально складывающейся обстановкой.

*Пропускная способность стегосистемы* – способность стегосистемы к обмену стегосообщениями требуемого объема с требуемой достоверностью в заданные сроки.

*Устойчивость стегосистемы* (стегоустойчивость) – способность стегосистемы обеспечивать задачи обмена стегосообщениями с требуемым качеством в условиях воздействия на ее элементы различных деструктивных факторов и атак.

*Стегостойкость стегосистемы* (стегостойкость) – способность стегосистемы противостоять всем видам атак, проводимых в результате стегоанализа и стегопротивоборства.

*Имитостойкость стегосистемы* – способность стегосистемы противостоять вводу в нее ложных и (или) ранее переданных стегосообщений, а также навязыванию ей ложных режимов работы.

Принципиальным отличием стегоустойчивости от стегостойкости является наличие деструктивных факторов и атак, направленных на нарушение функционирования стегосистемы, в то время как стойкость к проведению атак, направленных на выявление факта стегосвязи, – признак стегостойкости.

Противоборствующей системой по отношению к стегосистеме является система стегоанализа.

*Стегоанализ* – процесс технического анализа сообщений открытых систем и сетей связи силами и средствами противоборствующей стороны с целью определения с заданной достоверностью наличия в открытой системе связи стегосвязи в сроки, не превышающие требуемые.

*Система стегоанализа* – совокупность организационно-технических мероприятий противоборствующей стороны по стегоанализу и (или) стегопротивоборству.

*Стегопротивоборство* – процесс целенаправленного скрытого или явного нарушения противоборствующей стороной функционирования стегосистемы, уничтожения, искажения либо подмены передаваемых стегосообщений.

Действия, предпринимаемые противоборствующей стороной при стегоанализе, принято называть атаками [1–9].

Атаки на стегосистему преследуют следующие цели:

- определение факта нахождения стегосообщения в стегоконтейнере – вскрытие стегосвязи;
- подавление стегонаправления, стегоканала, стегосистемы, стегосети – при вскрытии стегосвязи;
- искажение стегосообщения в стегоконтейнере, стегоконтейнера – при вскрытии стегосвязи;
- извлечение стегосообщения из стегоконтейнера – при вскрытии стегосвязи и вскрытии ключевой информации стегосвязи;
- извлечение информации из стегосообщения – при вскрытии стегосвязи и вскрытии ключевой информации стегосвязи;
- подмена стегосообщения в стегоконтейнере – при вскрытии стегосвязи и вскрытии ключевой информации стегосвязи.

В связи со сказанным выше стегосистема кроме стегостойкости должна удовлетворять требованиям по стегоустойчивости и имитостойкости стегосистемы [6].

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТЕГОСИСТЕМ**

Основной целью применения стеганографических методов является организация скрытого информационного обмена. Иные цели цифровой и компьютерной стеганографии – идентификация и аутентификация информации – могут быть рассмотрены как прикладные по отношению к стегосетям и не требуют разработки концептуальной модели взаимодействия стегосистем, поскольку методы, позволяющие достичь таких целей, реализуются алгоритмами, функционирующими на уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем в интересах защиты открытой информации. Таким образом, идея формирования стегосетей является развитием методов и подходов к организации стеганографических каналов. Свойство стегосвязи по обеспечению своевременной и достоверной передачи стегосообщений есть качество стегосвязи.

Предлагаемая концептуальная модель взаимодействия стегосистем включает, как и ЭМВОС, семь уровней. Ресурс для стегосистемы так же, как и для открытой системы связи, подразумевает взаимосвязь энергетического, частотного и временного диапазонов электрических сигналов, позволяющих передавать стегосообщения с требуемым качеством. При этом в отличие от открытых систем связи на стегосистемы накладывается дополнительное ограничение, связанное с необходимостью удовлетворения требованиям к стегоскрытности. Понятие стегоскрытности, в свою очередь, непосредственно связано с обеспечением качества обслуживания открытого трафика – контейнера.

Таким образом, анализ существующих и разрабатываемых методов и способов стегообмена, а также совершенствования его параметров [1–10] позволил сформулировать вербальное



стегосообщение, и временем его обработки. На уровне стегоприложений также необходимо управление выбором алгоритма шифрования и его параметрами.

Задача передачи ключевой информации шифрования стегосообщений, отдельно не рассматриваемая в вопросах стеганографических систем, может решаться на данном уровне КМВС. В опубликованных работах предложено использовать стандартные способы разрешения этой ситуации.

К задачам уровня стегоприложений логично отнести задачи кодового уплотнения стегосообщений, их мультиплексирования, обеспечение приоритетов стегосообщений (категория срочности стегоинформации, приоритет стегоабонента, приоритет в соответствии с требуемым качеством обслуживания  $QoS_{стг}$  стегосообщения), а также предварительную подготовку стегосообщений к встраиванию. Вопросы кодового уплотнения стегосообщений с целью организации многоканальной стегосистемы рассмотрены в работах [11–23]. Подход к обеспечению приоритетов стегоабонентов и стегосообщений за счет статистического мультиплексирования стегоинформации представлен в [15–16]. Предварительная обработка стегосообщений, заключающаяся в придании им свойств, необходимых для реализации стегоалгоритмов встраивания, также целесообразно выполнять на уровне стегоприложений, например, расширение спектра стегосообщений путем формирования двумерных шумоподобных сигнальных конструкций для обеспечения стегоскрытности [17–18]. В зависимости от применяемых подходов и решений указанные функции могут быть реализованы на уровне стегоканала.

Со стороны противоборствующей системы, оказывающей деструктивное воздействие, на уровне стегосообщений и стегоприложений возможно проведение атак, ориентированных на сокращение размеров буферов оконечного стегооборудования и быстроедействие средств обработки стегоалгоритмов.

На пятый уровень предлагаемой КМВС – уровень стегосеанса – следует возложить решение задач синхронизации оконечного стегооборудования стегоузлов, установления, обнаружения, поддержания и разрыва стегосоединения.

Под стегосоединением будем понимать процесс построения стегоканала между элементами и узлами стегосети.

Данные задачи весьма актуальны, как для перспективных стегосетей, так и для «линейных» стегосистем, функционирующих в интересах одного стегонаправления. Вопросам синхронизации в современной стеганографии уделено недостаточно внимания. Возможно рассмотрение методов синхронизации, применяемых в открытых СС, но они должны быть переработаны и адаптированы с учетом задач сохранения скрытности передачи информации и вносимой избыточности. Система управления на уровне стегосеанса определяет выбор алгоритмов синхронизации и установления стегосоединений, а также параметров применяемых алгоритмов, ключевой информации стегосвязи.

Деструктивные воздействия на уровне стегосеанса ориентированы на предотвращение установления стегосоединения путем воздействия на оконечное стегооборудование и стегоузлы, а также на открытую СС с этой же целью.

Уровни стегосообщений, стегоприложений, стегосеанса могут быть логически объединены в уровень стегоприложений и реализованы в программном (стегоприложение) или аппаратно-программном виде (стеготерминал), функции которого соответствуют функциям оконечного стегооборудования. С точки зрения взаимодействия алгоритмов данного уровня с открытой системой связи их функционирование зависит от параметров открытой системы связи в части, касающейся определения средней скрытой пропускной способности, в остальном – определяется требованиями к качеству обслуживания стегосообщений (времени доставки стегосообщения, достоверности приема стегосообщения) при соблюдении требований к стегоскрытности. Скрытая пропускная способность стегоканала определяется максимальным объемом стегоинформации, которую возможно передать при сохранении требований к стегоскрытности и качеству обслуживания стегоканала  $QoS_{стг}$ . В качестве контейнера ис-

пользуются различные виды трафика открытой сети связи, многие из которых имеют в каждый момент времени переменное количество элементов, подвергаемых коррекции при встраивании стегосообщения. В связи с этим необходимо применение дополнительного параметра – средней скрытой пропускной способности. Под средней скрытой пропускной способностью стегосистемы (стегоканала) понимают такой объем стегоинформации, усредненный на интервале времени стегообмена, который возможно гарантированно передать при сохранении требований к стегоскрытности и качеству обслуживания стегоканала  $QoS_{стг}$ .

Четвертый уровень КМВС – уровень стеготранспорта – предназначен для обеспечения качества обслуживания стегосообщений  $QoS_{стг}$  при одновременном выполнении требований к качеству обслуживания передачи данных открытых СС ( $QoS$ ), выбираемых для осуществления встраивания на последующих уровнях. Система управления на данном уровне решает задачу выдачи управляющих воздействий нижележащим уровням в отношении выбора вида контейнера (определения рода стегосвязи: программная, видео-, аудио-, текстовая, служебная стегосвязь), позволяющего достичь компромисса в противоречии между  $QoS_{стг}$  и  $QoS$ . На этом же уровне реализуются функции сборки (разборки) стегосообщений, их повторной передачи, поиска и коррекции ошибок в целях обеспечения  $QoS_{стг}$  при сохранении скрытности встраивания, тесно связанной с  $QoS$  для открытой СС.

Со стороны противоборствующей системы на уровне стеготранспорта возможно проведение активных атак, ориентированных на функционирование стегоузлов, а также мероприятий РЭБ, ориентированных на открытую СС с целью уменьшения ее пропускной способности.

На третьем уровне КМВС – уровне стегосети – реализуются функции поиска стегопутей и стегомаршрутизация. Предполагается, что прототипами для методов стегомаршрутизации могут стать методы маршрутизации, реализованные в протоколах технологий ATM, MPLS, IPX. При этом возможны варианты маршрутизации, осуществляемой путем передачи меток внутри стегоконтейнера (назовем такой случай «внутренней стегомаршрутизацией») либо путем перенаправления и переупаковки стегосообщений благодаря использованию специальных признаков в контейнере отдельно от стегосообщения, при этом имеющиеся поля открытых заголовков дополняют или заполняют (назовем этот случай «внешней стегомаршрутизацией») при сохранении скрытности. В открытых работах данное направление остается малоизученным, что объясняется поиском возможных решений для ряда задач, например:

- не продуманы вопросы уникальной адресации для элементов стегосистем и стегосетей, как и нет точного понимания необходимости разработки систем стегоадресации;
- не определены и не оценены возможности скрытого добавления метки при внешней маршрутизации. Функционирование алгоритмов данного уровня опирается на информацию о состоянии открытой СС, необходимо предусмотреть канал обмена служебной информацией с системой управления сетевым уровнем ЭМВОС;
- не определены способы передачи, хранения и обмена  $KI_{стг}$  между элементами стегосистемы и стегосети.

Деструктивные воздействия на уровне стегосети ориентированы на вывод из работоспособного состояния всех видов стегоузлов, как непосредственным воздействием на стегоалгоритмы, так и на алгоритмы и оборудование узлов открытых СС.

На втором уровне КМВС – уровне стегоканала – решаются задачи выбора и обмена ключевой информации стегосистемы ( $KI_{стг}$ ), мультиплексирования стегосообщений, организации множественного доступа к разделяемому стегоканалу, помехоустойчивого кодирования. Задача мультиплексирования может быть решена как до встраивания в контейнер, так и после – за счет использования открытых каналов, подлежащих объединению. Вопросы статистического мультиплексирования стегосообщений, а также обеспечение разноприоритетного доступа (в соответствии с приоритетом стегоабонента и приоритетом стегоинформации) тре-

буют реализации на данном уровне. Подход к реализации разноприоритетного доступа при статистическом мультиплексировании стегосообщений представлен в работах [15–17]. Вопросы адаптивного выбора контейнера для встраивания стегосообщений с разными требованиями к объему скрываемой информации при различных предъявляемых требованиях к  $QoS_{стг}$  рассмотрены в работах [15–17, 24, 25]. Этот вариант может быть применен, например, когда требуется скрытно передавать значительный объем информации в одном стегонаправлении, совпадающем с открытым информационным направлением. Помехоустойчивое кодирование возможно как до встраивания, например для обеспечения повышенной достоверности стегосообщения, так и за счет применения механизмов помехозащиты контейнера (канального кодирования, используемого в открытой СС). Сама операция встраивания стегосообщений в контейнер может быть реализована до его сжатия или после [11–17] и определяется решаемыми задачами и подходом к организации стегосвязи. В работах [24, 25] для обеспечения высокой достоверности стегоинформации предложен способ трехуровневого кодирования на основе модулярного кода, позволяющего в зависимости от вида стегосообщения выполнять помехоустойчивое кодирование, обеспечивающее требования к достоверности на приемной стороне. Система управления на данном уровне осуществляет выбор метода помехоустойчивого кодирования, определяет разновидность применяемых кодов и их параметры, основываясь на сведениях о состоянии открытой СС (род связи основных, запасных, резервных, обходных открытых каналов, в которых предполагается формирование стегоканала, вид трафика в каждом из каналов открытой СС), а также учитывая требования к  $QoS_{стг}$  и проводимые противником стегоатаки. Крайне мало работ, посвященных разработке способов передачи  $KI_{стг}$  между абонентами скрытого информационного обмена, вопросы хранения и обмена  $KI_{стг}$  на стегоузлах и стегомаршрутизаторах для продвижения и в случае необходимости выполнения «перепакровки» стегосообщений в процессе передачи являются перспективными.

Деструктивные воздействия на уровне стегосеанса направлены на вскрытие ключевой информации, повреждение стегосообщений, их подмену, навязывание ложных стегосообщений.

На первом уровне – уровне стегоконтейнера – реализуются функции выбора контейнера, его предварительной подготовки (если это необходимо) и встраивания стегосообщений, а на приемной стороне – обратных операций. Основные методы, разработанные к настоящему времени [26–35], в основном могут быть отнесены именно к этому уровню.

Со стороны противоборствующей системы на уровне стегоконтейнера проводятся атаки, направленные на вскрытие стегосвязи: наблюдение, визуальный контроль качества контейнера (где приемлемо), статистический контроль.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивное развитие цифровой и компьютерной стеганографии характеризуется высокой публикационной активностью в этой области. Представляемые методы и подходы, модели и алгоритмы все более разнообразны и ориентированы на расширение возможностей стеганографических систем (в узком смысле), совершенствование их параметров. Систематизация и определение круга проблемных вопросов – существующих и перспективных, отмеченных в статье, способствуют дальнейшему развитию стеганографической науки. Концептуальная модель взаимодействия стеганографических систем отражает подход к формированию глобальной стегосистемы (в широком смысле) и построению стегосетей. С этой целью в статье сформулированы функции каждого из уровней этой КМВС, определены задачи, решение которых позволит продолжать исследования по построению перспективных стегосетей, классифицированы существующие стеганографические методы по уровням КМВС. В статье предпринята попытка формирования терминологического базиса в части,

касающейся определения требований к стегосвязи как к процессу тайного обмена информацией, скрываемой в другой, открыто передаваемой информации системы электросвязи, требования к стегосистеме как системе связи, взаимодействующей с открытой системой связи. Определены и классифицированы элементы стегосети и стегосистемы (в широком смысле).

### Список используемых источников

1. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. – М.: Солон-Пресс, 2009. – 272 с.
2. Стеганография, цифровые водяные знаки и стегоанализ: монография / А.В. Аграновский, А.В. Балакин, В.Г. Грибунин и др. – М.: Вузовская книга, 2009. – 220 с.
3. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. – К.: МК-пресс, 2006. – 288 с.
4. Коржик В.И. Цифровая стеганография и цифровые водяные знаки. – СПб.: СПбГУТ, 2016. – Ч.1: Цифровая стеганография. – 225 с.
5. Коржик В.И. Цифровая стеганография и цифровые водяные знаки. – СПб.: СПбГУТ, 2017. – Ч.2: Цифровые водяные знаки. – 198 с.
6. Макаренко С.И. Эталонная модель взаимодействия стеганографических систем и обоснование на ее основе новых направлений развития теории стеганографии // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – №2 (3) – С. 24–32.
7. Абазина Е.С., Ерунов А.А. Сравнительный анализ и классификация методов цифровой и компьютерной стеганографии и перспективные направления ее развития // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 655 – С. 5–16.
8. Коржик В.И. Рецензия на книгу «Стеганография. Алгоритмы и программная реализация» // Труды учебных заведений связи. – 2018. – Т.4, №1. – С. 102–105.
9. Алексеев А.П., Макаров М.И. Принципы многоуровневой защиты информации // Информационные технологии. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 88–93.
10. Пат. 2608150. Российская Федерация, МПК G06F17/00 (2006.01). Способ скрытой передачи данных в видеоизображении / Цветков К.Ю., Коровин В.М., Федосеев В.Е., Абазина Е.С.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского. – № 2014144786; заявл. 05.11.2014.
11. Пат. 2616869. Российская Федерация, МПК H04L9/00(2006.01). Способ скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных / Цветков К.Ю., Коровин В.М., Федосеев В.Е., Абазина Е.С.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского. – № 2015113684; заявл. 13.04.2015.
12. Свид. ПЭВМ №2015615358. Имитационная модель скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в структуре сжимаемых видеоданных / Цветков К.Ю., Коровин В.М., Федосеев В.Е., Абазина Е.С. – Заявл. 15.05.2015.
13. Абазина Е.С., Ерунов А.А. Результаты моделирования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – Вып. 2. – С. 1–25.
14. Ерунов А.А. Результаты моделирования асинхронного мультиплексирования скрываемых данных в видеопотоке // Известия Института инженерной физики. – 2017. – № 2 (44). С. 17–20.
15. Ерунов А.А. Модель асинхронного мультиплексирования скрываемых данных в видеоконтейнере переменной емкости // Информация и космос. – 2017. – № 2. – С. 81–87.
16. Цветков К.Ю., Ерунов А.А., Абазина Е.С. Алгоритм кодового уплотнения скрытых каналов с учетом приоритетов абонентов // Известия Института инженерной физики. – 2016. – № 4 (42). – С. 25–31.

17. *Цветков К.Ю., Коровин В.М.* Дискретный гармонический анализ и его приложения к задачам синтеза оптимальных сигналов: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. – 108 с.

18. *Цветков К.Ю., Малозёмов В.Н.* Об оптимальной паре «сигнал – фильтр» // Проблемы передачи информации. – 2003. – Т.1, вып. 2. – С. 50–62.

19. *Цветков К.Ю.* Теория оптимальных систем сложных дискретных сигналов и ее приложения. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 160 с.

20. *Абазина Е.С.* Формирование стеганографического канала с кодовым уплотнением на основе двумерных нелинейных сигналов // Вопросы радиоэлектроники в сфере техники телевидения. – 2015. – №1. – С. 15–26.

21. *Абазина Е.С.* Метод скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных // Информация и космос. – 2014. – №1 – С. 33–38.

22. Модель кодера скрытого канала с кодовым уплотнением с использованием сигнальных последовательностей Франка – Уолша, Франка – Крестенсона / К.Ю. Цветков, В.Е. Федосеев, В.М. Коровин и др. // Журнал НИИ Радио. – 2014. – №2 – С. 28–35.

23. *Рябинин Ю.Е., Финько О.А.* Стеганографическая система обмена данными, представленными модулярным кодом, с передачей пустых контейнеров // Материалы I международной науч. конф. «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах». – Ставрополь: ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2014. – С. 288–292.

24. Модулярная стеганографическая система передачи шифрованных данных по сетям общего пользования / Рябинин Ю.Е., Петлеваный А.А., Елисеев Н.И. и др. // Сб. научных трудов Шестой международной научно-техн. конф. «Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании (ИНФОКОМ-6)». – Ставрополь: ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2014. – С. 263–269.

25. *Аленин А.А.* Разработка и исследование методов скрытой передачи информации в аудиофайлах: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.15. – Самара: ПГУТИ, 2011. – 174 с.

26. *Алиев А.Т.* Разработка моделей, методов и алгоритмов перспективных средств защиты информации в системах электронного документооборота на базе современных технологий скрытой связи: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.19. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. – 216 с.

27. *Дрюченко М.А.* Статистические и нейросетевые алгоритмы синтеза и анализа стеганографически скрытой информации в аудио- и графических данных: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.17. – Воронеж: ВГУ, 2010. – 192 с.

28. *Жилкин М.Ю.* Теоретико-информационные методы стегоанализа графических данных: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.12.13. – Новосибирск: СибГУТИ, 2009. – 153 с.

29. *Кувшинов С.С.* Методы и алгоритмы сокрытия больших объемов данных на основе стеганографии: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.19. – СПб.: НИУ ИТМО, 2010. – 116 с.

30. *Мерзлякова Е.Ю.* Построение стеганографических систем для растровых изображений, базирующихся на теоретико-информационных принципах: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.19. – Новосибирск: СибГУТИ, 2011. – 161 с.

31. *Пономарев К.И.* Некоторые математические модели стеганографии и их статистический анализ: дисс. на соиск. уч. ст. канд. ф.-мат. наук по спец. 01.01.05. – М.: МИЭМ, 2010. – 81 с.

32. *Жгун А.В.* Модель скрытой передачи информации в каналах связи: дисс. на соиск. уч. ст. канд. физико-мат. наук по спец. 05.13.18. – В. Новгород: НовГУ, 2003. – 187 с.

33. *Жгун А.А.* Модель скрытой передачи информации для дискретных каналов с повышенным уровнем помех: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.13.18. – В. Новгород: НовГУ, 2010. – 216 с.

34. *Орлов В.В.* Методы скрытой передачи информации в телекоммуникационных сетях: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.12.13. – Самара: ПГУТИ, 2012. – 166 с.

35. *Макаров М.И.* Разработка и исследование методов скрытой распределенной передачи сеансовых данных в телекоммуникационных сетях: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по спец. 05.12.13. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 144 с.

В.Н. Арсеньев,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
Е.Н. Белихин;  
И.А. Трофимов,  
*кандидат техн. наук*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ ИЗМЕРЕНИЙ БОРТОВЫМИ И НАЗЕМНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ**

Рассматривается задача оценивания вектора параметров движения космического аппарата (КА) по данным, полученным с наземных и бортовых измерительных средств. Показано, что взвешенный учет всей измерительной информации о параметрах движения КА позволяет повысить точность оценивания этих параметров, причем увеличение числа даже достаточно грубых измерений, не являющихся аномальными, также способствует повышению качества оценивания. Предложен многомерный подход к решению этой задачи, позволивший получить комплексную оценку вектора состояния КА и характеризующую ее точность корреляционную матрицу. Приведен пример, наглядно демонстрирующий эффективность применения полученных результатов.

Ключевые слова: космический аппарат, параметры движения, измерительные комплексы, неравноточные измерения, комплексная оценка.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для решения ряда задач, связанных с функциональным предназначением космического аппарата (КА), необходимо с высокой точностью знать параметры, характеризующие его движение. В процессе полета на космический аппарат оказывают воздействие различные силы и моменты сил, обусловленные работой двигателей, влиянием гравитационных и магнитных полей, атмосферы и других факторов. На работу бортовых комплексов КА оказывает влияние большое число внешних и внутренних возмущающих воздействий, связанных с изменениями температурных режимов, перекрестными электромагнитными связями, возникающими при работе бортовой аппаратуры, погрешностями датчиков, воздействием факторов космического пространства и т. д. Вследствие этих причин фактические значения параметров движения КА практически всегда отличаются от расчетных [1].

Для определения реальных параметров движения используется информация, получаемая с бортовых и наземных измерительных комплексов (систем, средств) [2, 3]. Она представляется в виде множества значений вектора, характеризующего положение КА в шестимерном пространстве в соответствующий момент времени. В общем случае используемые измерительные комплексы имеют различные погрешности и число проводимых каждым из них измерений может быть больше одного. Вопросам совместной обработки неравноточных измерений посвящен ряд работ, например [4–6]. В них предложены алгоритмы решения этой задачи, в основном для отдельных координат вектора состояния КА и при единичных измерениях. При этом оценки точности получаемых результатов также представлены в скалярном виде.

Применительно к рассматриваемой задаче оценивания вектора параметров движения КА следует отметить, что приемлемую точность ее решения можно обеспечить, если использовать многомерный подход и комплексную обработку данных, полученных на основе многократных измерений параметров движения с помощью бортового измерительного комплекса [7], навигационной аппаратуры потребителя (НАП) сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS [8, 9], аппаратуры внешнетраекторных измерений, основанной на радиотехническом и оптическом принципах действия (квантово-оптических станций, командно-измерительных средств) и др. [1, 3].

Рассматривается космический аппарат, имеющий на борту современную навигационную аппаратуру потребителя ГНСС ГЛОНАСС/GPS и ретрорефлекторы для работы с наземными квантово-оптическими станциями. Положение КА в некоторой системе координат в момент времени  $t$  характеризуется шестимерным вектором состояния  $\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z} \ \hat{V}_x \ \hat{V}_y \ \hat{V}_z]^T$  [10]. Значок « $\wedge$ » обозначает случайную величину. Математическое ожидание и корреляционная матрица вектора  $\hat{\mathbf{X}}$ , характеризующие область расположения КА (эллипсоид) в пространстве в момент времени  $t$ , обозначаются  $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{X}}}$  и  $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{X}}}$  соответственно, причем  $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{X}}}$  определяет среднее значение вектора  $\hat{\mathbf{X}}$  – центр эллипсоида,  $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{X}}}$  – его размеры [11].

Для определения вектора параметров движения КА  $\hat{\mathbf{X}}$  используются результаты его измерений различными измерительными комплексами (ИК): наземными станциями, бортовыми измерительными средствами, навигационной спутниковой системой и т. д. Результаты измерений вектора  $\hat{\mathbf{X}}$  представлены множествами  $\Omega_j = \{\mathbf{X}_{ji}, i = \overline{1, N_j}\}$ ,  $j = \overline{1, S}$ , где  $N_j$  – число измерений, проведенных  $j$ -м комплексом;  $S$  – число измерительных комплексов.

Данные измерений и расчетов, проводимые различными измерительными комплексами, синхронизированы по времени.

В общем случае измерительные комплексы имеют различные погрешности, которые характеризуются положительно определенными корреляционными матрицами  $\mathbf{K}_{X_j}$ ,  $j = \overline{1, S}$ .

Необходимо получить оценку вектора параметров движения КА и оценить ее точность по данным, полученным с наземных и бортовых измерительных средств.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Для оценивания вектора параметров движения КА предлагается использовать модель в виде линейной комбинации измеренных значений:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}_1 (\mathbf{X}_{11} + \mathbf{X}_{12} + \dots + \mathbf{X}_{1N_1}) + \mathbf{A}_2 (\mathbf{X}_{21} + \mathbf{X}_{22} + \dots + \mathbf{X}_{2N_2}) + \dots + \mathbf{A}_S (\mathbf{X}_{S1} + \mathbf{X}_{S2} + \dots + \mathbf{X}_{SN_S}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}_j$  – неизвестные  $6 \times 6$ -матрицы коэффициентов;  $j = \overline{1, S}$ .

После введения обозначения  $\mathbf{M}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \mathbf{X}_{ji}$  модель (1) можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{X} = N_1 \mathbf{A}_1 \mathbf{M}_1 + N_2 \mathbf{A}_2 \mathbf{M}_2 + \dots + N_S \mathbf{A}_S \mathbf{M}_S. \quad (2)$$

Полагается, что оценки  $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_S$  математического ожидания  $\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{X}}}$  являются несмещенными [12]. Тогда применение операции математического ожидания к обеим частям выражения (2) дает уравнение

$$\mathbf{M}_{\hat{\mathbf{X}}} = N_1 \mathbf{A}_1 \mathbf{M}_{\hat{\mathbf{X}}} + N_2 \mathbf{A}_2 \mathbf{M}_{\hat{\mathbf{X}}} + \dots + N_S \mathbf{A}_S \mathbf{M}_{\hat{\mathbf{X}}}, \quad (3)$$

из этого уравнения получается условие, которому должны удовлетворять матрицы  $\mathbf{A}_j$ ,  $j = \overline{1, S}$ :

$$N_1 \mathbf{A}_1 + N_2 \mathbf{A}_2 + \dots + N_S \mathbf{A}_S = \mathbf{I}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная  $6 \times 6$ -матрица.

Корреляционная матрица оценки  $\mathbf{X}$  вектора  $\hat{\mathbf{X}}$  получается из выражения (2) с учетом независимости оценок  $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_S$ :

$$\mathbf{K}_X = N_1^2 \mathbf{A}_1 \mathbf{K}_{M_1} \mathbf{A}_1^T + N_2^2 \mathbf{A}_2 \mathbf{K}_{M_2} \mathbf{A}_2^T + \dots + N_S^2 \mathbf{A}_S \mathbf{K}_{M_S} \mathbf{A}_S^T.$$

Учитывая, что корреляционные матрицы оценок  $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_S$  определяются по формуле

$\mathbf{K}_{M_j} = \mathbf{K}_{X_j} / N_j$ ,  $j = \overline{1, S}$ , получим:

$$\mathbf{K}_X = N_1 \mathbf{A}_1 \mathbf{K}_{X_1} \mathbf{A}_1^T + N_2 \mathbf{A}_2 \mathbf{K}_{X_2} \mathbf{A}_2^T + \dots + N_S \mathbf{A}_S \mathbf{K}_{X_S} \mathbf{A}_S^T. \quad (5)$$

Поскольку диагональные элементы корреляционной матрицы  $\mathbf{K}_X$  являются дисперсиями, характеризующими разброс соответствующих координат вектора  $\hat{\mathbf{X}}$  относительно их средних значений, то в качестве показателя точности оценки (2) может использоваться след матрицы  $\mathbf{K}_X$ :  $\text{tr } \mathbf{K}_X$  [13].

Тогда матричные коэффициенты  $\mathbf{A}_j$ ,  $j = \overline{1, S}$ , могут быть определены из условия минимума функции  $\text{tr } \mathbf{K}_X$  при ограничении (4):

$$\{\tilde{\mathbf{A}}_j, j = \overline{1, S}\} = \arg \min_{\mathbf{A}_j, j = \overline{1, S}} \text{tr } \mathbf{K}_X \text{ при условии } N_1 \mathbf{A}_1 + N_2 \mathbf{A}_2 + \dots + N_S \mathbf{A}_S = \mathbf{I}.$$

Такая задача решается методом неопределенных множителей Лагранжа [14].

Функция Лагранжа имеет вид

$$L = \text{tr } \mathbf{K}_X - 2\text{tr} \left[ \boldsymbol{\Lambda}^T (N_1 \mathbf{A}_1 + N_2 \mathbf{A}_2 + \dots + N_S \mathbf{A}_S - \mathbf{I}) \right], \quad (6)$$

где  $\boldsymbol{\Lambda}$  –  $6 \times 6$ -матрица неопределенных множителей.

Необходимые условия минимума функции  $L$  по аргументам  $\mathbf{A}_j$ ,  $j = \overline{1, S}$ , и  $\boldsymbol{\Lambda}$  имеют вид:

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \mathbf{A}_j} \right|_{\mathbf{A}_j = \tilde{\mathbf{A}}_j} = \mathbf{0}; \quad \left. \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\Lambda}} \right|_{\boldsymbol{\Lambda} = \tilde{\boldsymbol{\Lambda}}} = \mathbf{0},$$

где  $\mathbf{0}$  – нулевая  $6 \times 6$ -матрица.

Поскольку частные производные

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \mathbf{A}_j} \right|_{\mathbf{A}_j = \tilde{\mathbf{A}}_j} = 2N_j \tilde{\mathbf{A}}_j \mathbf{K}_{X_j} - 2N_j \boldsymbol{\Lambda}, \quad j = \overline{1, S}, \quad \left. \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\Lambda}} \right|_{\boldsymbol{\Lambda} = \tilde{\boldsymbol{\Lambda}}} = -2(N_1 \tilde{\mathbf{A}}_1 + N_2 \tilde{\mathbf{A}}_2 + \dots + N_S \tilde{\mathbf{A}}_S - \mathbf{I}),$$

то получается система из  $S+1$ -го матричного уравнения:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{A}}_j \mathbf{K}_{X_j} - \boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{0}, & j = \overline{1, S}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} N_1 \tilde{\mathbf{A}}_1 + N_2 \tilde{\mathbf{A}}_2 + \dots + N_S \tilde{\mathbf{A}}_S - \mathbf{I} = \mathbf{0}. \end{cases} \quad (8)$$

Из уравнения (7) можно найти матрицы коэффициентов:

$$\tilde{\mathbf{A}}_j = \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{K}_{X_j}^{-1}, \quad j = \overline{1, S},$$

которые зависят от матрицы неопределенных множителей  $\boldsymbol{\Lambda}$ .

Подстановка  $\tilde{\mathbf{A}}_j$  в (8) дает уравнение

$$\boldsymbol{\Lambda} (N_1 \mathbf{K}_{X_1}^{-1} + N_2 \mathbf{K}_{X_2}^{-1} + \dots + N_S \mathbf{K}_{X_S}^{-1}) = \mathbf{I},$$

из которого определяется матрица неопределенных множителей:

$$\boldsymbol{\Lambda} = (N_1 \mathbf{K}_{X_1}^{-1} + N_2 \mathbf{K}_{X_2}^{-1} + \dots + N_S \mathbf{K}_{X_S}^{-1})^{-1}.$$

Тогда матрицы коэффициентов модели (1) будут определяться по формуле

$$\tilde{\mathbf{A}}_j = \left( \sum_{v=1}^S N_v \mathbf{K}_{X_v}^{-1} \right)^{-1} \mathbf{K}_{X_j}^{-1}, \quad j = \overline{1, S}, \quad (9)$$

а модель (1) примет следующий вид:

$$\mathbf{X} = \sum_{j=1}^S \tilde{\mathbf{A}}_j \sum_{i=1}^{N_j} \mathbf{X}_{ji} = \left( \sum_{v=1}^S N_v \mathbf{K}_{X_v}^{-1} \right)^{-1} \sum_{j=1}^S \left( \mathbf{K}_{X_j}^{-1} \sum_{i=1}^{N_j} \mathbf{X}_{ji} \right). \quad (10)$$

Следует заметить, что в скалярном случае коэффициенты  $\tilde{A}_j = \frac{1/K_{X_j}}{\sum_{v=1}^S N_v/K_{X_v}}$ ,  $j = \overline{1, S}$ . Отсю-

да видно, что если все измерительные комплексы имеют одинаковую погрешность, т. е.  $K_{X_j} = K_X$ ,  $j = \overline{1, S}$ , то  $\tilde{A}_j = 1/\sum_{v=1}^S N_v = \text{const}$ . В этом случае модель (1) дает известное выражение для оценивания вектора параметров движения КА в виде среднего значения результатов измерений:

$$X = \left( \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} \right) / \left( \sum_{j=1}^S N_j \right).$$

Можно показать, что оценка (10) точнее оценок вектора параметров движения КА, полученных отдельными измерительными комплексами. Для этого необходимо найти корреляционную матрицу  $\mathbf{K}_X$  вектора  $\mathbf{X}$  и сравнить ее с матрицей

$$\mathbf{K}_{\min} = \mathbf{K}_{M_i}; \text{tr } \mathbf{K}_{M_i} = \min \{ \text{tr } \mathbf{K}_{M_1}, \text{tr } \mathbf{K}_{M_2}, \dots, \text{tr } \mathbf{K}_{M_S} \}.$$

Из формулы (5) получается выражение

$$\mathbf{K}_X = \sum_{j=1}^S N_j \tilde{A}_j \mathbf{K}_{X_j} \tilde{A}_j^T = \left( \sum_{v=1}^S N_v \mathbf{K}_{X_v}^{-1} \right)^{-1} \left( \sum_{j=1}^S N_j \mathbf{K}_{X_j}^{-1} \mathbf{K}_{X_j} \mathbf{K}_{X_j}^{-1} \right) \left( \sum_{v=1}^S N_v \mathbf{K}_{X_v}^{-1} \right)^{-1} = \left( \sum_{v=1}^S N_v \mathbf{K}_{X_v}^{-1} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Поскольку  $\mathbf{K}_{M_j} = \mathbf{K}_{X_j}/N_j$ ,  $j = \overline{1, S}$ , то

$$\mathbf{K}_X = \left( \sum_{v=1}^S \mathbf{K}_{M_v}^{-1} \right)^{-1}.$$

Пусть  $\text{tr } \mathbf{K}_{M_1} = \min \{ \text{tr } \mathbf{K}_{M_1}, \text{tr } \mathbf{K}_{M_2}, \dots, \text{tr } \mathbf{K}_{M_S} \}$  и  $\mathbf{K}_{\min} = \mathbf{K}_{M_1}$ . Тогда можно представить [13]

$$\mathbf{K}_X = \left( \mathbf{K}_{M_1}^{-1} + \sum_{v=2}^S \mathbf{K}_{M_v}^{-1} \right)^{-1} = \mathbf{K}_{M_1} - \mathbf{K}_{M_1} \left[ \mathbf{K}_{M_1} + \left( \sum_{v=2}^S \mathbf{K}_{M_v}^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} \mathbf{K}_{M_1}. \quad (12)$$

По условию задачи корреляционные матрицы  $\mathbf{K}_{X_j}$ ,  $j = \overline{1, S}$  положительно определенные [15]. Отсюда следует положительная определенность матриц  $\mathbf{K}_{M_j}$ ,  $j = \overline{1, S}$  и матрицы, являющейся вычитаемым в правой части формулы (12). Следовательно, диагональные элементы матрицы  $\mathbf{K}_X$ , являющиеся дисперсиями координат вектора  $\mathbf{X}$ , полученного по формуле (10), меньше соответствующих диагональных элементов матрицы  $\mathbf{K}_{M_1}$ , которые представляют собой дисперсии элементов вектора  $\mathbf{M}_1$ . В результате

$$\text{tr } \mathbf{K}_X < \text{tr } \mathbf{K}_{M_1}.$$

Для скалярной величины  $X$  и двух измерительных комплексов формула (12) принимает вид

$$K_X = \left( \frac{1}{K_{M_1}} + \frac{1}{K_{M_2}} \right)^{-1} = \frac{K_{M_1} K_{M_2}}{K_{M_2} + K_{M_1}}.$$

Отсюда видно, что при  $K_{\min} = \min \{ K_{M_1}, K_{M_2} \}$  выполняется неравенство

$$\frac{K_X}{K_{\min}} = \frac{K_{M_1} K_{M_2}}{K_{\min} (K_{M_1} + K_{M_2})} < 1,$$

т. е. дисперсия  $K_X$  оценки  $X$ , полученной по формуле (10), меньше дисперсий  $K_{M_1}$  и  $K_{M_2}$  оценок, полученных первым или вторым измерительным комплексом соответственно.

## ПРИМЕР КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В качестве примера рассматривается КА, параметры движения которого в заданный момент времени определены вектором состояния:

$$\mathbf{X}_3 = [2877.5 \ 6152.6 \ 144.4 \ 7.089 \ -3.432 \ 0.162]^T$$

в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) [10]. Первые три координаты вектора  $\mathbf{X}$  измеряются в километрах (км), а три другие – в километрах в секунду (км/с). Для определения вектора состояния КА используются четыре измерительных комплекса (ИК1, ИК2, ИК3, ИК4).

Точностные характеристики измерительных комплексов представлены корреляционными матрицами:

$$\mathbf{K}_{X_1} = \begin{bmatrix} 4.0000 & 0.8000 & -0.4000 & 0.0150 & 0.0300 & 0.0100 \\ 0.8000 & 4.0000 & 0.2000 & -0.0050 & 0.0120 & -0.0030 \\ -0.4000 & 0.2000 & 4.0000 & 0.0110 & 0.0030 & 0.0010 \\ 0.0150 & -0.0050 & 0.0110 & 0.0025 & 0.0004 & -0.0001 \\ 0.0300 & 0.0120 & 0.0030 & 0.0004 & 0.0025 & 0.0002 \\ 0.0100 & -0.0030 & 0.0010 & -0.0001 & 0.0002 & 0.0025 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_{X_2} = \begin{bmatrix} 9.0000 & 1.8450 & -0.9450 & 0.0349 & 0.0686 & 0.0214 \\ 1.8450 & 9.0000 & 0.4950 & -0.0101 & 0.0281 & -0.0056 \\ -0.9450 & 0.4950 & 9.0000 & 0.0236 & 0.0079 & 0.0034 \\ 0.0349 & -0.0101 & 0.0236 & 0.0056 & 0.0008 & -0.0003 \\ 0.0686 & 0.0281 & 0.0079 & 0.0008 & 0.0056 & 0.0004 \\ 0.0214 & -0.0056 & 0.0034 & -0.0003 & 0.0004 & 0.0056 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_{X_3} = \begin{bmatrix} 144.0000 & 30.9600 & -16.5600 & 0.5940 & 1.1340 & 0.3060 \\ 30.9600 & 144.0000 & 9.3600 & -0.1260 & 0.4860 & -0.0540 \\ -16.5600 & 9.3600 & 144.0000 & 0.3420 & 0.1620 & 0.0900 \\ 0.5940 & -0.1260 & 0.3420 & 0.0900 & 0.0140 & -0.0050 \\ 1.1340 & 0.4860 & 0.1620 & 0.0140 & 0.0900 & 0.0077 \\ 0.3060 & -0.0540 & 0.0900 & -0.0050 & 0.0077 & 0.0900 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_{X_4} = \begin{bmatrix} 900.0000 & 198.0000 & -108.0000 & 3.8250 & 7.2000 & 1.8000 \\ 198.0000 & 900.0000 & 63.0000 & -0.6750 & 3.1500 & -0.2250 \\ -108.0000 & 63.0000 & 900.0000 & 2.0250 & 1.1250 & 0.6750 \\ 3.8250 & -0.6750 & 2.0250 & 0.5625 & 0.0900 & -0.0338 \\ 7.2000 & 3.1500 & 1.1250 & 0.0900 & 0.5625 & 0.0506 \\ 1.8000 & -0.2250 & 0.6750 & -0.0338 & 0.0506 & 0.5625 \end{bmatrix}.$$

Единицы измерений первых трех диагональных элементов корреляционных матриц  $\mathbf{K}_{X_i}$  – метры квадратные ( $\text{м}^2$ ), а остальных элементов главных диагоналей – метры квадратные на секунду в квадрате ( $\text{м}^2/\text{с}^2$ ).

Можно заметить, что первый измерительный комплекс является наиболее точным.

С помощью датчика случайных чисел получены выборки объемами  $N_1=2$ ,  $N_2=3$ ,  $N_3=3$ ,  $N_4=4$  из нормальной совокупности с математическим ожиданием  $\mathbf{X}_3$  и корреляционными матрицами  $\mathbf{K}_{X_1}$ ,  $\mathbf{K}_{X_2}$ ,  $\mathbf{K}_{X_3}$ ,  $\mathbf{K}_{X_4}$ , имитирующие результаты измерений вектора  $\mathbf{X}$  измерительными комплексами 1, 2, 3 и 4 соответственно [16]. Они имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{11} &= [2876.3 \ 6149.2 \ 144.6 \ 7.1 \ -3.5 \ 0.2]^T; \quad \mathbf{X}_{12} = [2879.8 \ 6152.8 \ 144.9 \ 7.1 \ -3.4 \ 0.2]^T; \\ \mathbf{X}_{21} &= [2876.5 \ 6158.9 \ 144.3 \ 7.1 \ -3.4 \ 0.2]^T; \quad \mathbf{X}_{22} = [2876.9 \ 6150.1 \ 145.2 \ 7.0 \ -3.4 \ 0.3]^T; \\ \mathbf{X}_{23} &= [2875.5 \ 6155.1 \ 148.3 \ 7.0 \ -3.5 \ 0.2]^T; \\ \mathbf{X}_{31} &= [2873.2 \ 6160.7 \ 154.8 \ 7.3 \ -3.1 \ 0.4]^T; \quad \mathbf{X}_{32} = [2890.0 \ 6139.8 \ 142.8 \ 7.1 \ -3.8 \ 0.3]^T; \\ \mathbf{X}_{33} &= [2867.4 \ 6167.7 \ 136.1 \ 7.2 \ -3.4 \ -0.2]^T; \\ \mathbf{X}_{41} &= [2814.9 \ 6142.4 \ 118.3 \ 7.1 \ -3.6 \ 1.3]^T; \quad \mathbf{X}_{42} = [2892.1 \ 6135.9 \ 153.8 \ 6.5 \ -3.4 \ 0.2]^T; \\ \mathbf{X}_{43} &= [2874.3 \ 6144.5 \ 176.7 \ 5.8 \ -3.2 \ 0.9]^T; \quad \mathbf{X}_{44} = [2901.3 \ 6173.3 \ 145.0 \ 7.7 \ -2.8 \ 0.0]^T. \end{aligned}$$

На основе имеющихся данных по формуле (9) получены матрицы коэффициентов модели (1):

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0.2906 & 0.0008 & -0.0009 & 0.0312 & 0.0293 & -0.0255 \\ 0.0005 & 0.2910 & 0.0007 & 0.0202 & 0.0165 & 0.0251 \\ -0.0012 & 0.0008 & 0.2910 & -0.0231 & 0.0396 & 0.0294 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.2911 & 0.0006 & -0.0008 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0007 & 0.2907 & 0.0007 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0007 & 0.0010 & 0.2912 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0.1297 & -0.0004 & 0.0004 & -0.0151 & -0.0139 & 0.0122 \\ -0.0003 & 0.1295 & -0.0003 & -0.0096 & -0.0081 & -0.0120 \\ 0.0006 & -0.0004 & 0.1295 & 0.0111 & -0.0188 & -0.0143 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.1294 & -0.0003 & 0.0004 \\ -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0003 & 0.1296 & -0.0003 \\ 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0003 & -0.0005 & 0.1294 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0.0082 & -0.0001 & 0.0001 & -0.0044 & -0.0044 & 0.0037 \\ -0.0001 & 0.0081 & -0.0001 & -0.0030 & -0.0023 & -0.0036 \\ 0.0002 & -0.0001 & 0.0081 & 0.0033 & -0.0058 & -0.0041 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0081 & -0.0001 & 0.0001 \\ -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0001 & 0.0082 & -0.0001 \\ 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0001 & -0.0001 & 0.0081 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 0.0013 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0010 & -0.0010 & 0.0008 \\ -0.0000 & 0.0013 & -0.0000 & -0.0007 & -0.0005 & -0.0008 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0013 & 0.0007 & -0.0013 & -0.0009 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0013 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0013 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0013 \end{bmatrix}.$$

и по формуле (10) определена комплексная оценка вектора параметров движения КА, учитывающая результаты измерений, полученные всеми измерительными комплексами:

$$\mathbf{X} = [2877.3 \ 6152.5 \ 145.2 \ 7.1 \ -3.4 \ 0.2]^T.$$

Ее корреляционная матрица согласно формуле (11) имеет вид

$$\mathbf{K}_X = \begin{bmatrix} 1.1646 & 0.2358 & -0.1193 & 0.0044 & 0.0088 & 0.0028 \\ 0.2358 & 1.1646 & 0.0610 & -0.0014 & 0.0036 & -0.0008 \\ -0.1193 & 0.0610 & 1.1646 & 0.0031 & 0.0009 & 0.0004 \\ 0.0044 & -0.0014 & 0.0031 & 0.0007 & 0.0001 & -0.0000 \\ 0.0088 & 0.0036 & 0.0009 & 0.0001 & 0.0007 & 0.0001 \\ 0.0028 & -0.0008 & 0.0004 & -0.0000 & 0.0001 & 0.0007 \end{bmatrix}.$$

Сравнение величин  $\text{tr } \mathbf{K}_X \approx 3.5$  и  $\text{tr } \mathbf{K}_{M_1} = \text{tr}(\mathbf{K}_{X_1}/2) \approx 6.0$  говорит о более высокой точности оценки вектора параметров движения КА, полученной на основе модели (1), по сравне-

нию с оценкой этого вектора, полученной только по результатам измерений самого точного из используемых измерительных комплексов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взвешенный учет всей измерительной информации о параметрах движения КА, полученной наземными и бортовыми измерительными средствами, позволяет повысить точность оценивания этих параметров, причем увеличение числа даже достаточно грубых измерений, не являющихся аномальными, также способствует повышению качества оценивания. Многомерный подход к решению этой задачи позволил получить комплексную оценку вектора состояния КА и характеризующую ее точность корреляционную матрицу.

Приведенный пример наглядно демонстрирует эффективность применения предложенного алгоритма комплексного оценивания параметров движения КА различного целевого назначения.

## Список используемых источников

1. Летные испытания ракет и космических аппаратов / Е.И. Кринецкий, Л.Н. Александровская, А.В. Шаронов и др.; под ред. Е.И. Кринецкого. – М.: Машиностроение, 1979. – 464 с.
2. Системы контроля и испытания вооружения и военной техники, военная метрология [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Н. Арсеньев, А.И. Лоскутов, Г.И. Козырев и др. – Электрон. текст. дан. (3 Мб). – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 1 электр. опт. диск (CD-ROM).
3. Анализ существующей системы испытаний вооружения и военной техники на полигоне, научно-методическое обеспечение экспериментальной отработки вооружения и военной техники / В.И. Лобейко, О.В. Кислов, С.П. Литвинов и др. // Вестник воздушно-космической обороны. – 2018. – № 3(19). – С. 10–16.
4. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Р.М. Юсупов, Г.Б. Петухов, В.Н. Сидоров и др.; под ред. Р.М. Юсупова. – МО СССР, 1984. – 563 с.
5. Жилин С.И., Байкалова Т.В. Обработка неравноточных инженерно-геодезических измерений нестатистическими методами // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – № 1-1 (69). – С. 94–97.
6. Даугавет А.И., Колодяжный А.Н., Постников Е.В. Оценка оптимального размера окна сглаживания неравноточных измерений // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2008. – № 9. – С. 16–23.
7. Арсеньев В.Н. Оперативный метод идентификации параметров модели системы // Изв. вузов. Приборостроение. – 1988. – Т. 31, № 11. – С. 12–16.
8. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – 4-е изд. / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
9. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы. – М.: Радиотехника, 2008. – 328 с.
10. Механика полета: учебник / В.В. Ефимов, Ю.А. Кузьмичев, В.И. Миронов и др.; под ред. В.В. Ефимова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – Ч. 2: Системы управления космических аппаратов. – 529 с.
11. Ардашов А.А., Арсеньев В.Н., Силантьев С.Б. Метод обработки неоднородной статистической информации о характеристиках точности системы управления // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 5 (78). – С. 55–59.
12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для студ. вузов. – 9-е изд. – М.: Академия, 2003. – 576 с.

13. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. – 4-е изд. – М.: Наука, Гл. ред. физико-мат. лит., 1988. – 552 с.
14. *Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.* Оптимизация в технике. – М.: Мир, 1986. – Кн. 1. – 352 с.
15. *Арсеньев В.Н.* Метод построения статистической модели системы // Изв. вузов. Приборостроение. – 1989. – Т. 32, № 4. – С. 28–30.
16. *Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М.* MATLAB 7: программирование, численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.

А.В. Иванов  
войсковая часть № 41480

## МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОДНОПОЗИЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАДИОВОЛН

Рассмотрены факторы, влияющие на точность оценки координат источников радиоизлучения высокочастотного диапазона системами определения местоположения. Описана модель триортогональной антенны, позволяющей определять параметры полного вектора поля в одном пункте приема. Рассмотрен математический аппарат на основе алгебры кватернионов, позволяющий описать процесс распространения радиоволн произвольной поляризации в любом направлении. Предложена усовершенствованная модель системы однопозиционного определения местоположения источников радиоизлучения высокочастотного диапазона, учитывающая пространственно-поляризационные параметры радиоволн.

Ключевые слова: распространение радиоволн, триортогональная антенна, пространственно-поляризационные параметры радиоволны, кватернион.

Точность современных угломерно-дальномерных систем определения местоположения (ОМП) источников радиоизлучения (ИРИ) высокочастотного (ВЧ) диапазона не превышает 3% от дальности, что существенно ниже потенциальных возможностей и в несколько раз уступает показателям угломерных систем.

Система однопозиционного ОМП ИРИ ВЧ диапазона состоит из трех основных элементов: подсистемы определения направления прихода электромагнитной волны (ЭМВ), подсистемы измерения параметров ионосферы (обеспечения ионосферными данными), подсистемы расчета координат. Подавляющее большинство современных подсистем определения направления прихода ЭМВ основаны на измерении ее фазового фронта. Существенная доля ошибки оценки координат ИРИ вносится подсистемой расчета координат. Исходными данными подсистемы являются направление прихода волны, высота и критические частоты слоев ионосферы. Процессы, связанные с распространением радиоволн (РРВ) и обеспечением системы ионосферными данными, рассмотрены в ряде общедоступных источников [1].

Важную роль в обнаружении, приеме и обработке радиосигнала играют энергетические параметры радиолинии. Взаимосвязь между энергетическими и пространственно-поляризационными параметрами можно оценить на основе известного выражения, определяющего уровень сигнала на выходе радиоприемного устройства:

$$P_2 = P_1 + \underbrace{\eta_{\phi 1} + G_1(\theta, \varphi)}_{\text{передающая АФС}} - \underbrace{20 \lg(r_{\text{км}} \cdot f_{\text{МГц}}) - 32,4 + L}_{\text{среда распространения}} + \underbrace{G_2(\theta, \varphi) + \xi_{\text{п}}}_{\text{приемная АФС}}, \quad (1)$$

где

- $P_1$  – мощность передатчика, дБ/Вт;
- $\eta_{\phi 1}, \eta_{\phi 2}$  – коэффициенты полезного действия фидера на передающей и приемной стороне, дБ;
- $G_1(\theta, \varphi), G_2(\theta, \varphi)$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, дБ;
- $-20 \lg(r_{\text{км}} \cdot f_{\text{МГц}}) - 32,4 + L$  – потери за счет РРВ, дБ;
- $r_{\text{км}}$  – протяженность траектории РРВ, км;
- $f_{\text{МГц}}$  – частота ЭМВ, МГц;
- $\xi_{\text{п}}$  – коэффициент поляризационного рассогласования приходящей ЭМВ и антенны, дБ,  $\xi_{\text{п}} = 10 \lg \zeta_{\text{п}}$ .

В выражении (1) одним из энергетических параметров является коэффициент поляризационного рассогласования приходящей ЭМВ и антенны (рис. 1). Согласно источнику [2]

$$\zeta_{\text{п}} = \frac{1 + |q_A|^2 |q_B|^2 + 2|q_A| |q_B| \cos(\Psi_A + \Psi_B)}{(1 + |q_A|^2)(1 + |q_B|^2)}, \quad (2)$$

где

$$|q|^2 = \frac{\text{tg}^2 \alpha + K_3^2}{1 + K_3^2 \text{tg}^2 \alpha}; \quad \text{tg} \Psi = \frac{K_3^2(1 + \text{tg}^2 \alpha)}{(1 - K_3^2) \text{tg} \alpha}; \quad K_3 = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}}.$$

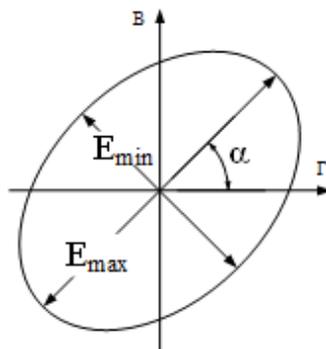


Рис. 1. К определению поляризационного рассогласования

Анализ (2) показывает, что несоответствие поляризационных характеристик антенны параметрам принимаемой ЭМВ может вносить существенные энергетические потери. Наличие этого фактора негативно влияет на точность оценки координат ИРИ и их энергетическую доступность [3]. Следовательно, с целью снижения ошибки ОМП ИРИ становится актуальным решение вопроса об уменьшении возникающих потерь, вызванных рассогласованием поляризационных параметров антенны и ЭМВ.

Техническая реализация известных антенных систем основана на применении разнесенных в пространстве элементов антенной решетки, регистрирующих, как правило, вертикальную составляющую поля приходящей радиоволны. [1] Приемные антенны рассматриваемого диапазона частот в общем случае должны быть симметричными и работать с горизонтальной поляризацией. Это снижает потери в земле; устраняет необходимость в устройстве радиотехнических заземлений и металлизаций земли; уменьшает взаимные помехи по земной волне между антеннами и в зоне, прилегающей к радиоцентрам; облегчает устройство фидеров с малым антенным эффектом. В отдельных случаях для связи при сильных ионосферных возмущениях развертывают вертикальные антенны земных волн, предусматривая и соответствующую радиоаппаратуру [1].

Повышение эффективности антенной техники по критерию поляризационной согласованности привело к созданию горизонтальных биортогональных антенн, способных регистрировать круговые виды поляризации с плоскостью, параллельной поверхности земли (рис. 2).

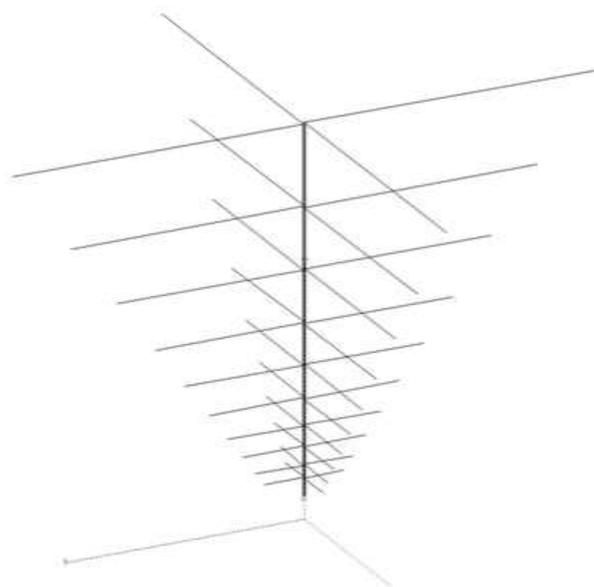
Дальнейшие исследования в области поляризационной структуры поля привели к появлению триортогональных антенн различных типов (рис. 3), регистрирующие элементы которых отличаются от горизонтальной ортогональной антенны добавлением вертикального элемента [1], как правило, в отличие от горизонтальных – несимметричного.

Такая конструктивная особенность позволила в значительной степени повысить поляризационную согласованность антенны, однако определила и ряд существенных недостатков.

Во-первых, в силу того, что горизонтальные элементы симметричны, а вертикальный – несимметричный, влияние подстилающей поверхности на электрические характеристики имеет существенные различия и добиться высокой идентичности ортогональных каналов в

требуемом диапазоне частот является задачей крайне трудоемкой и практически нерешаемой [2].

Во-вторых, направленные свойства горизонтальных антенн в значительной степени зависят от соотношения длины волны и высоты подвеса, что также значительно сужает диапазон рабочих частот.



*Рис. 2. Примеры биортогональных антенн*



*Рис. 3. Примеры триортогональных антенн*

В-третьих, расположение вертикального элемента над горизонтальными требует существенного усложнения конструктива в силу значительной высоты антенны.

Создание и широкое применение триортогональных антенн, работающих в режиме большого удлинения, позволило существенно снизить размеры антенны и высоту ее подъема.

Вместе с тем при достаточно низком расположении горизонтальных элементов направленные свойства более стабильны, однако резко возрастают потери и снижается коэффициент направленного действия антенны. Таким образом, горизонтальные антенны не позволяют в полной мере регистрировать пространственную волну с углом места менее  $50^\circ$ .

В итоге современные конструкции триортогональных антенн позволили регистрировать все компоненты поля, однако влияние земли на горизонтальные и вертикальные элементы неодинаково [1], что приводит к неидентичности каналов как по направленным свойствам, так и по входному сопротивлению антенны.

С целью устранения выявленных недостатков, в том числе проблемных вопросов обеспечения идентичности ортогональных каналов, предлагается геометрическая модель триортогональной антенны, показанная на рис. 4.



Рис. 4. Предлагаемая модель триортогональной антенны

Изделие включает три несимметричных вибратора, выполненных из полых проводников круглого сечения. Каждый вибратор располагается под углом  $45^\circ$  над подстилающей поверхностью и в горизонтальной плоскости, угол между плечами составляет  $120^\circ$ , что обеспечивает пространственную ортогональность вибраторов антенны [4].

Длина вибратора  $l$  выбрана в пределах  $l = (0,24 \div 0,25)\lambda_{min}$ , а диаметр вибратора выбирается из соображений обеспечения требуемого волнового сопротивления  $\rho = 60(\ln \frac{l}{a} - 1)$  и параметров согласующего устройства. Таким образом, достигается идентичность каналов приема при регистрации ортогональных компонент поля вне зависимости от направления прихода ЭМВ.

С целью подтверждения адекватности электрических характеристик проведено электродинамическое моделирование в системе автоматизированного проектирования MMANA-GAL (рис. 5).

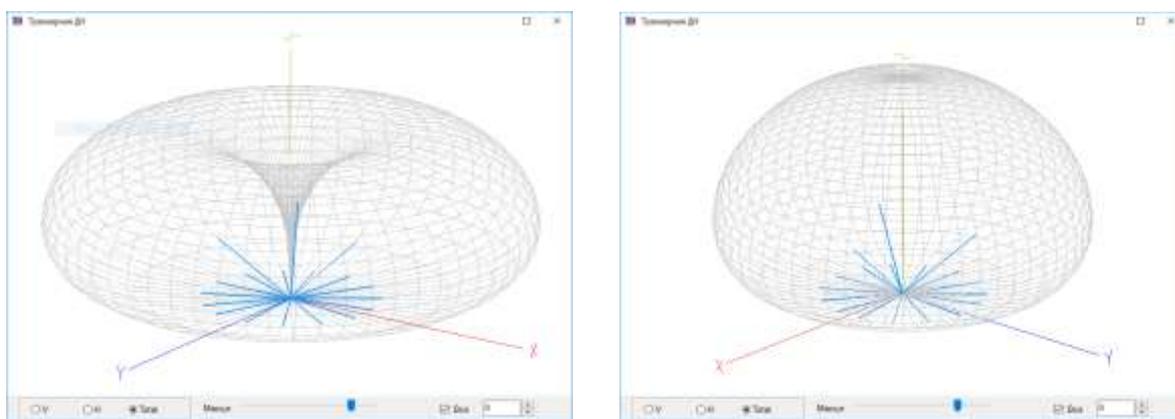


Рис. 5. Диаграммы направленности триортогональной антенны для регистрации вертикально-поляризованной волны и волны с круговой поляризацией, приходящей с зенитного направления

Из результатов исследования следует, что предлагаемый вариант исполнения антенны в полной мере обеспечивает выполнение сформулированных требований, а применение триортогональных антенн для регистрации волн ВЧ диапазона произвольной поляризации является наиболее перспективным направлением построения элементов антенных решеток.

Особенности определения параметров антенн в ВЧ диапазоне, в частности, формирование поля в дальней зоне с требуемой поляризацией, предполагают измерения на расстояниях не менее 1 км. Проведение таких измерений практически не реализуемо, особенно при формировании поля в зенитном направлении, что фактически определило выбор методики исследования на основе принципов электродинамического подобия.

Для исследования пространственно-поляризационных характеристик антенны была разработана экспериментальная установка, позволяющая произвести исследования в масштабе 1:30. Целью исследования явилось измерение амплитудно-фазовых распределений с выходов ортогональных элементов при регистрации линейной и круговой поляризации в зависимости от ориентации антенны в пространстве. В результате исследования установлено, что параметры полного вектора поля могут быть определены при измерении амплитудных и фазовых характеристик трех взаимно ортогональных проекций вектора поля.

Учитывая, что измерению подвергается изменяющийся во времени и пространстве вектор напряженности электрического поля приходящей ЭМВ, применение алгебры комплексного числа, как в случае измерения параметров фазового фронта, становится нерационально. Для решения данной задачи гораздо целесообразней применить алгебру кватернионов и дальнейшую обработку осуществлять в гиперкомплексном пространстве.

Кватернион так же, как и комплексное число, представляет собой совокупность вещественной и мнимой частей [5]. В отличие от комплексных чисел, использующих один вид мнимой единицы, в кватернионах применяются три разные мнимые единицы:  $i, j, k$ . Правила их перемножения задаются табл. 1. Элемент таблицы, находящийся на пересечении строки и столбца, является произведением мнимых единиц, обозначающих эту строку и этот столбец.

Таблица 1

### Правила перемножения мнимых единиц кватерниона

	$i$	$j$	$k$
$i$	-1	$k$	$-j$
$j$	$-k$	-1	$i$
$k$	$j$	$-i$	-1

В общем виде кватернион записывается как

$$q = q_0 + iq_x + jq_y + kq_z,$$

где  $q_0, q_x, q_y, q_z$  – коэффициенты, являющиеся произвольными вещественными числами.

Кватернион  $q = iq_x + jq_y + kq_z$ , у которого вещественная часть  $q_0 = 0$ , называется чисто мнимым или векторным кватернионом, а кватернион  $q = q_0$  называют реальным или скалярным кватернионом [5]. Используют понятия модуль  $|q|$ , модуль векторной части  $\langle q \rangle$  и аргумент кватерниона  $\arg q$ :

$$|q| = \sqrt{q_0^2 + q_x^2 + q_y^2 + q_z^2},$$

$$\langle q \rangle = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2},$$

$$\arg q = \varphi = \arctg \frac{q_0}{\langle q \rangle}.$$

Кватернион, как и комплексное число, может быть интерпретирован геометрически (рис. 6) [5, 6].

На основании преобразований Эйлера кватернион возможно представить в трех формах записи: арифметической, тригонометрической и показательной  $q = q_0 + iq_x + jq_y + kq_z = |q|(\cos \varphi + \bar{r} \sin \varphi) = |q|e^{\bar{r}\varphi}$ , где  $\bar{r}$  – ось кватерниона ( $|\bar{r}| = 1$ ),  $\bar{r} = \langle ix, jy, kz \rangle$ .

При реализации математических операций с кватернионами в показательной форме необходимо учитывать, чтобы оси кватернионов были равны [6].

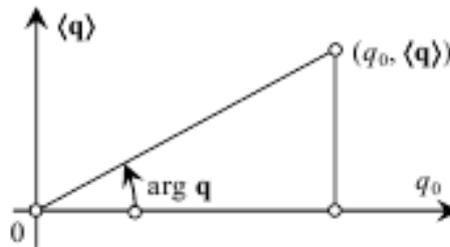


Рис. 6. Геометрическая интерпретация кватерниона

Таким образом, ЭМВ произвольной поляризации можно представить как суперпозицию двух ЭМВ, имеющих взаимно ортогональные виды поляризации. Кватернион позволяет компактно описывать вращение. Рассмотрим ЭМВ как суперпозицию волн правого и левого вращения, распространяющихся в одном направлении:

$$\begin{aligned} E_0 &= E_R + E_L, \\ E_R &= |E_R|(\cos \varphi_R + \bar{v}_R \sin \varphi_R) = |E_R|e^{\bar{v}_R \varphi_R} = R_0 + iR_x + jR_y + kR_z, \\ E_L &= |E_L|(\cos \varphi_L - \bar{v}_L \sin \varphi_L) = |E_L|e^{-\bar{v}_L \varphi_L} = L_0 - iL_x - jL_y - kL_z, \end{aligned}$$

где  $|E|$  – интенсивность напряженности электрического поля волны;

$\bar{v}$  – нормаль к плоскости поляризации,  $\bar{v} = \langle ix, jy, kz \rangle$ ;

$\varphi$  – текущая фаза волны в точке пространства,  $\varphi = \omega t - \gamma r + \varphi_0$ ;

$\gamma$  – гиперкомплексный коэффициент распространения,  $\gamma = \beta - \bar{v}\alpha$ ;

$\varphi_0$  – начальная фаза.

Наклон эллипса поляризации и коэффициент эллиптичности определяется выражениями:

$$\alpha = \frac{\varphi_R - \varphi_L}{2}; \quad K_3 = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}.$$

Амплитуды компонент  $|E_R|$  и  $|E_L|$  при  $\bar{v}_R = \bar{v}_L$  имеют вид:

$$|E_R| = \frac{|E_0|}{\sqrt{2}} \frac{1 + K_3}{\sqrt{1 + K_3^2}}; \quad |E_L| = \frac{|E_0|}{\sqrt{2}} \frac{1 - K_3}{\sqrt{1 + K_3^2}}$$

Азимут и угол места запишем в следующем виде:

$$\varphi = \text{acrtg} \frac{y}{x}; \quad \theta = \text{arctg} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Аналитическое описание ЭМВ на основе алгебры кватернионов позволяет описать волну произвольной поляризации при ее движении в любом направлении. Более того, данное представление гармонического электромагнитного поля позволяет существенно упростить задачу расчета пространственно-временных изменений поля в условиях многолучевого распространения. В результате чего, измерив ортогональные компоненты поля и определив кватернион, описывающий ЭМВ, возможно определить все параметры поляризации и направления движения ЭМВ [7].

С целью снижения ошибки, вносимой подсистемой расчета координат, предлагается внедрить полученные результаты в угломерно-дальномерные системы ОМП ИРИ ВЧ диапазона.

Структурная схема модели системы однопозиционного ОМП ИРИ ВЧ диапазона, учитывающей пространственно-поляризационные параметры ЭМВ, представлена на рис. 7.

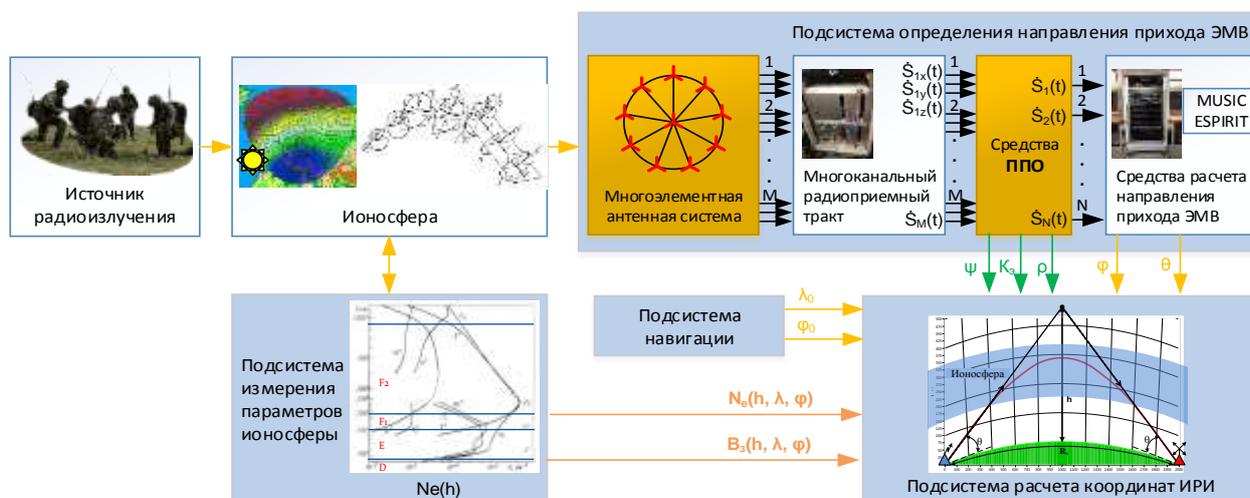


Рис. 7. Структурная схема модели системы однопозиционного ОМП ИРИ ВЧ диапазона

Новизна предлагаемой модели определяется введением в существующую модель системы однопозиционного ОМП ИРИ ВЧ диапазона элементов, реализующих измерение первичных параметров входящей ЭМВ и дальнейшую их пространственно-поляризационную обработку [8].

Таким образом, применение рассмотренного подхода при построении антенно-приемных трактов систем однопозиционного ОМП ИРИ ВЧ диапазона позволит:

- реализовать его на основе существующих приемных трактов средств однопозиционного ОМП ИРИ ВЧ диапазона;
- расширить пространство признаков о параметрах ионосферных радиоволн за счет измерения пространственно-поляризационных параметров радиоволн;
- сократить аппаратные затраты по сравнению с подходами, реализующими методы антенн различной поляризации, на измерение пространственно-поляризационных параметров ЭМВ;
- обеспечить пространственно-поляризационный согласованный радиоприем и обеспечить повышение энергетической доступности ИРИ ионосферных радиолиний ВЧ диапазона оценочно до 12 дБ.

#### Список используемых источников

1. Демичев И.В., Родин Д.В. Анализ особенностей ионосферного распространения радиоволн в декаметровом диапазоне: отчет о НИР «Цифран». Этап 2. – Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. – 67 с.
2. Муравьев Ю.К. Справочник по расчету проволочных антенн. – Л.: ВАС, 1978. – 392 с.
3. Влияние ошибки определения угла места на точность однопозиционного местоопределения / В. А. Березовский, К. А. Сидоренко, А. А. Васенина и др. // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 299–304.
4. Пат. 2649097 Российская Федерация. Антенна триортогональная / Иванов А.В., Демичев И.В., Шмаков Н.П., Колесников Р.В.; заявитель и патентообладатель Колесников Р.В., Демичев И.В. – опубл. 28.11.2016.
5. Амелькин Н.И. Кинематика и динамика твердого тела (кватернионное изложение). – М.: МФТИ, 2000. – 59 с.

6. Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / под ред. Я.А. Фурмана. – М.: Физмалит, 2004. – 456 с.
7. Демичев И.В., Шмаков Н.П., Иванов А.В. Пространственно-поляризационная обработка радиосигналов в гиперкомплексном пространстве // Научные технологии. – 2018. – №10. – С. 25–29.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Модель антенно-приемного тракта, реализующего пространственно-поляризационную обработку в ВЧ диапазоне / И.В. Демичев, А.В. Иванов, В.С. Логинов, А.П. Толстов. – № 2019612153 от 12.02.2019.

Т.О. Мысливцев,  
доктор техн. наук, доцент;  
В.И. Невзоров,  
кандидат техн. наук, доцент;  
В.Ф. Павский,  
кандидат техн. наук, доцент;  
В.Н. Цыкунов

## ДОПУСТИМЫЙ УРОВЕНЬ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

В статье рассмотрены два варианта построения антенной системы синхронизатора частоты. Допустимый уровень нестабильности частоты при пространственной синхронизации антенн. Определены необходимые условия для функционирования активных фазированных антенных решёток космического базирования.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, нестабильность частоты.

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к крупногабаритным космическим активным фазированным антенным решеткам (АФАР) космического базирования связан с потенциальной возможностью их применения в фотоэлектрических солнечных космических энергостанциях (СКЭС), осуществляющих сбор солнечной энергии в Космосе и передачу ее потребителям посредством направленного управляемого (сверхвысокочастотного) СВЧ излучения [1, 2]. Одним из вариантов такой СКЭС является АФАР, представляющая собой ансамбль идентичных активных модулей, содержащих синхронизированные по пространству полупроводниковые автогенераторы СВЧ при соосном размещении антенны синхронизатора с круглой апертурой АФАР [3] (рис.1).

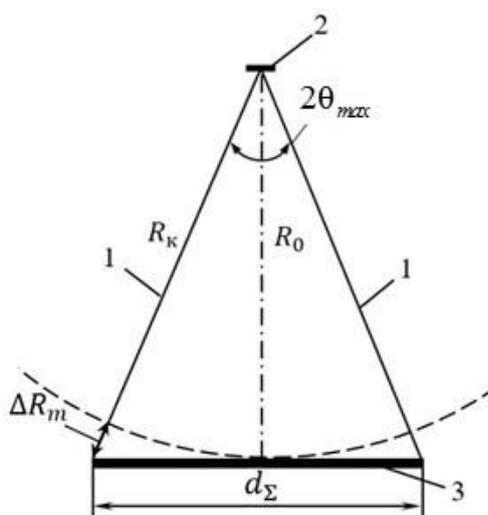


Рис.1. Взаимное расположение АФАР и антенны синхронизатора:  
1 – образующие линии диаграммы направленности излучения синхронизатора;  
2 – антенна синхронизатора; 3 – АФАР

На рисунке величины  $R_0$  и  $R_k$  – расстояния от центра антенны синхронизатора соответственно до центров центрального и крайнего активных модулей АФАР;  $2\theta_{max}$  – угловой размер полотна АФАР относительно антенны синхронизатора  $\Delta R_m = R_k - R_0$ .

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Непременным условием эффективного функционирования АФАР является синфазность возбуждения антенных излучателей активных модулей антенны, при которой максимум диаграммы направленности излучения совпадает с центральной вертикальной осью полотна антенны. При расфазировке излучателей вследствие действия дестабилизирующих факторов, и нестабильности частоты возбуждающих колебаний, положение диаграммы направленности излучения и ее структура становятся неустойчивыми. Это сказывается на работе систем наведения и удержания СВЧ луча и снижает эффективность функционирования АФАР в целом. Поэтому выработка требований к уровню допустимой нестабильности частоты излучаемых колебаний важна при разработке частотно-зависимых систем АФАР и прежде всего системы пространственной синхронизации частоты.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работе [3] рассмотрены два варианта построения антенной системы синхронизатора частоты, обеспечивающие необходимые условия для функционирования АФАР. Первый вариант построения системы обеспечивает за счет специальной формы диаграммы направленности антенны синхронизатора приблизительно одинаковые условия функционирования активных модулей всего ансамбля. Это достигается таким облучением полотна АФАР колебаниями СВЧ антенны синхронизатора, при котором мощность принятых элементами АФАР СВЧ колебаний независимо от их расположения на поверхности антенны оказывается неизменной, и соответственно коэффициент усиления синхронизированных автогенераторов и полоса синхронизации остаются также неизменными. Второй вариант построения предполагает использование антенны синхронизатора с круглой апертурой при условии превышения диаметром апертуры длины волны излучаемых колебаний и обеспечении равенства коэффициента усиления автогенераторов на краю АФАР коэффициенту усиления АФАР первого варианта. В этом случае происходят уменьшение коэффициента усиления и расширение полосы синхронизации автогенераторов к центру полотна АФАР. Однако мощность излучения антенны синхронизатора используется менее рационально.

В рассматриваемой системе роль системы разводки СВЧ синхросигнала для синфазного возбуждения излучателей АФАР выполняет направленное в пространстве СВЧ излучение источника синхросигнала. Фаза синхросигнала, принимаемого антеннами активных модулей СВЧ, зависит от расстояния  $R$  от антенны синхронизатора до единичного излучателя АФАР, которое увеличивается от центра антенны к ее периферии. При этом наибольшая разность фазового набега достигается между излучателями крайнего и центрального активными модулями АФАР. Влияние нестабильности частоты источника синхросигнала проявляется при возникновении неконтролируемых изменений фазовых сдвигов синхросигнала, поступающего в автогенераторы и вносящего в его колебательную систему дополнительные реактивные и активные сопротивления. Это приводит к изменению фазочастотных и амплитудно-частотных характеристик синхросигнала, влияющих на процесс формирования излучаемых АФАР СВЧ колебаний, и сопровождается появлением дополнительного фазового сдвига в цепи синхронизации. Таким образом, суммарный фазовый сдвиг в цепи синхронизации при вариации частоты источника синхросигнала в основном складывается из фазового сдвига

при распространении СВЧ излучения в пространстве и фазового сдвига колебаний в автогенераторе. Поскольку источником нестабильности частоты является автогенератор модуля, то отмеченные выше сдвиги фазы оказываются коррелированными и суммарный фазовый сдвиг составит

$$\varphi_c = \varphi_\Sigma + \varphi_{r1}, \quad (1)$$

где  $\varphi_\Sigma$  – фазовый набег в пространстве;

$\varphi_{r1}$  – фазовый сдвиг в единичном автогенераторе.

Из рис.1 следует, что наибольшая разность фазового набега в пространстве составляет  $\varphi_{\Sigma m} = 2\pi\Delta R_m / \lambda_c$ , где  $\lambda_c$  – длина волны синхронизирующих колебаний.

Изменение фазового набега  $\varphi_{\Sigma m}$  на расстоянии  $\Delta R_m$  при вариации частоты синхросигнала  $f_c$  на величину  $\Delta f_c$ , выраженное через относительную нестабильность частоты  $\delta_f = \Delta f_c / f_c$ , будет

$$\Delta\varphi_{\Sigma m} = 2\pi\Delta R_m \delta_f / \lambda_c. \quad (2)$$

Входящая в формулу (2) величина  $\Delta R_m$  зависит от взаимного расположения в пространстве АФАР и антенны синхронизатора, которое определяется их электрическими, радиотехническими и конструктивными параметрами.

Изменение фазового сдвига  $\Delta\varphi_{r1}$  в единичном автогенераторе активного модуля, обусловленного эффектом затягивания частоты [3] и выраженного также через величину  $\delta_f$  составит

$$\Delta\varphi_{r1} = 0,4\delta_f k_f k_{c1}^{0,5} / (1 - A_c). \quad (3)$$

Здесь  $k_f = f_c / F_{0,2}$ , где  $F_{0,2}$  – коэффициент затягивания частоты единичного автогенератора активного модуля;

$k_{c1}$  – коэффициент усиления синхронизируемого автогенератора;

$A_c$  – отношение расстройки резонансной частоты автогенератора относительно частоты  $f_c$  к допустимому значению при вариации величины  $\Delta f_{cr1}$  в пределах  $0 - \Delta f_{cr1\text{доп}}$ ,  $A_c = \Delta f_{cr1} / \Delta f_{cr1\text{доп}}$ .

В соответствии с рис.1 величина  $\Delta R_m$ , выраженная через диаметр АФАР  $d_\Sigma$ , для первого варианта построения системы будет

$$\Delta R_m = 0,5d_\Sigma (1 - \cos \theta_{\max}) / \sin \theta_{\max} \quad (4)$$

или

$$\Delta R_m = 0,5d_\Sigma [1 - \cos(0,5\lambda_c / d_c)] / \sin(0,5\lambda_c / d_c), \quad (5)$$

где  $d_c$  – диаметр антенны синхронизатора.

Для второго варианта –

$$\Delta R_m = [\sec(0,5\lambda_c / d_c) - 1] d_c d_\Sigma / \lambda_c. \quad (6)$$

Формулы (4)–(6) в совокупности с формулами (1)–(3) позволяют определить для вариантов системы допустимый уровень относительной нестабильности частоты синхронизато-

ра  $\delta_{f_{доп}} = \Delta f_{сдоп} / f_c$  по заданному допустимому значению уровня допустимой фазовой нестабильности  $\Delta\varphi_{сдоп}$ .

Допустимая относительная нестабильность частоты синхронизатора для первого варианта системы составит

$$\delta_{f_{доп}} = \Delta\varphi_{сдоп} \left\{ \frac{\pi [1 - \cos(0,5\lambda_c / d_c)] d_\Sigma}{\sin(0,5\lambda_c / d_c) \lambda_c} + 0,4k_f k_{c1}^{0,5} / (1 - A_c) \right\}^{-1}, \quad (7)$$

для второго

$$\delta_{f_{доп}} = \Delta\varphi_{сдоп} \left\{ \frac{2\pi [\sec(0,5\lambda_c / d_c) - 1] d_\Sigma d_c}{\lambda_c^2} + 0,4k_f k_{c1}^{0,5} / (1 - A_c) \right\}^{-1}. \quad (8)$$

Соотношения (7) и (8) связывают величину допустимой нестабильности частоты синхронизатора, при которой еще обеспечивается допустимая несинфазность (с точностью до  $\pm\Delta\varphi_{сдоп}$ ) возбуждения антенных излучателей активных модулей АФАР, с ее конструктивными и радиотехническими параметрами, позволяя в зависимости от параметров и величины  $\Delta\varphi_{сдоп}$  предъявить требования к величине  $\delta_{f_{доп}}$ . Что дает также возможность оценить вклад в величину  $\delta_{f_{доп}}$  при  $\Delta\varphi_{сдоп} = \text{const}$ , влияние фазового набега в пространстве (2) и электрического фазового сдвига в автогенераторе (3).

На рис.2 и 3 в качестве иллюстрации приведены графики зависимости  $\delta_{f_{доп}}$  от величины  $\lambda_c / d_\Sigma$  для  $\Delta\varphi_{сдоп} = \pi / 8$  при коэффициентах  $k_f = 30$ ,  $k_c = 25$  дБ, значениях  $A_c = 0$  и  $A_c = 0,75$ . Для первого варианта системы задан диаметр антенны синхронизатора  $d_c = 0,5\lambda_c$  (рис.2), для второго варианта  $d_c = 2\lambda_c$  (рис.3). Штриховой линией на рисунках показаны зависимости без учета составляющей, обусловленной фазовым сдвигом в автогенераторе и определяемой только фазовым набегом в пространстве.

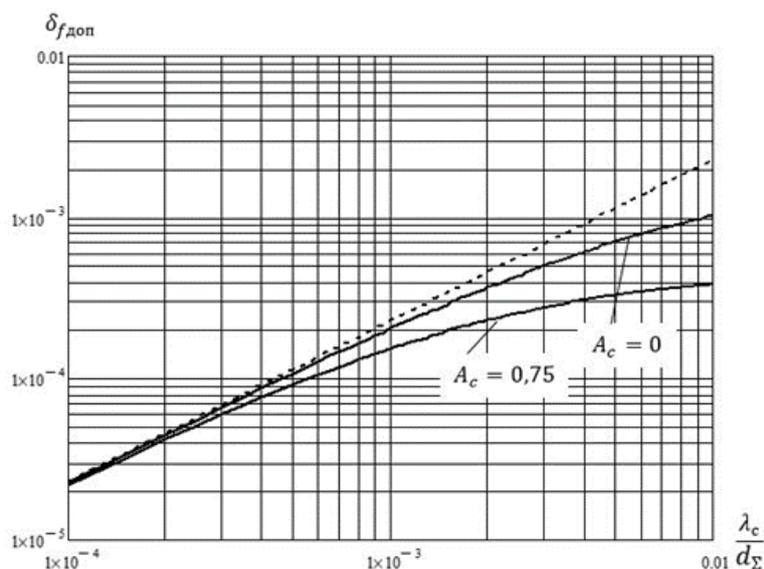


Рис.2. Зависимость величины  $\delta_{f_{доп}}$  от  $\lambda_c / d_\Sigma$  для первого варианта системы синхронизации частоты

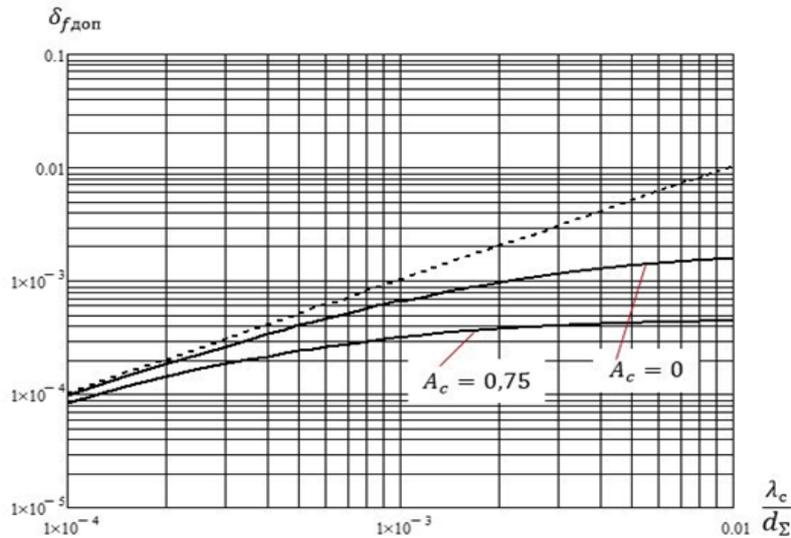


Рис.3. Зависимость величины  $\delta_{f_{доп}}$  от  $\lambda_c / d_\Sigma$  для второго варианта системы синхронизации частоты

На рис.4 для наглядности сравнения показаны зависимости  $\delta_{f_{доп}}(\lambda_c / d_\Sigma)$  для обоих вариантов при  $A_c = 0$ . Сравнение зависимостей, показанных на рис. 2–4, свидетельствует об общих закономерностях рассмотренных вариантов систем синхронизации частоты. В обоих случаях при  $\lambda_c = \text{const}$  с уменьшением величины  $\lambda_c / d_\Sigma$ , т.е. с ростом диаметра  $d_\Sigma$ , возрастает требование к стабильности частоты синхросигнала (снижается допустимый уровень допустимой относительной нестабильности частоты  $\delta_{f_{доп}}$ ). При этом в правой части графиков определяющими в величине  $\delta_{f_{доп}}$  являются требования по стабильности частоты, предъявляемые к электрическому фазовому сдвигу в синхронизируемом автогенераторе активного модуля. В левой части графиков определяющими являются требования к фазовому набегу в пространстве.

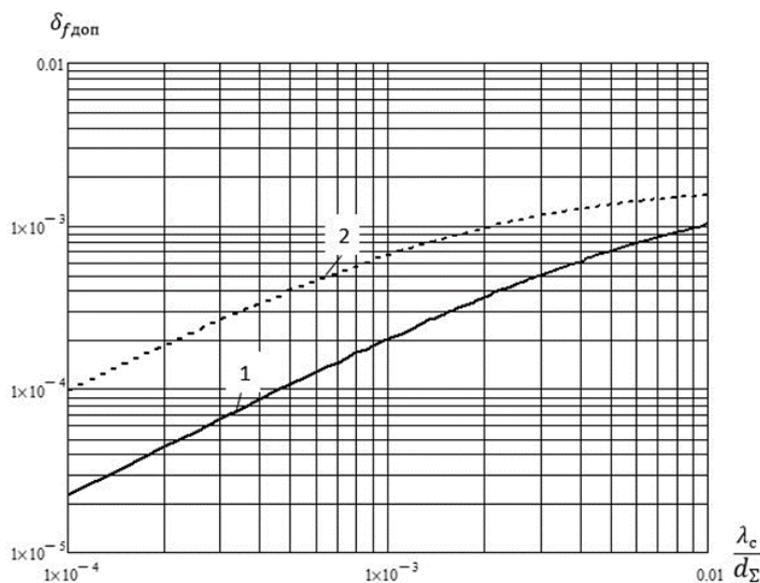


Рис.4. Зависимость величины  $\delta_{f_{доп}}$  от  $\lambda_c / d_\Sigma$  для первого (1) и второго (2) вариантов систем синхронизации частоты при  $A_c = 0$

Также важна величина критерия расстройки резонансной (собственной частоты) автогенератора модуля относительно частоты синхросигнала ( $A_c$ ), влияние которого наиболее существенно в правой части графиков. Различие в численных значениях  $\delta_{\text{доп}}$  для рассматриваемых вариантов систем связано с минимальным расстоянием  $R_0$  между антеннами. Для первого варианта это расстояние и соответственно угол  $2\theta_{\text{max}}$  определяются углом раствора диаграммы направленности крайних излучателей активных модулей в АФАР. Во втором варианте  $R_0$  определяется углом раствора диаграммы направленности антенны синхронизатора, который в данном случае меньше угла  $2\theta_{\text{max}}$ . Поэтому при  $d_\Sigma = \text{const}$  в первом варианте антенна синхронизатора будет расположена ближе к полотну АФАР, расстояние  $\Delta R_m$  и фазовый набег  $\Delta\varphi_{\Sigma m}$  (2) больше. Соответственно при заданной допустимой величине фазового набега значение  $\delta_{\text{доп}}$  оказывается ниже.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные материалы свидетельствуют о том, что предлагаемая методика может быть использована при обосновании требований к устройствам генерирования частоты при пространственной синхронизации крупногабаритных АФАР.

## Список используемых источников

1. Грилихес В.А. Космические солнечные энергостанции. – Л.: Наука, 1986. – 182 с.
2. Грилихес В.А., Добров В.А., Павский В.Ф. Система преобразования солнечной энергии в управляемое СВЧ излучение для космических энергостанций, передающих энергию на Землю // Международная конференция «Возобновляемая энергетика: состояние, проблемы, перспективы»: сборник докладов. – СПб., 2003. – С. 208–211.
3. Особенности частотной синхронизации крупногабаритной активной фазированной антенной решетки космического базирования / К.В. Бакурский, Т.О. Мысливцев, В.И. Невзоров, В.Ф. Павский // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 660. – С. 132–138.

В.Ф. Алексеев,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
А.В. Прокофьев,  
*кандидат техн. наук;*  
И.В. Чернов,  
*кандидат техн. наук;*  
В.И. Якунин,  
*кандидат техн. наук, доцент;*

## ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ КАЧЕСТВА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УДАЛЕННОГО РАЙОНА

Для оценивания целевых свойств процесса геодезической подготовки районов в статье предложен комплексный показатель результативности геодезической подготовки, одновременно учитывающий объем геодезических работ и точность получения геодезических данных. Указанный подход позволяет осуществить выбор методов геодезической подготовки удаленного от границ России района.

В статье обосновывается необходимость учета свойства автономности методов геодезической подготовки удаленной от границ России территории. Для полноты учета свойства автономности при геодезической подготовке удаленных районов предложен подход для расчета показателя автономности методов геодезической подготовки. Также предложен критерий оценивания пригодности методов геодезической подготовки по показателю автономности.

Ключевые слова: метод автономного определения геодезических данных, автономность геодезической подготовки района, погрешность геодезических данных, результативность геодезического обеспечения.

### ВВЕДЕНИЕ

Современная военно-политическая обстановка характеризуется усилением глобальной конкуренции, напряженности в различных областях межгосударственного и межрегионального взаимодействия. Происходит поэтапное перераспределение влияния в пользу новых центров экономического роста и политического притяжения. На фоне этого остаются неурегулированными многие региональные конфликты. Сохраняются тенденции к их силовому разрешению, в том числе в регионах, граничащих с Российской Федерацией. Существующая архитектура (система) международной безопасности не обеспечивает равную защищенность государств.

Несмотря на снижение угрозы развязывания против Российской Федерации крупномасштабной войны, на ряде направлений военные опасности возрастают. Одной из них является растущая угроза глобального экстремизма (терроризма) и его новых проявлений: реальная угроза проведения терактов с применением радиоактивных и токсичных химических веществ, расширение масштабов транснациональной организованной преступности, прежде всего незаконного оборота оружия и наркотиков. Совокупность указанных факторов способна при определенных условиях привести к возникновению военной угрозы в виде создания и подготовки к ведению боевых действий незаконных вооруженных формирований, их деятельности на территории Российской Федерации или на территориях ее союзников.

В целях защиты интересов Российской Федерации и ее граждан, поддержания международного мира и безопасности формирования Вооруженных Сил (далее войск) могут оперативно использоваться за пределами Российской Федерации.

Наглядным примером является операция Воздушно-космических сил в Сирийской Арабской Республике, проводимая на удаленной от границ России территории. Проведение опе-

раций в таких районах осложнено отсутствием заблаговременной подготовки этой территории к ведению боевых действий, в том числе и отсутствием заблаговременной геодезической подготовки района (ГПР).

Заблаговременная подготовка удаленного района в топогеодезическом отношении в большинстве случаев невозможна. Следовательно, одним из важнейших этапов ГПР, удаленного от территории РФ, является установление системы координат, ее распространение по обеспечиваемой территории и определение исходных астрономо-геодезических данных (ИАГД), таких как азимуты и дирекционные углы, плановые координаты и высоты и т.д. К их определению могут предъявляться различные требования по точности, исходя из планируемых к применению систем вооружения. Как следствие для определения одних и тех же ИАГД могут применяться различные методы ГПР (полигонометрия, засечки, инерциальная геодезия, астрономические методы, гироскопические методы и др.). В результате актуальной становится задача выбора метода геодезической подготовки удаленного района.

Для решения данной задачи требуется обосновать показатели качества процесса ГПР и критерий оценивания пригодности метода ГПР.

## ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ РАЙОНА

Требования к качеству ИАГД определяются следующей системой неравенств [2, 3]:

$$\begin{cases} n \geq n^T \\ m \leq m^\partial \\ \tau \leq \tau^\partial \end{cases}, \quad (1)$$

где  $n$  – число определенных ИАГД;  
 $m$  – погрешность ИАГД;  
 $\tau$  – затраты времени на определение ИАГД;  
 $n^T$  – требуемое (минимально допустимое) число ИАГД;  
 $m^\partial$  – директивные (максимально допустимые) значения величины погрешности;  
 $\tau^\partial$  – директивные затраты времени на определение ИАГД.

В задаче оценивания ГПР формализация показателей затрат операционных ресурсов  $c$  и времени  $\tau$  не вызывает затруднений. Сложности возникают при описании показателя целевого эффекта  $v^*$ . Это обусловлено тем, что в системе неравенств (1) целевой эффект (ЦЭ) описывается двумя компонентами: числом  $n$  ИАГД, характеризующим объем ЦЭ, и величиной  $m$  погрешности определения ИАГД, характеризующей качество ЦЭ. Число  $n$  и величина  $m$  погрешности данных отражают разные аспекты ЦЭ и имеют разную размерность. Как следствие возникает задача представления целевого эффекта при определении ИАГД в виде комплексного показателя  $v^*$  целевого эффекта.

Для представления комплексного показателя ЦЭ необходимо отдельно выразить возможные качество (точность, характеризующуюся погрешностью  $m$ ) и объем (количество) ЦЭ, т.е. число качественно определенных ИАГД. Пусть в ходе выполнения ГПР необходимо решить  $k$  взаимно независимых задач по определению ИАГД. Например, определение азимутов направлений, определение плановых координат и определение высот. В этом случае величину  $v_i$  показателя точности (свойства ЦЭ), которую будем оценивать величиной возможной относительной (относительно предъявленных требований) погрешности, при решении  $i$ -ой задачи по определению ИАГД представим в виде

$$v_i = \begin{cases} \frac{m_i}{m_i^\partial}, m_i \leq m_i^\partial; \\ 0, m_i > m_i^\partial, \end{cases} \quad i = 1(1)k, \quad (2)$$

где  $m_i$  – возможная (полученная) погрешность определения ИАГД при решении  $i$ -й задачи;

$m_i^\delta$  – требуемая (максимально допустимая) погрешность определения ИАГД при решении  $i$ -й задачи.

По аналогии представим величину  $v_i$  объема (количества) целевого эффекта при решении  $i$ -й задачи в виде относительного числа полученных ИАГД:

$$v_i = \begin{cases} \frac{n_i}{n_i^T}, n_i < n_i^T \\ 1, n_i \geq n_i^T \end{cases}, \quad i = 1(1)k, \quad (3)$$

где  $n_i$  – возможное (или полученное) число ИАГД для решения  $i$ -й задачи;

$n_i^T$  – требуемое для решения  $i$ -й задачи число ИАГД.

Естественно предположить, что если ГПР будет осуществлена с качеством, удовлетворяющим самые жесткие требования к ИАГД, то качество ГПР будет пригодно и для решения всех остальных задач. Тогда, целесообразно величину  $v$  возможного относительного объема целевого эффекта задачи с самыми жесткими требованиями представить в виде

$$v = \begin{cases} \frac{n}{n^T}, n < n^T \\ 1, n \geq n^T \end{cases}, \quad (4)$$

а величину  $v$  возможной относительной погрешности при решении данной задачи по определению ИАГД записать как

$$v = \begin{cases} \frac{m}{m^\delta}, m \leq m^\delta \\ 0, m > m^\delta \end{cases}. \quad (5)$$

Используя выражения (4) и (5) получим комплексный показатель достижения целевого эффекта целенаправленного процесса (ЦнП) ГПР

$$v^* = \sum_{i=1}^k \rho_i v_i v_i, \quad (6)$$

где  $v^*$  – показатель достижения целевого эффекта ЦнП ГПР;

$\rho_i$  – коэффициент важности решения  $i$ -й задачи,  $\sum_{i=1}^k \rho_i = 1$ ;

$v_i$  – показатель величины возможной относительной погрешности при решении  $i$ -ой задачи определения ИАГД;

$v_i$  – показатель величины относительного объема (количества) ЦЭ при решении  $i$ -й задачи,  $\sum_{i=1}^k v_i = 1$ .

Визуализация зависимости показателя целевого эффекта геодезической подготовки района от погрешности определения ИАГД и от числа определенных ИАГД приведена на рис. 1.

Общая формализация величин показателей качества результатов ЦнП ГПР в случае параллельного решения совокупности  $k$  задач имеет вид

$$\begin{cases} v^* = \sum_{i=1}^k \rho_i v_i v_i \\ \tau^* = \max_i \{ \tau_1, \dots, \tau_k \}, \\ c^* = \sum_{i=1}^k \gamma_i c_i \end{cases}, \quad (7)$$

где  $\tau^*$ ,  $c^*$  – показатели затрат операционного времени и затрат операционных ресурсов;  
 $\gamma_i$  – стоимость единицы ресурса, необходимой для решения  $i$ -ой задачи;  
 $c_i$  – число ресурсов, необходимых для выполнения  $i$ -й задачи.

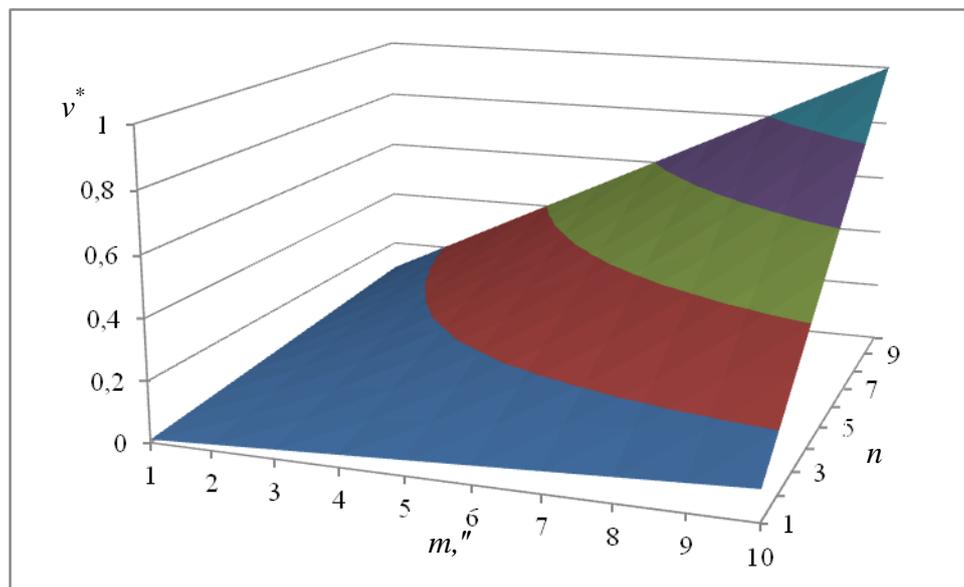


Рис. 1. Зависимость показателя целевого эффекта геодезической подготовки района от погрешности определения ИАГД и от числа определенных ИАГД при  $m^{\delta}=10''$ ,  $n^T=10$ ,  $k=1$

При последовательном решении совокупности  $k$  задач общая формализация показателей качества результатов ЦнП ГПР имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} v^* = \sum_{i=1}^k \rho_i v_i \\ \tau^* = \sum_{i=1}^k \tau_i \\ c^* = \sum_{i=1}^k \gamma_i c_i \end{array} \right. \quad (8)$$

Поскольку можно предположить, что при проведении операции ГПР расходуются все выделенные для ее выполнения ресурсы  $c^*$ , то вектор  $\langle v, v, \tau \rangle$  показателей качества результатов ГПР является функцией выделенных и расходуемых ресурсов, т.е.  $\langle v, v, \tau \rangle = \langle v(c^*), v(c^*), \tau(c^*) \rangle$ , следовательно имеет место эффект поглощения по ресурсам [2].

### ПРИМЕР РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ РАЙОНА

Рассмотрим пример расчета показателей качества ГПР со следующими исходными данными:

- для геодезической подготовки удаленного района поставлено две задачи ( $k=2$ ) по определению азимутов направлений;
- обе задачи равно важны ( $\rho_1=\rho_2=0,5$ );
- для решения первой задачи необходимо определить 10 азимутов направлений ( $n_1^T=10$ ) с погрешностью не хуже  $5''$  ( $m_1^{\delta}=10$ );

– для решения второй задачи необходимо определить азимуты трех направлений с погрешностью не хуже  $2''$  ( $n_2^T=3, m_2^{\circ}=2$ ).

Пусть для реализации ГПР доступны три метода определения азимута: астрономический, позволяющий достигнуть определения азимута с погрешностью  $m_a \in [2, 60]$ , гироскопический ( $m_{\Omega} \in [2, 60]$ ) и геодезический ( $m_g \in [3, 60]$ ).

Рассмотрим три варианта ГПР, первый вариант будет реализовываться астрономическим методом, второй гироскопическим и третий соответственно геодезическим. Пусть все варианты реализуются до полного решения задач. С помощью формул (2), (3) и (6) будут получены показатели целевого эффекта ГПР при использовании: астрономического метода  $v_a^*=1$ , гироскопического метода  $v_{\Omega}^*=1$  и геодезического метода  $v_g^*=0,5$ . Так как показатель результативности при использовании геодезического метода низкий, дальнейшие расчеты целесообразно продолжить для вариантов реализации ГПР астрономическим и гироскопическим методами.

Пусть для обеспечения погрешности не хуже заданной в первой задаче потребуется 6 часов астрономических наблюдений. Для обеспечения погрешности не хуже заданной во второй задаче для астрономических наблюдений необходимо затратить около 12 часов. Учитывая заданное число азимутов затраты времени для решения первой задачи составят 48 часов, для решения второй задачи 36 часов. Значит затраты операционного времени для реализации ГПР астрономическим методом составят  $\tau_a^*=48$  часов.

Длительность одного приема измерений гироскопическим методом составляет примерно один час. Для обеспечения погрешности не хуже заданной в первой задаче достаточно выполнить два приема измерений гиротеодолитом типа ГТ-3 или Ги-БЗ. Для обеспечения погрешности не хуже заданной во второй задаче необходимо выполнить четыре приема наблюдений гиротеодолитом типа ГТ-3. Учитывая заданное число азимутов затраты времени для решения первой задачи составят 10 часов, для решения второй задачи 12 часов. Значит затраты операционного времени для реализации ГПР гироскопическим методом составят  $\tau_{\Omega}^*=22$  часа.

Предположим, что при выполнении каждой операции ГПР расходуются все выделенные для ее проведения ресурсы  $c^*$  и во всех вариантах решения задач ГПР планируется использовать равное число расчетов с однотипным оснащением. Тогда затраты операционных ресурсов для всех вариантов реализации ГПР будут равны  $c^*=c_a^*=c_{\Omega}^*$ .

Можно сделать вывод, что для реализации геодезической подготовки района, с учетом имеющихся условий, следует выбрать гироскопический метод определения азимутов направлений.

## **ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ КРИТЕРИЯ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА МЕТОДА ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ РАЙОНА ПО ПОКАЗАТЕЛЮ АВТОНОМНОСТИ**

Определение ИАГД производится в рамках топогеодезического обеспечения (ТГО). ТГО является комплексом мероприятий, а также организационной и практической деятельностью [6]. Значит, ТГО является целенаправленным процессом [2]. Целенаправленным процессом (ЦНП) будет являться и составная часть ТГО – ГПР.

Поскольку выполнение задания по ГПР может реализовываться различными методами и их комбинациями, актуальной является задача выбора методов ГПР. Выбор необходимо основывать на результатах анализа свойств методов ГПР. Геодезическая подготовка удаленного района должна обеспечивать высокую оперативность и точность определения ИАГД. Кроме того, сложность решения задачи оценивания качества методов ГПР связана с возможностью применения средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), а также полного либо периодического закрытия (перекодирования), либо загробления (искажения) сигналов глобальных

навигационных спутниковых систем (ГНСС). Как следствие, на удаленной территории исключается возможность получения измерительной геодезической информации по радиоканалам, что неизбежно накладывает ограничение на использование методов определения ИАГД, применяемых при ГПР.

Таким образом, для оценивания качества метода геодезической подготовки удаленного района кроме операционных свойств (результативность, оперативность и ресурсоемкость) [2, 7] необходимо учесть свойство «автономности» методов определения ИАГД. Поэтому становится актуальной задача описания свойства и показателя автономности методов определения ИАГД, а также разработки критериев оценивания уровня автономности методов ГПР.

Очевидно, полная независимость результатов ЦнП от внешней информации (полная автономность) позволяет обеспечивать требуемый уровень результативности процесса ГПР. Отчасти эта связь подобна связи между ресурсоемкостью и оперативностью. Например, если для достижения целевого эффекта необходима внешняя измерительная информация, то при отсутствии каналов связи для получения внешней информации, требуемый уровень целевого эффекта недостижим. Это позволяет представить свойство автономности метода как обеспечивающее достижимость требуемого уровня результативности процесса ГПР. Однако существует совокупность требований, которым должен удовлетворять показатель качества ЦнП (операции). Такими требованиями являются [1, 2, 8]:

- адекватность показателя решаемой системой задаче, т.е. соответствие цели операции;
- чувствительность показателя к изменению значений параметров модели;
- полнота учета основных факторов, влияющих на качество результатов ЦнП;
- стохастичность, позволяющая учесть априорную неопределенность условий проведения операции;
- по возможности, простота процедуры определения значений показателей.

В связи с этим для оценивания качества процесса ГПР, удаленных от границ РФ, целесообразно выделить «автономность» в отдельное свойство методов определения ИАГД.

Под автономностью будем понимать свойство целенаправленного процесса – процесса определения ИАГД, которое характеризуется зависимостью качества результатов процесса (и прежде всего целевого эффекта) от внешней информации [9], необходимой для достижения целевого эффекта. В качестве показателя автономности, целесообразно принять относительный объем (количество) внешней информации (относительно всего объема информации, потребной для решения задачи определения ИАГД с требуемым качеством). Пусть показатель  $\beta$  (количественная оценка) автономности характеризует относительное количество внешней информации  $I_{ВН}$ , необходимой для достижения целевого эффекта  $v^*$  операции (выполнения задачи).

Если принять каждую определяемую величину (входные данные, необходимые для решения  $i$ -ой задачи – углы, расстояния, время, координаты и т.д.) за единицу информации, то целесообразно в качестве показателя  $\beta_i$  автономности метода ГПР выбрать отношение количества внешней информации  $I_{ВНi}$ , необходимой для решения  $i$ -ой задачи, к полной входной информации  $I_i$

$$\beta_i = \frac{I_{ВНi}}{I_i}. \quad (9)$$

Показатель  $\beta$  автономности независим от последовательности решения каждой из совокупности  $k$  задач, так как только качественное решение всех  $k$  задач обеспечит достижение требуемого уровня целевого эффекта. Тогда, как в случае параллельного, так и в случае последовательного решения совокупности  $k$  задач определения ИАГД показатель  $\beta$  автономности метода ГПР примет вид

$$\beta = \min_i \{ \beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_k \}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что если удовлетворены требования к качеству исходных данных для решения  $i$ -ой задачи, предъявляющей самые жесткие требования к качеству ИАГД (а, следовательно, и к объему  $I_{ВНi}$  внешней информации), то решение остальных задач будет обеспечено.

Для обеспечения свойства автономности, соответствующего условиям геодезической подготовки на территории удаленной от границ РФ, первым этапом оценивания качества ГПР целесообразно принять оценивание показателя автономности методов ГПР по критерию пригодности  $G$  [2, 7]. В этом случае общий вид критерия оценивания пригодности метода ГПР

$$G : B \in \{B^{\partial}\} \equiv [(\beta_1 \leq \beta_1^{\partial}) \cap (\beta_2 \leq \beta_2^{\partial}) \cap \dots \cap (\beta_k \leq \beta_k^{\partial})], \quad (11)$$

где  $B^{\partial}$  – область допустимых значений величины автономности;  
 $\beta_i^{\partial}$  – предельно допустимое значение  $i$ -ого показателя  $\beta_i$  автономности.

### ПРИМЕР ОЦЕНИВАНИЯ ПРИГОДНОСТИ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКОГО АЗИМУТА

Пусть требуется произвести геодезическую подготовку удаленного района: решить задачу по определению астрономического азимута со средней квадратической погрешностью (СКП) 3". Пусть доступны два метода определения азимута: гироскопический и геодезический. Необходимо оценить пригодность каждого метода определения астрономического азимута для применения в удаленном районе. Задано предельно допустимое значение показателя автономности  $\beta^{\partial} = 0,5$ .

Для реализации геодезического метода необходимо проложить систему из трех угловых или полигонометрических ходов с узловыми точками от шести исходных пунктов и осуществить переход от дирекционного угла к астрономическому азимуту. Исходными данными будут являться плановые координаты шести исходных пунктов и составляющие уклонения отвесной линии в первом вертикале и меридиане. Так как в процессе реализации геодезического метода определения азимута перечисленные величины не определяются их следует отнести к внешней информации  $I_{ВН} = 8$ . Измеренными величинами будут горизонтальные направления, вертикальные углы и расстояния между исходными и определяемыми пунктами. Входная информация будет представлена суммой внешней информации и информации полученной из измерений  $I = 11$ . Тогда показатель автономности геодезического метода составит  $\beta = 8/11 = 0,73$ .

В качестве исходных данных для реализации гироскопического метода используются значения широты места установки гиротеодолита и его приборная поправка ( $I_{ВН} = 2$ ). Для реализации гироскопического метода определения астрономического азимута с СКП 3" необходимо определить направление астрономического меридиана и измерить горизонтальное направление минимум двумя гиротеодолитами ( $I = 6$ ). Тогда по аналогии с геодезическим методом, показатель автономности гироскопического метода составит  $\beta = 2/6 = 0,33$ .

Можно сделать вывод, что геодезический метод определения астрономического азимута непригоден для реализации в заданных условиях. В качестве метода ГПР следует принять гироскопический метод.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен комплексный показатель результативности ГПР, одновременно учитывающий объем геодезических работ и точность получения ИАГД, а также показатели затрат операционного времени и затрат операционных ресурсов. Указанный подход позволяет

осуществить обоснованный выбор метода ГПР, удаленного от границ РФ, который удовлетворяет предъявляемым к его качеству требованиям.

Для учета условий автономности при выборе метода ГПР предложен подход к определению показателя автономности метода геодезической подготовки удаленного от границ РФ района. Также приведен критерий оценивания пригодности методов геодезической подготовки по показателю автономности. Его применение рассмотрено на примере оценивания пригодности двух методов определения азимута при ГПР.

### Список используемых источников

1. Готюр И.А., Прохоренко П.А. Модель космической системы гидрометеорологического обеспечения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. 656. – С. 57–67.

2. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.

3. Методика обоснования характеристик аппаратуры и требований к навигационному обеспечению космической съемки / И.В. Чернов, С.А. Масленников, А.С. Кузнецов, В.А. Телеш // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С. 151–156.

4. Военная доктрина РФ. Утв. Президентом Российской Федерации № Пр-2976 от 25 декабря 2014 года. – URL: [www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_172989](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172989) (дата обращения: 29.09.2019).

5. Рукишин А.С. Военное искусство в локальных войнах и вооруженных конфликтах: военно-исторический труд. – М.: Воениздат, 2009. – 764 с.

6. Долгов Е.И., Елюшкин В.Г., Вдовин В.С. Топогеодезическое и навигационное обеспечение войск: вопросы реформирования // Военная мысль. – 2000. – № 4. – С. 34–39.

7. Чернов И.В., Масленников С.А., Жулев А.Е. Обоснование требований к информации и составу бортовой космической аппаратуры для построения цифровой модели местности // Научная мысль. – 2017. – Т. 1, № 3 (25). – С. 58–64.

8. Гусеница Я.Н., Малахов А.В., Новиков А.Н. Научно-методический подход к комплексному оцениванию эффективности метрологического обеспечения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 7. – С. 330–342.

9. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / под общ. ред. В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. – 280 с.

В.Ф. Алексеев,  
*доктор техн. наук, доцент;*  
А.Г. Осипов,  
*кандидат географических наук;*  
А.В. Прокофьев,  
*кандидат техн. наук;*  
Р.Р. Хайруллин

## **МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ КАРТЫ МАСКИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО МАТЕРИАЛАМ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

Разработанная авторами методика позволяет по материалам аэрокосмической съемки в автоматизированном режиме создавать специальные карты маскирующих свойств лесной растительности. Полученные результаты могут быть использованы при принятии решений по управлению войсками и оружием.

Ключевые слова: маскирующие свойства лесного покрова, естественные маски, вегетационный индекс, дешифровочные признаки.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Местность, являясь одним из элементов боевой обстановки, оказывает существенное влияние на ведение боевых действий войск. При этом связи с появлением и развитием современных средств поражения в большей степени, чем раньше требуются навыки быстрой и полной оценки маскирующих свойств местности для использования их преимуществ во всех видах боя.

Маскирующие свойства местности обуславливаются наличием на ней естественных масок, использование которых способствует скрытности действий войск от комплекса средств наземной, воздушной и космической разведок. Чем больше на местности имеется естественных масок, тем выше ее маскирующие свойства, а, следовательно, большее количество войск и техники можно скрытно расположить на данном участке местности в соответствии с нормами рассредоточения [2].

Исходя из этого, одной из важнейших задач, стоящих перед Топографической службой Вооруженных Сил Российской Федерации, является совершенствование методологической основы и методического аппарата оценки маскирующих свойств местности с использованием современных средств автоматизированной обработки материалов аэрокосмической съемки [6].

Указанный факт подчеркивает актуальность проведенного авторами исследования. В его основу была положена следующая гипотеза: если будет разработана методика автоматизированного создания специальных карт маскирующих свойств лесной растительности по материалам аэрокосмической съемки, то будет обеспечена качественная информационная поддержка принятия решений по управлению войсками и оружием.

Исходя из этого, целью исследования является повышение качества принятия решения при управлении войсками и оружием на основе разработки методики автоматизированного создания специальной карты маскирующих свойств лесной растительности по материалам аэрокосмической съемки.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу проведенного исследования авторы положили методологию получения дешифровочных признаков лесных растительных сообществ путем использования различий их индикационных свойств в разных зонах спектра [1, 7–10]. В качестве показателей, характеризующих видовой состав лесного покрова, предлагается использовать вегетационные индексы. Вегетационный индекс (ВИ) – это показатель, рассчитываемый в результате операций с разными спектральными каналами (диапазонами) данных дистанционного зондирования Земли и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка. При этом открытая почва формирует в спектральном пространстве прямую линию, называемую почвенной, которая характеризует отсутствие растительности [10]. Для решения данной задачи применяются два вегетационных индекса:

1) нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index – *NDVI*);

2) вегетационный индекс, скорректированный с учетом подстилающей поверхности (Soil Adjusted Vegetation Index – *SAVI*).

Индекс *NDVI* прост в вычислении, имеет широкий динамический диапазон и лучшую чувствительность к особенностям лесного растительного покрова. При этом он умеренно чувствителен к изменениям почвенного и атмосферного фона. Его расчет базируется на двух наиболее стабильных участках спектральной кривой отражения сосудистых растений: красной области спектра (0,62–0,75 мкм), характеризующей максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, и ближней инфракрасной области спектра (0,76–1,3 мкм), характеризующей максимальное отражение клеточных структур листа, т. е. высокую фотосинтетическую активность, способствующую меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Для вычисления *NDVI* используется зависимость (1).

Индекс *SAVI* применяется для минимизации воздействия подстилающей поверхности на качество дешифровочных решений. Он эффективно работает при низкой плотности лесного растительного покрова и преобладании травянистой растительности. Для его вычисления используется зависимость (2) [7, 8].

$$R_{NDVI} = \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED})}, \quad (1)$$

$$R_{SAVI} = \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED} + \alpha)} \cdot (1 + \alpha), \quad (2)$$

где  $R_{RED}$  – значения отраженного растительностью света в красной области спектра;

$R_{NIR}$  – значения отраженного растительностью света в ближней инфракрасной области спектра;

$\alpha$  – поправка за подстилающую поверхность:  $\alpha \in [0, \dots, 1]$ .

Процесс моделирования заключается в последовательном выделении и отображении контуров различных типов лесных растительных сообществ (ТЛРС) путем сравнения между собой значений ВИ, полученных по зависимостям (3) и (4), с эталонными индексами, хранящимися в базе данных:

$$R_{NDVI}^i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k R_{NDVI} \quad , \quad (3)$$

$$R_{SAVI}^i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k R_{SAVI} \quad , \quad (4)$$

где  $p \in [1 \dots k]$  – количество отсчетов ВИ в выборке по всем эталонным контурам ТЛРС;  
 $R_{NDVI}^i$  – значение разностного вегетационного индекса (NDVI);  
 $R_{SAVI}^i$  – значение вегетационного индекса, скорректированного с учетом подстилающей поверхности.

Предлагаемый подход может использоваться при исследовании территорий, покрытых лесной растительностью не менее чем на 25–30%, так как при меньшем покрытии лесной растительностью он дает существенные погрешности.

Результатом дешифрирования является сформированная карта ТЛРС исследуемой территории.

Каждому выделенному сообществу на карте ТЛРС присваивается значение коэффициента, характеризующего его маскирующие свойства. После этого определяется маскирующая емкость лесной растительности исследуемой территории и создается соответствующая специальная карта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная методика автоматизированного создания специальной карты маскирующих свойств лесной растительности по материалам аэрокосмической съемки реализуется в пять этапов (рис.1).



Рис. 1. Структурно-логическая схема методики автоматизированного создания специальной карты маскирующих свойств лесной растительности по материалам аэрокосмической съемки

*Этап 1. Эталонирование дешифровочных признаков типов лесных растительных сообществ.* Реализация данного этапа начинается с определения основных типов лесных растительных сообществ, произрастающих в пределах исследуемой территории.

После этого на ортофотопланах выделяются «ключевые участки» для определения дешифровочных признаков ТЛРС. В пределах каждого ключевого участка в интерактивном режиме дешифрируются границы ТЛРС и в соответствии с зависимостью (3) для каждой пары пикселей, последовательно выбираемых из цифровых массивов фотоизображений, вычисляются индексы  $NDVI$ .

Затем, с целью исключения одиночных помех методом медианной фильтрации, квадратным окном размерностью  $(M \times M)$  по зависимости (5) осуществляется сглаживание данных [7, 9, 10]:

$$\bar{R}_{NDVI} = \left(\frac{1}{M^2}\right) \sum_{g=i}^{i+M} \sum_{h=j}^{j+M} R_{NDVI}, \quad (5)$$

где  $\bar{R}_{NDVI}$  – сглаженные значения  $NDVI$ ;  
 $M^2$  – размер сглаживаемого квадрата;  
 $i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$  – порядковые номера элементов карты индексов  $NDVI$  по строкам и столбцам соответственно;  
 $g, h$  – текущие значения обрабатываемого элемента данных в пределах окна по строкам и столбцам соответственно.

Далее для каждого ТЛРС рассчитываются значения и разбросы индексов  $NDVI$  и  $SAVI$  по зависимостям (3), (4), (6) и (7) [7, 9, 10]:

$$\Delta R_{NDVI} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^k (R_{NDVI}^i - R_{NDVI})^2}, \quad (6)$$

$$\Delta R_{SAVI} = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^k (R_{SAVI}^i - R_{SAVI})^2}, \quad (7)$$

где  $\Delta R_{NDVI}, \Delta R_{SAVI}$  – разброс значений  $NDVI$  и  $SAVI$ ;  
 $R_{NDVI}^i, R_{SAVI}^i$  – значения  $NDVI$  и  $SAVI$ , определяемые по зависимостям (3) и (4) соответственно;  
 $R_{NDVI}, R_{SAVI}$  – значения  $NDVI$  и  $SAVI$ , определяемые по зависимостям (1) и (2) соответственно.

Рассчитанные значения заносятся в базу знаний.

Затем с использованием рассчитанных индексов  $NDVI$  выполняется контрольная сегментация ТЛРС. Для этого в интерактивном режиме определяются показатели достоверности машинной классификации по следующей зависимости

$$\chi = \frac{N_m}{N}, \quad (8)$$

где  $N_m$  – количество правильно отдешифрованных ТЛРС;  
 $N$  – общее количество интерактивно выделенных ТЛРС.

В том случае, если показатель достоверности машинной классификации  $\chi > 0,75$  процесс эталонирования дешифровочных признаков типов лесных растительных сообществ заканчи-

вается. В противном случае осуществляется линейное контрастирование фотоизображения ортофотоплана. Для этого используется следующая зависимость [7, 9, 10]

$$y^0 = \frac{255 \cdot (y - y_{\min})}{(y_{\max} - y_{\min})}, \quad (9)$$

где  $y_{\min}$ ,  $y_{\max}$  – минимальное и максимальное значения фототона фотоизображения;  
 $y$  – текущее значение фототона;  
 $y^0$  – новое текущее значение фототона.

Если линейное контрастирование фотоизображения не обеспечивает значения показателя достоверности машинной классификации  $x > 0,75$ , то осуществляется коррекция вегетационного индекса с использованием математического аппарата базы знаний. В случае, когда контрастированием ортофотоплана или коррекцией ВИ повысить значение показателя достоверности машинной классификации не удастся, выполняется повторное выделение контуров ТЛРС. При этом оператору предоставляется возможность интерактивно выполнить анализ возникающих ошибок.

Процесс эталонирования дешифровочных признаков ТЛРС носит циклический характер. Это обеспечивает наиболее точную настройку на особенности физико-географических условий исследуемой территории и материалы аэрокосмической съемки.

*Этап 2. Нормализация данных.* Этот этап включает в себя вычисление по зависимости (1) индексов *NDVI*. Нормализация выполняется для всех элементов фотоизображения исследуемой территории.

*Этап 3. Выявление территорий с антропогенными объектами.* Данный этап включает в себя выявление территорий с антропогенными объектами с целью исключения неконтролируемых объектов классификации. К ним относятся: дороги, строения, гидротехнические, дорожные сооружения, пахотные земли и др. Индексы *NDVI* для данных объектов существенно отличаются от индексов лесной растительности и лежат, как правило, в области отрицательных значений. Выявление антропогенных объектов осуществляется путем последовательной сверки получаемых ВИ со значениями соответствующими лесному растительному покрову. Выявление пахотных земель осуществляется в интерактивном режиме. Элементы фотоизображения, соответствующие выявленным индексам, суммируются и фиксируются на карте в виде площадных территорий с антропогенными объектами.

*Этап 4. Создание специальной карты маскирующих свойств лесных растительных сообществ.* Этот этап начинается со сглаживания данных методом медианной фильтрации по зависимости (5) и создания на этой основе векторного слоя типов лесных растительных сообществ исследуемой территории. После этого созданный векторный слой совмещается с растровой топографической картой исследуемой территории, и в интерактивном режиме уточняются границы ареалов выделенных лесных сообществ. Затем каждому выделенному типу лесного растительного сообщества присваивается значение коэффициента его маскирующих свойств. Определение значений коэффициентов маскирующих свойств осуществляется с использованием методов экспертного анализа. В завершении данного этапа созданная карта оформляется в принятых условных знаках.

*Этап 5. Оценка маскирующей емкости лесной растительности исследуемой территории.* Под маскирующей емкостью лесных растительных сообществ исследуемой территории понимается максимальное количество личного состава и боевой техники, которое может быть скрытно рассредоточено в лесных массивах при условии использования всей площади лесных масок.

Для расчета маскирующей емкости лесных сообществ авторами предлагается использовать следующую зависимость

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i \cdot r)}{b}, \quad (10)$$

где  $W$  – значение маскирующей емкости лесных растительных сообществ;  
 $s_i$  – площадь лесной маски, км<sup>2</sup>;  
 $r$  – коэффициент маскирующих свойств лесного растительного сообщества [2];  
 $n$  – количество лесных масок в пределах исследуемой территории;  
 $b$  – условная батальонная единица, располагающаяся в лесу на площади 0,4 км<sup>2</sup> [6].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика позволяет в автоматизированном режиме по материалам аэрокосмической съемки создавать специальные карты маскирующих свойств лесной растительности. Такие карты необходимы органам военного управления для изучения, оценки и использования местности при принятии решений, планировании и ведении операции (боевых действий). Предлагаемая методика может быть реализована с помощью программного обеспечения современных геоинформационных систем, в том числе ГИС военного назначения.

## Список используемых источников

1. Братков В.В., Атаев З.В. Вегетационные индексы и их использование для картографирования горных ландшафтов Российского Кавказа // APRIORI. Сер. Естественные и технические науки: журн. – 2017. – №1. – С. 1–21.
2. Королёв А.Ю., Королёва А.А., Яковлев А.Д. Маскировка вооружения, техники и объектов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 155 с.
3. Осипов А.Г., Гарманов В.В., Генгут И.Б. Геоинформационное обеспечение эколого-мелиоративного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – М., 2016. – №1(132). – С. 44–50.
4. Осипов А.Г., Ефимов А.Н. Методика комплексной оценки оперативно-тактических свойств местности в системах поддержки принятия решений с использованием геоинформационных технологий // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Вып. 642. – С. 102–109.
5. Осипов А.Г., Петров А.А. Методика обоснования площади экологического каркаса при разработке схем территориального планирования // Экологическое равновесие: структура географического пространства: материалы VII междунар. науч.-практ. конф., 11 нояб. 2016 г. /отв. ред. Т.С. Комиссарова. – СПб.: ЛГУ им. А.С. Пушкина. – 2016. – С. 50–53.
6. Справочник по военной топографии / А.М. Говорухин, А.М. Куприн, А.Н. Коваленко, М.В. Гамезо. – 2-е изд., перераб. – М.: Воениздат, 1980. – 352 с.
7. Elvidge C.D., Lyon R.J.P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // Remote Sensing of Environment. – 1985. – Vol. 17. – P. 265–269.
8. Huete A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. – 1988. – Vol. 25. – P. 295–309.
9. The interpretation of spectral vegetation indexes / Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1995. – Vol. 33, Is. 2. – P. 481–486.
10. Richardson A.J., Wiegand C.L. Distinguishing vegetation from soil background information // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1977. – Vol. 43, Is. 12. – P. 1541–1552.

С.Г. Алёхин,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
И.А. Готюр,  
*доктор техн. наук, доцент;*  
В.В. Семенов

## **МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 8–12 МКМ**

Сегодня тепловизионная техника нашла многообразные формы применения в науке и повседневной жизнедеятельности. При этом особое место заняли научные проблемы распространения инфракрасного излучения в атмосфере. Для успешного применения тепловизионных систем локации и навигации необходимы количественные данные о влиянии атмосферы на параметры инфракрасного излучения.

На практике при отсутствии инструментальных метеорологических наблюдений рассчитать характеристики прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения с помощью функциональных зависимостей между метеорологическими факторами, определяющими текущее состояние прозрачности, не представляется возможным. Обычно исследуются стохастические связи между ними и строятся эмпирические зависимости. Авторы нашли такие эмпирические зависимости, которые в совокупности с обработкой результатов подобных численных экспериментов других исследователей позволили разработать новый метод расчета коэффициента прозрачности атмосферы для инфракрасного излучения в диапазоне 8–12 мкм.

Ключевые слова: тепловизионные системы, коэффициент прозрачности атмосферы, ослабление инфракрасного излучения

### **ВВЕДЕНИЕ**

Тепловизионные или инфракрасные системы визуализации – это оптико-электронные системы, принимающие сигналы в инфракрасной области спектра и преобразующие их в видимые изображения. Постоянное развитие и перспективность этих систем во многом объясняется тем, что именно в инфракрасной области спектра сосредоточена основная доля собственного электромагнитного излучения большинства окружающих нас объектов искусственного и естественного происхождения [1].

Современные тепловизионные системы (далее – ТПВС) обладают высоким пространственным и энергетическим разрешением, имеют малый уровень собственных шумов, высокое быстродействие. Основное назначение таких систем – обнаружение различных объектов, часто в сложных погодных условиях, при ведении экологического мониторинга, в спасательных операциях, при навигации летательных аппаратов и т.д.

Обнаружение – это установление в процессе просмотра пространства наличия определенного объекта в угловом поле ТПВС. Характеристикой обнаружения является дальность обнаружения объекта – источника инфракрасного излучения, которая, кроме всего прочего, зависит от прозрачности слоя атмосферы между объектом и ТПВС.

Известно, что энергия инфракрасного излучения ослабляется при распространении в атмосфере за счет процессов молекулярного поглощения и аэрозольного ослабления, действующих одновременно и независимо [1–8]. Количественные характеристики поглощения изменяются в широких пределах в зависимости от вариаций распределения концентрации поглощающих газов в атмосфере. Количественные характеристики рассеяния на частицах аэрозоля также изменяются в широких пределах в зависимости от концентрации, химического состава и спектра размеров частиц. В целом, количественные характеристики поглощения, рассеяния и, следовательно, ослабления инфракрасного (далее – ИК) излучения в атмосфере существенно зависят от сезона года и времени суток.

В статье авторы предлагают метод, который без учета технических характеристик источников и приемников излучения позволяет получать количественные характеристики поглощения и ослабления ИК излучения в атмосфере с учетом сезона года и времени суток, на основе установленных ими и другими исследователями стохастических связей между метеорологическими факторами, определяющими прозрачность атмосферы.

## КОЭФФИЦИЕНТ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Для заданной длины волны  $\lambda$  в оптически однородном слое атмосферы толщиной  $l=1$  км общее ослабление монохроматического излучения описывается законом Бугера – Ламберта – Бера [2, 9–12]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-k(\lambda)l},$$

где  $I_0(\lambda)$  и  $I(\lambda)$  – интенсивность излучения соответственно до и после прохождения слоя среды толщиной  $l$ ;

$k(\lambda)$  – показатель ослабления, зависящий от длины волны.

Откуда

$$\tau_0 = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-k(\lambda)l}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – коэффициент прозрачности атмосферы.

С учетом двух основных факторов ослабления ИК излучения в атмосфере – молекулярного поглощения и аэрозольного ослабления – выражение (1) можно представить в виде [3]

$$\tau_0 = \tau_0(\lambda) = \tau_n(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \quad (2)$$

где  $\tau_n(\lambda)$  – коэффициент молекулярного поглощения;

$\tau_a(\lambda)$  – коэффициент аэрозольного ослабления.

Таким образом, для определения коэффициента прозрачности атмосферы достаточно найти значения коэффициентов  $\tau_n(\lambda)$  и  $\tau_a(\lambda)$  при рассматриваемых метеорологических условиях, сезоне года и времени суток.

## МОЛЕКУЛЯРНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Основными компонентами атмосферы, поглощающими ИК излучение, являются водяной пар, углекислый газ и озон. В нижних слоях атмосферы (до высот  $\approx 22$  км над уровнем моря) поглощением озона можно пренебречь. Полосы поглощения водяного пара с центром 6,3 мкм и углекислого газа с центрами 2,7 и 15 мкм ограничивают пропускание излучения атмосферой в диапазоне длин волн 2–20 мкм, определяя положение двух окон прозрачности: 3,5–5,0 и 8–14 мкм [8].

Поэтому для определения коэффициента молекулярного поглощения ИК излучения в диапазоне 8–12 мкм рассмотрим только поглощение водяным паром и поглощение углекислым газом

$$\tau_n(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{CO}_2}(\lambda), \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$  – коэффициент поглощения водяного пара;

$\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$  – коэффициент поглощения углекислого газа.

Водяной пар является главным фактором при формировании в атмосфере окон прозрачности. Поглощение водяным паром определяется числом поглощающих молекул, которое зависит от температуры воздуха, абсолютной влажности и длины трассы, проходимой ИК излучением. Эта зависимость характеризуется толщиной слоя осажденной воды  $\omega_0$  (мм/км)

на трассе протяженностью 1 км или толщиной слоя осажденной воды  $\omega$  на трассе протяженностью  $l$  км [1, 2, 5], которые могут быть выражены формулами [5]:

$$\omega_0 = \frac{216,7 \cdot f \cdot E}{T + 273,16}, \quad (4)$$

$$\omega = \omega_0 \cdot l, \quad (5)$$

где  $f$  – относительная влажность воздуха в долях единицы;  
 $E$  – упругость насыщающего пара, мбар;  
 $T$  – температура воздуха, °С.

Тогда выражение для  $\tau_{H_2O}(\lambda)$  на трассе 1 км будет иметь вид

$$\tau_{H_2O}(\lambda) = e^{-k_{H_2O}(\lambda) \cdot \omega_0},$$

где  $k_{H_2O}(\lambda)$  – показатель поглощения водяного пара.

Концентрация углекислого газа в атмосфере зависит только от давления. На высоте уровня моря концентрацию можно считать постоянной, она мало изменяется в нижних слоях атмосферы, а основные полосы поглощения углекислого газа находятся далеко за пределами рассматриваемого нами спектра 8–12 мкм [3, 5, 14]. Следовательно, коэффициент поглощения углекислого газа зависит только от проходимого ИК излучением расстояния.

Помимо экспериментальных методов определения коэффициентов поглощения водяного пара и углекислого газа в научной литературе существуют эмпирические методы, результаты расчетов которых хорошо согласуются с результатами экспериментальных. Например, наиболее известны эмпирические зависимости коэффициентов поглощения  $\tau_{H_2O}(\lambda)$  и  $\tau_{CO_2}(\lambda)$  для выбранного спектрального диапазона от толщины слоя осажденной воды для данной трассы, полученные Пассманом и Лармором, и оформленные в виде таблиц [15].

## АЭРОЗОЛЬНОЕ ОСЛАБЛЕНИЕ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Аэрозольное ослабление представляют в виде аэрозольного рассеяния и аэрозольного поглощения [1–3, 11].

Характеризует аэрозольное ослабление объемный показатель аэрозольного ослабления  $k_a$ , который равен сумме объемных показателей поглощения  $k_{pi}$  и рассеяния  $k_p$  [2]

$$k_a = k_{pi} + k_p = \sum_{i=1}^N k_{pi} + \sum_{i=1}^N k_{pi}, \quad (6)$$

где  $N$  – число частиц в единице объема;  
 $k_{pi}, k_{pi}$  – показатели поглощения и рассеяния  $i$ -ой частицы.

Если пренебречь эффектами многократного рассеяния, то выражение (6) можно представить в следующем виде

$$k_a = N \cdot \left( \int_0^\infty k_{pi}(r, \lambda) \cdot f(r) dr + \int_0^\infty k_{pi}(r, \lambda) \cdot f(r) dr \right), \quad (7)$$

где  $r$  – радиус частиц;  
 $f(r)$  – функция распределения частиц по размерам, имеющая смысл плотности вероятности обнаружения в заданном объеме частицы радиусом  $r$ .

Тогда выражение для коэффициента аэрозольного ослабления ИК излучения можно представить в следующем виде

$$\tau_a(\lambda) = e^{-k_a \cdot l}. \quad (8)$$

Таким образом, полный коэффициент прозрачности атмосферы будет представлен выражением

$$\tau_0(\lambda) = \tau_a(\lambda) \cdot \tau_{H_2O}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda). \quad (9)$$

## МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Обратим внимание на тот факт, что на практике при отсутствии инструментальных наблюдений воспользоваться формулами (4), (6) и (7) затруднительно, так как необходимо знать число и размеры частиц, содержащихся в атмосфере, а также упругость насыщающего пара и относительную влажность.

В процессе исследований и проведения расчетов коэффициента прозрачности атмосферы в ИК области спектра для большого числа сроков метеорологических наблюдений в течение календарного года авторы нашли эмпирические зависимости, которые в совокупности с обработкой результатов подобных численных экспериментов других исследователей позволили разработать новый метод расчета коэффициента прозрачности атмосферы.

По мнению авторов, новизна метода заключается в том, что при малом числе исходных данных он позволяет получать сопоставимые по точности результаты в сравнении с методами, основанными на учете функциональных связей между параметрами атмосферы (табл. 1), и аналогичными методами, разработанными за последние 40–50 лет.

Таблица 1

### Сравнительный анализ методов расчета коэффициента прозрачности атмосферы

№ п/п	Этап расчета	Вычислительный параметр (показатель)	Требования методов к составу метеорологической информации и способам ее обработки	
			Методы, основанные на учете функциональных связей между параметрами атмосферы	Предлагаемый метод
1	Расчет коэффициента поглощения водяным паром $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda_i)$	1) Толщина слоя осажденной воды $\omega_0$ на трассе протяженностью 1 км, мм; 2) $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda_i)$	1) $f$ – относительная влажность в долях единицы; 2) $E$ – упругость насыщающего пара, мбар; 3) $T$ – температура воздуха, °С; 4) Таблицы Пассмана – Лармора	1) $T$ – температура воздуха, °С; 2) $t_d$ – точка росы; 3) $\omega_0 = c_0 + c_1 T + c_2 t_d$ , где $c_0$ , $c_1$ и $c_2$ – коэффициенты регрессии; 4) $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda_i) = \exp(-a \cdot \omega^b)$ , где $a$ и $b$ – параметры аппроксимации (также применимы таблицы Пассмана – Лармора)
2	Расчет коэффициента поглощения углекислым газом $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda_i)$	$\tau_{\text{CO}_2}(\lambda_i)$	1) $P$ – атмосферное давление, Па; 2) $l$ – протяженность трассы в км; 3) Таблицы Пассмана – Лармора	$\tau_{\text{CO}_2}(\lambda_i) = \exp(-y \cdot l^x)$ , где $y$ и $x$ – параметры аппроксимации; $l$ – протяженность трассы в км (также применимы таблицы Пассмана – Лармора)

Окончание табл. 1

№ п/п	Этап расчета	Вычислительный параметр (показатель)	Требования методов к составу метеорологической информации и способам ее обработки	
			Методы, основанные на учете функциональных связей между параметрами атмосферы	Предлагаемый метод
3	Расчет коэффициента аэрозольного ослабления $\tau_a(\lambda_i)$	1) Объемный показатель аэрозольного ослабления $k_a$ ; 2) $\tau_a(\lambda_i)$	1) $N$ – число частиц в единице объема; 2) $k_{pi}, k_{pi}$ – показатель поглощения и рассеяния $i$ -й частицы; 3) $r$ – радиус частиц; 4) $f(r)$ – функция распределения частиц по размерам	$S_0$ – метеорологическая дальность видимости
4	Расчет коэффициента прозрачности атмосферы $\tau_0(\lambda_i)$	$\tau_a(\lambda_i), \tau_{H_2O}(\lambda_i), \tau_{CO_2}(\lambda_i)$	$\tau_0(\lambda) = \tau_a(\lambda) \cdot \tau_{H_2O}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda)$	

Цель метода – расчет коэффициента прозрачности атмосферы  $\tau_0(\lambda)$  в спектральном ИК диапазоне 8–12 мкм. Из анализа табл. 1 видно, что метод включает в себя четыре основных этапа. Рассмотрим их.

**Расчет коэффициента поглощения ИК излучения водяным паром.** Как было сказано выше поглощение водяным паром ИК излучения  $\tau_{H_2O}(\lambda)$  зависит от толщины слоя осажденной воды  $\omega_0$  на трассе 1 км. Авторы на основе статистических выборок получили прогностические уравнения линейной парной регрессии, описывающие зависимость толщины слоя осажденной воды (в мм) на трассе 1 км от температуры воздуха

$$\omega_0 = c_0 + c_1 T, \quad (10)$$

где  $c_0$  и  $c_1$  – коэффициенты регрессии.

Тогда, толщина слоя осажденной воды на трассе  $l$  рассчитывается по формуле (5).

Используя, результаты исследований, опубликованные в [5], коэффициент поглощения ИК излучения водяным паром с достаточной для практики точностью может быть представлен выражением

$$\tau_{H_2O}(\lambda) = \exp(-a \cdot \omega^b), \quad (11)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры аппроксимации.

Для условий нашего метода в зависимости от длины волны ИК излучения, выражение (11) примет вид:

$$\begin{aligned} \tau_{H_2O}(\lambda_8) &= \exp(-0,0507 \cdot \omega^{1,00194}); \\ \tau_{H_2O}(\lambda_{10}) &= \exp(-0,1208 \cdot \omega^{1,00582}); \\ \tau_{H_2O}(\lambda_{12}) &= \exp(-0,01392 \cdot \omega^{0,98670}). \end{aligned}$$

**Расчет коэффициента поглощения ИК излучения углекислым газом.** Коэффициент поглощения углекислого газа есть функция расстояния, проходимого ИК излучением от ис-

точника излучения до объекта, что и отражено в соответствующих таблицах Пассмана – Лармора. В работе [5] предлагается сглаживать эти значения с помощью функции вида

$$\tau_{\text{CO}_2}(\lambda) = \exp(-y \cdot l^x), \quad (12)$$

где  $y$  и  $x$  – параметры аппроксимации.

Если параметрам  $y$  и  $x$  присвоить значения для длин волн 8, 10, и 12 мкм, то получим:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{CO}_2}(\lambda_8) &= 1; \\ \tau_{\text{CO}_2}(\lambda_{10}) &= -0,0022 \cdot l^{1,0086}; \\ \tau_{\text{CO}_2}(\lambda_{12}) &= -0,004 \cdot l^{0,9}. \end{aligned}$$

**Расчет коэффициента аэрозольного ослабления.** Помимо объемного показателя аэрозольного ослабления, определяющего рассеяние, на практике могут использоваться другие критерии. Например, метеорологическая дальность видимости  $S_0$  [1, 3, 5, 9, 10, 14]

$$S_0 = \frac{\ln \frac{1}{\varepsilon_k}}{k_0(\lambda_0)}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_k$  – порог контрастной чувствительности приемника (для человеческого глаза  $\varepsilon_k = 0,02$ );

$k_0(\lambda_0)$  – показатель ослабления в видимой области спектра для  $\lambda_0 \approx 0,55$  мкм.

Из (14) можно записать выражение для показателя ослабления  $k_0(\lambda_0)$

$$k_0(\lambda_0) = \frac{3,912}{S_0}. \quad (14)$$

Между показателем ослабления в видимой области спектра  $k_0(\lambda_0)$  и объемным показателем аэрозольного ослабления для любой другой длины волны  $k_a(\lambda_i)$  известно соотношение [3]

$$\frac{k_0(\lambda_0)}{k_a(\lambda_i)} = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right)^{-n_s}, \quad (15)$$

откуда

$$k_a(\lambda_i) = k_0(\lambda_0) \cdot \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right)^{n_s}, \quad (16)$$

где  $n_s = 0,585 \cdot S_0^{1/3}$  – эмпирический показатель состояния атмосферы.

Тогда выражение (8) для коэффициента аэрозольного ослабления ИК излучения на заданной  $\lambda_i$  будет иметь вид

$$\tau_a(\lambda_i) = e^{-k_a(\lambda_i) \cdot l}. \quad (17)$$

Таким образом, далее с использованием выражения (9) рассчитывается полный коэффициент прозрачности атмосферы в спектральном ИК диапазоне 8–12 мкм.

## ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ И ВЫВОДЫ

При апробации метода расчета коэффициента прозрачности атмосферы для тепловизионных систем в спектральном диапазоне 8–12 мкм были использованы данные многолетних наблюдений за температурой воздуха, влажностью воздуха и метеорологической дальностью видимости в различных географических районах и климатических зонах России, полученные с сайта [gr5.ru](http://gr5.ru). Учитывая, что коэффициент прозрачности атмосферы зависит от сезона года и времени суток, все наблюдения группировались по месяцам и срокам: 06–09 ч – утро; 12–15 ч – день; 18–21 ч – вечер; 00–03 ч – ночь.

В рассматриваемом ИК диапазоне было выделено три спектра на длинах волн  $\lambda_i$  равных 8, 10 и 12 мкм. Допускалось, что расстояние от ТПВС до источника ИК излучения соответствует максимальной дальности обнаружения этой системой объектов, и при  $\tau_0(\lambda) \rightarrow 1$  равно 15 км.

В статье приводятся оценки качества составляющих метода и метода в целом для района г. Мурманск на основе метеорологических наблюдений за 2005–2016 гг. Для каждого месяца объем выборки составлял около 2800 сроков наблюдений, а для каждого времени суток – около 700 сроков наблюдений.

Так, регрессионные модели для расчета толщины слоя осажденной воды  $\omega_0$  на трассе 1 км, полученные на основе выражения (10), после корреляционного и дисперсионного анализа подтвердили свою адекватность и пригодность для практического использования. Оценки качества прогнозирования величины  $\omega_0$  в виде годового хода средней абсолютной и средней квадратической ошибки прогноза представлены на рис. 1.



Рис. 1. График годового хода средней абсолютной  $\bar{\delta}_{\omega_0}$  и средней квадратической  $\bar{\sigma}_{\omega_0}$  ошибок прогноза толщины слоя осажденной воды на трассе 1 км (г. Мурманск)

Из анализа рис. 1 видно, что в период с ноября по февраль (условно назовем – холодный период года) значения ошибок прогноза  $\omega_0$  не велики и почти не зависят от времени суток. С марта по октябрь (теплый период года) в дневные и вечерние часы значения ошибок резко увеличиваются, а в ночные и утренние часы резко уменьшаются. Очевидно, что такое распределение ошибок связано с годовым ходом температуры воздуха в Мурманске, что отражено на рис. 2.

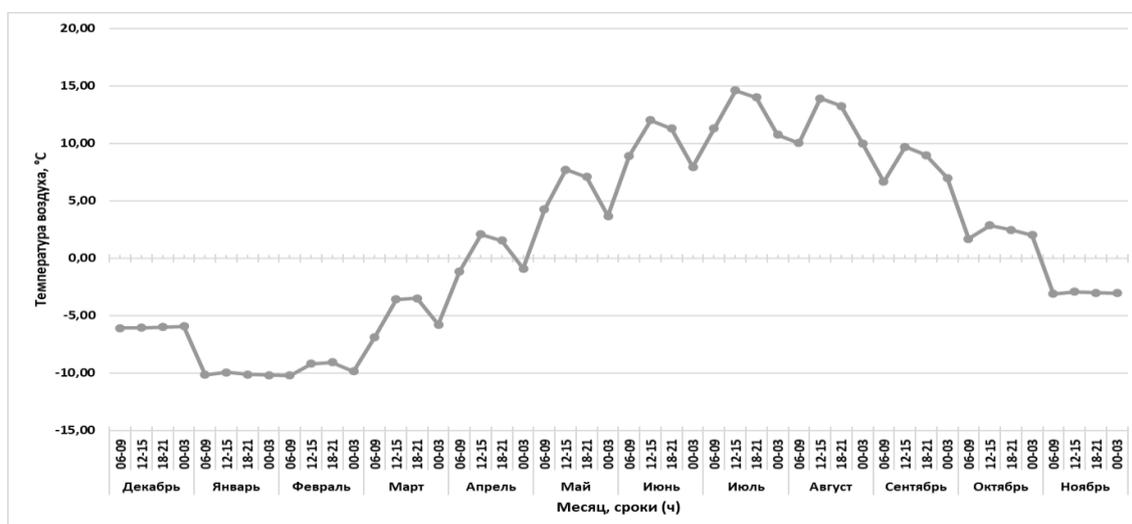


Рис. 2. График годового хода среднесрочных значений температуры воздуха (г. Мурманск)



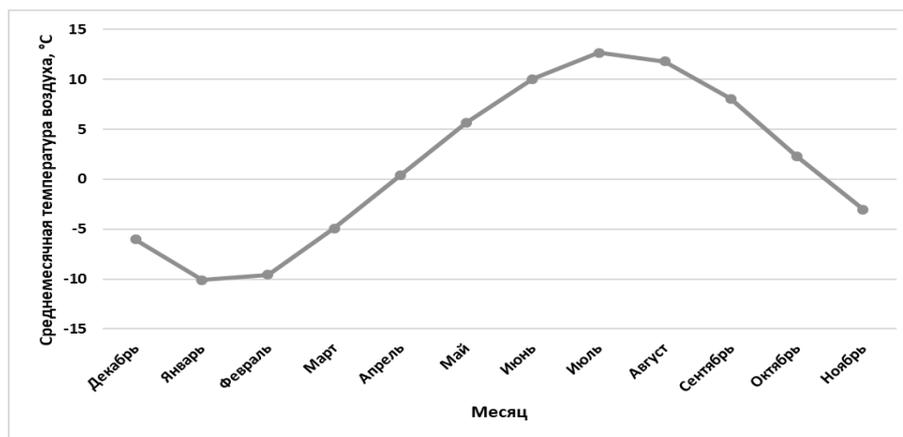


Рис. 5. График годового хода среднемесячной температуры воздуха (г. Мурманск)

На рис. 6 представлены значения средней абсолютной и средней квадратической ошибок прогноза коэффициента прозрачности атмосферы для ИК излучения на длинах волн 8, 10 и 12 мкм.

Из анализа рис. 6 видно, что максимальные значения ошибок прогноза коэффициента прозрачности атмосферы для всех рассматриваемых длин волн наблюдаются в вечерние и ночные часы ноября и в течение всего декабря. В тоже время сами значения этого коэффициента практически не изменяются (рис. 7), как и значения температуры воздуха и относительной влажности воздуха. Заметим, что с начала декабря по начало января в Мурманске продолжительность полярной ночи составляет около 30 суток. Тогда разумно предположить, что причиной возникновения таких ошибок является грубый учет в методе аэрозольного ослабления ИК излучения на трассе 15 км при значениях метеорологической дальности видимости менее 50 км в течение полярной ночи. В данном случае он оказывает существенное влияние на общее ослабление ИК излучения по сравнению с поглощением водяным паром и углекислым газом. В остальной период года значения абсолютных ошибок прогноза коэффициента прозрачности атмосферы не велики – не более 0,04 для 8 мкм и не более 0,075 для 10 и 12 мкм.

В период с марта по октябрь в дневные и вечерние часы значения ошибок больше, чем в ночные и утренние, что прямопропорционально значениям температуры воздуха и обратнопропорционально значениям относительной влажности. Суточная амплитуда влажности воздуха составляет в среднем около 20%, а температуры воздуха – около 3–4 °С.

Минимальные значения коэффициента прозрачности атмосферы наблюдаются с июня по сентябрь (рис. 7).

Здесь необходимо сказать несколько слов о климате Мурманска. Мурманск находится на скалистом восточном побережье Кольского залива Баренцева моря в атлантико-арктической зоне умеренного климата, где на характер погоды оказывает влияние теплое Северо-Атлантическое течение. Наибольшее количество осадков выпадает с июня по август, и в этот же период чаще всего наблюдаются туманы. Сентябрь и октябрь характеризуются сплошной облачностью с осадками и высокой влажностью воздуха. Зимой часто наблюдаются метели, туманы, дымки и осадки в виде снега или снега с дождем [17].

В этой связи в течение всего года в Мурманске прозрачность атмосферы для обнаружения объекта на удалении 15 км ТПВС на длине волны 8 мкм крайне низкая, а в теплый период года она стремится к нулю. Для длин волн 10 и 12 мкм в холодный период года коэффициент прозрачности атмосферы в среднем превышает 0,5, а в теплый – он менее 0,3. Небольшое преимущество диапазона 10 мкм перед 12 мкм объясняется тем, что рядом с 12 мкм расположена сильная полоса поглощения ИК излучения углекислым газом (12,5–16,4 мкм) [15, 16].

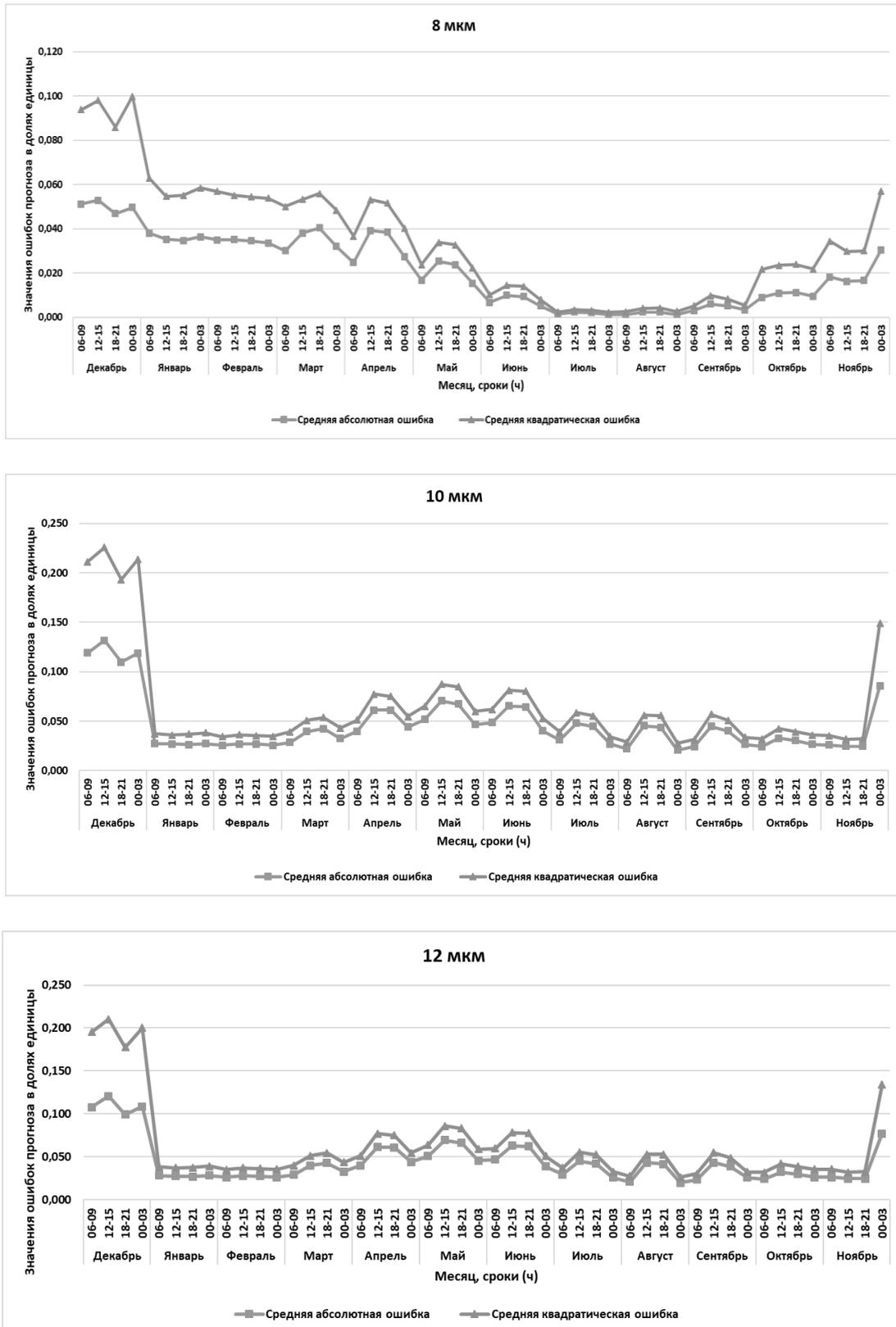


Рис. 6. Графики годового хода средней абсолютной  $\bar{\delta}_{\tau_0}(\lambda)$  и средней квадратической  $\bar{\sigma}_{\tau_0}(\lambda)$  ошибок прогноза коэффициента прозрачности атмосферы для ИК излучения на длинах волн 8, 10 и 12 мкм (г. Мурманск)

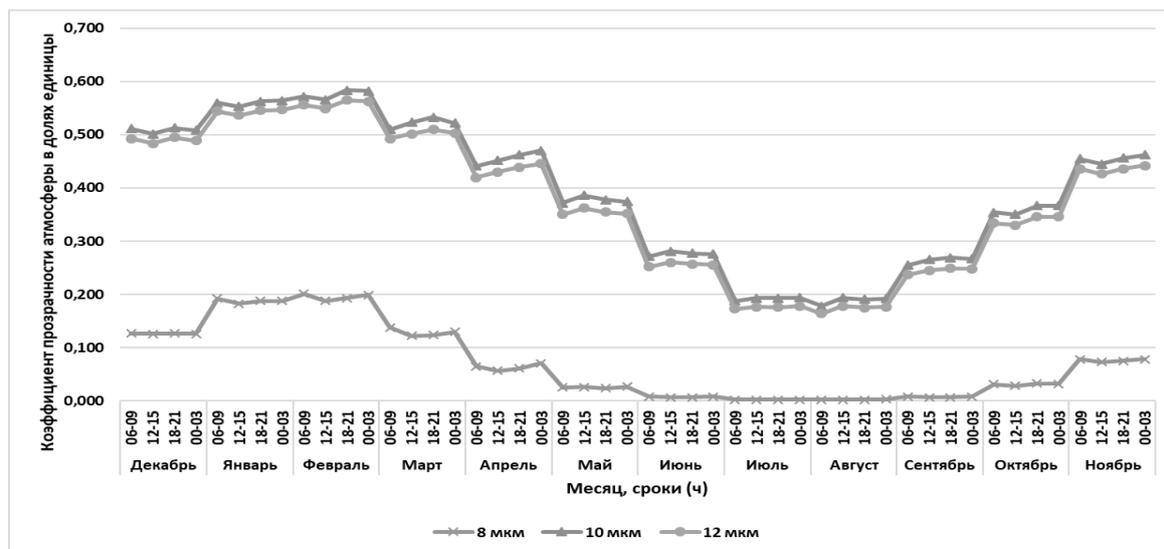


Рис. 7. График распределения среднесрочных значений коэффициента прозрачности атмосферы в течение года для ИК излучения на длинах волн 8, 10 и 12 мкм, полученных с помощью разработанного метода (г. Мурманск)

В целом, если обратить внимание на рис. 2 и 7, то видно, что распределение значений коэффициента прозрачности атмосферы в течение года симметрично распределению температуры воздуха, т.е. с ростом температуры воздуха прозрачность атмосферы в Мурманске уменьшается и наоборот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большая сезонная изменчивость погоды, а также изменчивость отдельных метеорологических факторов в течение суток приводит к значительным изменениям прозрачности атмосферы. Для эффективного целевого использования ТПВС с заданными техническими характеристиками в различных метеорологических условиях необходимо иметь возможность выбора конкретной ТПВС, удовлетворяющей предъявляемым к ней требованиям, например, по дальности обнаружения объектов. Эту возможность, как правило, обеспечивают эмпирические методы, которые позволяют оценить вероятность эффективного функционирования ТПВС в зависимости от некоторых усредненных оптических характеристик атмосферы. К таким методам относится и предлагаемый авторами метод расчета коэффициента прозрачности атмосферы для ТПВС любого спектрального диапазона.

## Список используемых источников

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. – М.: Сов. радио, 1966. – 318 с.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение : пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
4. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Дальность действия, всеуточность и всепогодность телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения. – М.: Машиностроение, 2011. – 218 с.
5. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Всепогодность радиолокационных и тепловизионных каналов наведения комплексов ПВО. – М.: Машиностроение, 2013. – 280 с.

6. *Тымкул В.М., Тымкул Л.В.* Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 215 с.
7. *Тымкул Л.В., Тымкул В.М.* Системы инфракрасной техники: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 164 с.
8. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
9. *Шаронов В.В.* Измерение и расчет видимости далеких предметов. – М.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1947. – 285 с.
10. *Гаврилов В.А.* Видимость в атмосфере. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 324 с.
11. *Тимофеев Ю.М.* Исследования атмосферы земли методом прозрачности. – СПб.: Наука, 2016. – 367 с.
12. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
13. Справочник по инфракрасной технике: в 4 т. / пер. с англ. под ред. У. Вольф, Г. Цисис. – М.: Мир, 1995. – Т.1: Физика ИК-излучения. – 606 с.
14. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 751 с.
15. *Passman S., Larmore L.* Atmospheric Transmission. – Santa Monica: Rand Corporation, Rand Paper, 1956. – 897 p.
16. *Криксунов Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
17. Климат России / Н.В. Кобышева, Е.М. Акентьева, Э.Г. Богданова и др. – СПб.: Гидрометеоздат, 2001. – 655 с.

А.В. Астапович,  
кандидат техн. наук, доцент;  
Е.И. Литинский

## **ОБОСНОВАНИЕ ОБЛАСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СВОБОДНОЙ СТАНЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ТАХЕОМЕТРА ДЛЯ СЪЕМКИ СИТУАЦИИ И РЕЛЬЕФА УЧАСТКОВ КОРРЕКЦИИ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

В статье излагается строгое и простое решение проблемы априорной оценки точности съемочных работ электронными тахеометрами с программным обеспечением, позволяющим в режиме online осуществлять съемку ситуации и рельефа местности на участках коррекции системы наземной навигации подвижных объектов. Получены простые формулы для расчета средних квадратических погрешностей определения координат свободной станции по результатам линейных и линейно-угловых измерений до двух опорных пунктов съемочного обоснования. Выполнен анализ полученных формул с выделением области наилучшего расположения точки, определяемой линейной засечкой. Доказывается, что при расположении свободной станции в благоприятной зоне погрешность определения координат местоположения прибора по результатам линейно-угловых измерений относительно исходного пункта не может превзойти утроенной погрешности измерений электронными тахеометрами длин линий. Показано, что точность съемки обусловлена погрешностью положения свободной станции относительно опорного пункта и погрешностями измерения направления и расстояния до пикета. Погрешность измерения расстояния определяет продольную погрешность положения пикетной точки относительно свободной станции. Погрешность направления определяет поперечную погрешность положения пикетной точки относительно свободной станции.

Ключевые слова: свободная станция, съемка ситуации и рельефа, обратные линейная и линейно-угловая засечки, планирование точности съемочных работ, априорная оценка точности съемочных работ, продольное и поперечное смещение, средняя квадратическая погрешность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из параметров корректировки систем наземной навигации подвижных объектов (СНН ПО) является высота. Корректировка СНН ПО по высоте, как правило, осуществляется на опорных пунктах (точках коррекции), располагаемых по маршрутам передвижения ПО.

Для корректировки СНН ПО в условиях неограниченного маневра могут использоваться цифровые модели рельефа (ЦМР), создаваемые с требуемой точностью, на участки коррекции. Поэтому, создание ЦМР должно основываться непосредственно на материалах съемок рельефа спутниковыми или наземными средствами измерений, воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и цифровой аэрофотосъемки (ЦАФС) [1].

Технологии ВЛС и ЦАФС применяются для создания ЦМР на значительные по площади территории, однако по точности съемки рельефа уступают наземным методам, и не всегда могут удовлетворять требованиям к точности ЦМР для корректировки СНН ПО [2]. Для создания ЦМР на локальные участки коррекции целесообразно применять спутниковые или наземные методы съемки рельефа [1].

При выполнении натурных съемок рельефа в условиях отсутствия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем высоты точек местности целесообразно определять методом тригонометрического нивелирования одновременно с определением плановых координат по методике свободной станции дальномерно-угловых приборов, которая позволяет по ограниченному числу линейно-угловых измерений до пунктов съемочного обоснования определять местоположение геодезических приборов относительно опорных пунктов [3]. Особенно эффективен данный способ при использовании современных элек-

тронных тахеометров, в которых для определения координат и высот свободной станции реализованы разные методы, в том числе обратные линейная и линейно-угловая засечки [4].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ НАИЛУЧШЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СВОБОДНОЙ СТАНЦИИ

Принципиальная схема наблюдений при выполнении топографической съемки методом свободной станции приведена на рис. 1. В данной схеме измерению подлежат длины линий  $d_1, d_2, d_3$ , углы  $\beta_3, \beta_4$  и зенитные расстояния  $z_{\text{ССТ1-ГРО1}}, z_{\text{ССТ1-ГРО2}}, z_{\text{ССТ1-ПТ1}}$ .

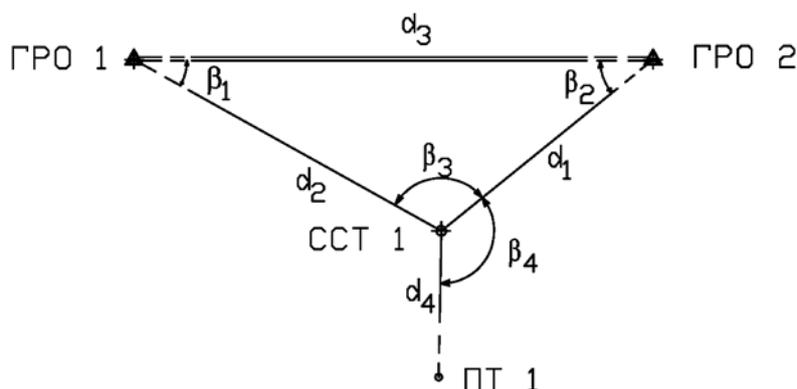


Рис. 1. Схема наблюдений методом свободной станции

Очевидно, что координаты и высота пикетной точки ПТ 1 могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_{\text{ПТ1}} &= x_{\text{ГРО2}} + d_1 \cos(\alpha_{\text{ГРО2-ГРО1}} - \beta_2) + d_4 \cos(\alpha_{\text{ГРО2-ГРО1}} - \beta_2 + \beta_4 - 180^\circ); \\ y_{\text{ПТ1}} &= y_{\text{ГРО2}} + d_1 \sin(\alpha_{\text{ГРО2-ГРО1}} - \beta_2) + d_4 \sin(\alpha_{\text{ГРО2-ГРО1}} - \beta_2 + \beta_4 - 180^\circ); \\ H_{\text{ПТ1}} &= \frac{H_{\text{ГРО1}} + H_{\text{ГРО2}}}{2} - \frac{1}{2} d_1 \cot z_{\text{ССТ1-ГРО2}} - \frac{1}{2} d_2 \cot z_{\text{ССТ1-ГРО1}} + d_4 \cot z_{\text{ССТ1-ПТ1}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Нетрудно заметить, что точность топографической съемки методом свободной станции будет зависеть от точности местоопределения прибора относительно опорных пунктов, т.е. от геометрии геодезического построения. В этой связи, определение области наилучшего расположения свободной станции относительно опорных пунктов является актуальной задачей.

В нормативно-технической и научной литературе по данной проблематике нет достаточного количества публикаций, в которых был бы изложен простой подход для априорной оценки точности съемочных работ методом свободной станции.

В данной статье авторы попытались дать простое решение проблемы априорной оценки точности съемочных работ электронными тахеометрами с программным обеспечением, позволяющим в режиме online осуществлять съемку ситуации и рельефа местности.

Средняя квадратическая погрешность положения  $m_p$  свободной станции ССТ 1 относительно исходного пункта, например ГРО 2, может быть представлена в виде продольного и поперечного смещений [3, 5]

$$m_p = \sqrt{m_L^2 + m_Q^2}. \quad (2)$$

Продольное смещение  $m_L$  обусловлено погрешностями измерений длин линий

$$m_L = m_d, \quad (3)$$

а поперечное смещение  $m_\rho$  – погрешностью определения по результатам линейно-угловых измерений угла между исходными и определяемым пунктами

$$m_\rho = \frac{m_{\beta_2}}{\rho''} d_1. \quad (4)$$

Средняя квадратическая погрешность  $m_{\beta_2}$  зависит от точности линейно-угловых измерений, метода вычисления неизмеряемых углов в треугольнике и геометрии засечки.

Формулу для оценки точности определения примычного угла  $\beta_2$  по результатам линейных измерений получим следующим образом.

На основании теоремы косинусов выразим  $\cos \beta_2$  через длины сторон  $d_1, d_2, d_3$  треугольника ГРО 1, ГРО 2, ССТ 1

$$\cos \beta_2 = \frac{d_1^2 + d_3^2 - d_2^2}{2d_1d_3}. \quad (5)$$

Ошибки длин сторон в треугольнике являются некоррелированными величинами. Поэтому для оценки точности угла  $\beta_2$  можно применить формулу средней квадратической ошибки функции независимых аргументов [3, 6]

$$m_{\beta_2} = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta_2}{\partial d_1}\right)^2 m_{d_1}^2 + \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial d_2}\right)^2 m_{d_2}^2 + \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial d_3}\right)^2 m_{d_3}^2}. \quad (6)$$

Частные производные в формуле (6) могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial d_1}\right) &= -\frac{\cot \beta_3}{d_1}; \\ \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial d_2}\right) &= \frac{1}{d_2}(\cot \beta_1 + \cot \beta_3); \\ \left(\frac{\partial \beta_2}{\partial d_3}\right) &= -\frac{\cot \beta_1}{d_3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Влияние ошибок каждой из сторон  $d_1, d_2, d_3$  треугольника на точность определения примычного угла  $\beta_2$  оценивается по формулам:

$$\begin{aligned} m_{\beta_2} &= \left| \rho'' \cot \beta_3 \left( \frac{m_{d_1}}{d_1} \right) \right|; \\ m_{\beta_2} &= \left| \rho'' (\cot \beta_1 + \cot \beta_3) \left( \frac{m_{d_2}}{d_2} \right) \right|; \\ m_{\beta_2} &= \left| \rho'' \cot \beta_1 \left( \frac{m_{d_3}}{d_3} \right) \right|. \end{aligned} \quad (8)$$

Формулы (8) могут быть полезны при планировании точности измерений, так как связывают относительные погрешности сторон треугольника с погрешностями углов.

Подставим полученные частные производные в формулу (6). При условии равенства относительных средних квадратических погрешностей измерений сторон треугольника, получим выражение для априорной оценки точности примычного угла  $\beta_2$  в зависимости от формы треугольника

$$m_{\beta_2} = \rho'' \left( \frac{m_d}{d} \right) \sqrt{2(\cot^2 \beta_1 + \cot^2 \beta_3 + \cot \beta_1 \cot \beta_3)}. \quad (9)$$

На основании (2), (3) и (4) средняя квадратическая погрешность положения свободной станции относительно пунктов геодезической основы будет равна

$$m_p = \sqrt{m_L^2 + m_Q^2} = m_d \sqrt{1 + 2(\cot^2 \beta_1 + \cot^2 \beta_3 + \cot \beta_1 \cot \beta_3)}. \quad (10)$$

Значения  $\cot^2 \beta_1 + \cot^2 \beta_3 + \cot \beta_1 \cot \beta_3$  для различных форм треугольника приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Значения  $\cot^2 \beta_1 + \cot^2 \beta_3 + \cot \beta_1 \cot \beta_3$  для различных форм треугольника**

	Угол засечки																
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
10	96,5	55,3	45,0	40,3	37,6	35,8	34,4	33,2	32,2	31,2	30,2	29,2	28,1	26,8	25,3	24,1	32,2
20	55,3	22,6	15,3	12,2	10,6	9,5	8,7	8,1	7,5	7,1	6,7	6,3	5,9	5,7	5,8	7,5	
30	45,0	15,3	9,0	6,5	5,2	4,3	3,8	3,3	3,0	2,7	2,5	2,3	2,3	2,4	3,0		
40	40,3	12,2	6,5	4,3	3,1	2,4	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1	1,4			
50	37,6	10,6	5,2	3,1	2,1	1,5	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,6	0,7				
60	35,8	9,5	4,3	2,4	1,5	1,0	0,7	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3					
70	34,4	8,7	3,8	2,0	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1						
80	33,2	8,1	3,3	1,7	0,9	0,5	0,2	0,1	0,0	0,0							
90	32,2	7,5	3,0	1,4	0,7	0,3	0,1	0,0	0,0								
100	31,2	7,1	2,7	1,2	0,6	0,3	0,1	0,0									
110	30,2	6,7	2,5	1,1	0,5	0,3	0,1										
120	29,2	6,3	2,3	1,1	0,6	0,3											
130	28,1	5,9	2,3	1,1	0,7												
140	26,8	5,7	2,4	1,4													
150	25,3	5,8	3,0														
160	24,1	7,5															
170	32,2																

Анализ значений табл. 1 показывает, что наилучшей формой треугольника для линейной засечки будет треугольник, у которого примычный угол и угол засечки находятся в пределах  $40^\circ$ – $140^\circ$ . На рис. 2 серой штриховкой выделена область наилучшего расположения точки, определяемой линейной засечкой. В этой области расположения свободной станции средняя квадратическая погрешность определения примычного угла  $\beta_2$  не будет превосходить

$$m_{\beta_2} = 3 \left( \frac{m_d}{d} \right) \rho'' , \quad (11)$$

а положение свободной станции будет определяться точнее, чем

$$m_p = m_d \sqrt{1 + 2(4,3)} = 3,1 m_d . \quad (12)$$

Для оценки точности определения примычного угла  $\beta_2$  по результатам линейно-угловых измерений воспользуемся теоремой синусов

$$\frac{d_1}{\sin \beta_1} = \frac{d_2}{\sin \beta_2} = \frac{d_3}{\sin \beta_3} . \quad (13)$$

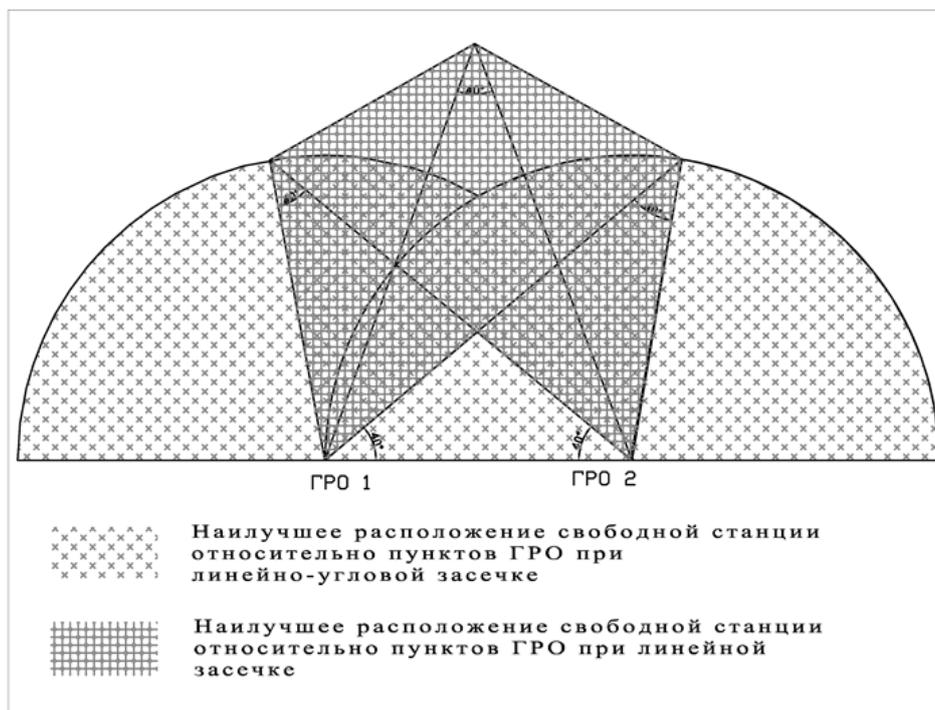


Рис. 2. Область наилучшего расположения свободной станции

Отсюда будем иметь

$$\sin \beta_2 = \frac{d_2 \sin \beta_3}{d_3}. \quad (14)$$

В линейно-угловой засечке влияние ошибок измерений каждого отдельного элемента треугольника на точность определения примычного угла  $\beta_2$  оценивается по формулам:

$$\begin{aligned}
 m_{\beta_2} &= \left| \rho'' \tan \beta_2 \left( \frac{m_{d_2}}{d_2} \right) \right|; \\
 m_{\beta_2} &= \left| \rho'' \tan \beta_2 \left( \frac{m_{d_3}}{d_3} \right) \right|; \\
 m_{\beta_2} &= \left| \tan \beta_2 \cot \beta_3 m_{\beta_3} \right|.
 \end{aligned} \quad (15)$$

Анализ формул (15) показывает, что наилучшие условия для определения примычного угла на основе линейно-угловых измерений складываются тогда, когда свободная станция располагается ближе к створу опорных пунктов. В этом случае примычные углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  будут близки к  $0^\circ$  или к  $180^\circ$  и, следовательно, тангенс примычного угла в формулах (15) будет принимать малые значения. В случае расположения свободной станции строго в створе имеем неопределенность вида  $\tan \beta_2 \cot \beta_3 = \frac{0}{0}$ , которая стремится к пределу

$$\lim_{\substack{\beta_2 \rightarrow 0^\circ (180^\circ) \\ \beta_3 \rightarrow 0^\circ (180^\circ)}} \tan \beta_2 \cot \beta_3 = 0,5.$$

Целесообразно в качестве примычного использовать тот угол при вершине ГРО 1 или ГРО 2, для которого тангенс меньше. В этом случае влияние погрешностей линейно-угловых измерений на определение примычного угла будет минимальным.

## РАСЧЕТ АПРИОРНОЙ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для априорной оценки точности следует полагать, что измерения в линейно-угловых построениях выполняются при условии равенства относительных погрешностей линейно-угловых измерений

$$\left( \frac{m_{d_2}}{d_2} \right) = \left( \frac{m_{d_3}}{d_3} \right) = \frac{m_{\beta}}{\rho''} = \left( \frac{m_d}{d} \right). \quad (16)$$

Подставляя полученные частные производные в формулу (6) и учитывая (16) будем иметь

$$m_{\beta_2} = \rho'' \left( \frac{m_d}{d} \right) \tan \beta_2 \sqrt{2 + \cot^2 \beta_3}. \quad (17)$$

Значения  $\tan \beta_2 \sqrt{2 + \cot^2 \beta_3}$  для различных форм треугольника приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Значения $\tan \beta_2 \sqrt{2 + \cot^2 \beta_3}$ для различных форм треугольника

	Угол засечки																
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
10	1.0	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	
20	2,1	1.1	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8		
30	3,4	1.8	1.3	1.1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.1			
40	4,9	2,6	1.9	1.6	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4				
50	7,0	3,7	2,7	2.2	2.0	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8					
60	10,1	5,4	3,9	3,2	2.8	2.6	2.5	2.5	2.4	2.5	2.5						
70	16,1	8,5	6,1	5,1	4,5	4,2	4,0	3,9	3,9	3,9							
80	33,1	17,5	12,7	10,5	9,3	8,7	8,3	8,1	8,0								
100	-33,1	-17,5	-12,7	-10,5	-9,3	-8,7	-8,3										
110	-16,1	-8,5	-6,1	-5,1	-4,5	-4,2											
120	-10,1	-5,4	-3,9	-3,2	-2,8												
130	-7,0	-3,7	-2,7	-2.2													
140	-4,9	-2.6	-1.9														
150	-3,4	-1.8															
160	-2.1																
170																	

Из анализа результатов, приведенных в табл. 2, следует, что если свободная станция располагается внутри области ограниченной двумя полуокружностями с центрами совмещенными с пунктами ГРО и радиусами равными расстоянию между пунктами ГРО (на рис. 2 область выделена серой штриховкой), то углы в треугольнике ГРО 1, ГРО 2, ССТ 1 будут

принимать такие значения, для которых  $\tan \beta_2 \sqrt{2 + \cot^2 \beta_3}$  будет меньше 2,8. Следовательно, средняя квадратическая погрешность определения примычного угла не будет превосходить

$$m_{\beta_2} = 2,8\rho'' \left( \frac{m_d}{d} \right). \quad (18)$$

На основании (2), (3), (4) и (17) относительно пунктов ГРО средняя квадратическая погрешность определения координат свободной станции обратной линейно-угловой засечкой будет равна

$$m_p = \sqrt{m_L^2 + m_Q^2} = m_d \sqrt{1 + 2 \tan^2 \beta_2 + \tan^2 \beta_2 \cot^2 \beta_3}. \quad (19)$$

При расположении свободной станции в благоприятной зоне погрешность определения координат местоположения прибора относительно исходно пункта не будет превосходить

$$m_p = 3m_d. \quad (20)$$

Таким образом, средняя квадратическая погрешность определения координат свободной станции по результатам линейно-угловых измерений должна оцениваться по формулам (10) или (19) и при расположении свободной станции в благоприятной зоне (см. рис. 2) не может превзойти утроенной погрешности измерений длин линий, измеряемых электронными тахеометрами.

Точность координат пикетов будет обусловлена погрешностью положения свободной станции относительно пункта геодезической основы и погрешностями измерения направления и расстояния до координируемой точки. Погрешность измерения расстояния до пикета будет обуславливать радиальное смещение точки относительно свободной станции. Погрешность измерения направления определяет тангенциальное смещение точки относительно свободной станции. Следовательно,

$$m_{\text{ПТ1}} = \sqrt{m_p^2 + m_d^2 + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} d_4^2}. \quad (21)$$

С учетом (17) и (19) формула (21) принимает вид

$$m_{\text{ПТ1}} = \sqrt{\frac{m_\beta^2}{\rho^2} d_4^2 + [2 + \tan^2 \beta_2 (2 + \cot^2 \beta_3)] + m_d^2}. \quad (22)$$

Для априорной оценки точности съемки рельефа способом свободной станции воспользуемся формулой средней квадратической ошибки функции независимых аргументов. Поскольку на точность определения высот точек местности в тригонометрическом нивелировании основное влияние оказывают погрешности измерений зенитных расстояний, то будем иметь

$$m_{H_{\text{ПТ1}}}^2 = \left( \frac{\partial H_{\text{ПТ}}}{\partial z_{\text{ССТ1-ГРО2}}} \right)^2 m_{z_{\text{ССТ1-ГРО2}}}^2 + \left( \frac{\partial H_{\text{ПТ}}}{\partial z_{\text{ССТ1-ГРО1}}} \right)^2 m_{z_{\text{ССТ1-ГРО1}}}^2 + \left( \frac{\partial H_{\text{ПТ}}}{\partial z_{\text{ССТ1-ПТ1}}} \right)^2 m_{z_{\text{ССТ1-ПТ1}}}^2.$$

Частные производные равны:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{\text{ПТ1}}}{\partial z_{\text{ССТ1-ГРО2}}} &= \frac{1}{2} d_1 \frac{1}{\sin^2 z_{\text{ССТ1-ГРО2}}}; \\ \frac{\partial H_{\text{ПТ1}}}{\partial z_{\text{ССТ1-ГРО1}}} &= \frac{1}{2} d_2 \frac{1}{\sin^2 z_{\text{ССТ1-ГРО1}}}; \\ \frac{\partial H_{\text{ПТ1}}}{\partial z_{\text{ССТ1-ПТ1}}} &= -d_4 \frac{1}{\sin^2 z_{\text{ССТ1-ПТ1}}}. \end{aligned}$$

Принимая зенитные расстояния близкими к  $90^\circ$ , в соответствии с принципом одинакового класса точности измерений аргументов

$$m_{z_{\text{ССТ1-ГР02}}} = m_{z_{\text{ССТ1-ГР01}}} = m_{z_{\text{ССТ1-ПТ1}}} = m_z,$$

будем иметь

$$m_{H_{\text{ПТ1}}} = \frac{m_z}{\rho''} \sqrt{\frac{1}{4}d_1^2 + \frac{1}{4}d_2^2 + d_4^2}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные формулы позволяют осуществлять априорную оценку точности съемки ситуации и рельефа способом свободной станции тахеометра. Кроме того, приведенные формулы могут быть использованы при разработке проекта производства геодезических работ, так как позволяют решить и обратную задачу – по заданной точности определения координат и высот обосновывать требования к угловым и линейным измерениям, а также обосновывать требования к форме и плотности съемочной сети.

## Список используемых источников

1. Хрущ Р.М. Фотограмметрия: учебник – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 541 с.
2. Чернов И.В., Масленников С.А., Жулёв А.Е. Обоснование требований к информации и составу бортовой космической аппаратуры для построения цифровой модели местности // Научная мысль. – 2017. – Т. 1, № 3(25). – С. 58–64.
3. Астапович А.В. Теория математической обработки измерений: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Ч. 1: Ошибки измерений. – 191 с.
4. Руководство по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. Ч. 1: Геодезические работы. – М.: РИО ВТС, 1980. – 423 с.
5. Чернов И.В. Повышение точности определения азимутов с использованием лазерных гирокомпасов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 6. – С. 27–32.
6. Методика обоснования характеристик аппаратуры и требований к навигационному обеспечению космической съемки / А.С. Кузнецов, С.А. Масленников, В.А. Телеш, И.В. Чернов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С. 151–156.

А.П. Вышинский;  
М.Н. Зоц;  
А.В. Колесник,  
*кандидат военных наук;*  
М.Ю. Ортиков,  
*кандидат техн. наук*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРИОДИЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ РАЙОНОВ С УЧЕТОМ ДЕТАЛЬНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

В статье рассматривается содержание методики расчета периодичности наблюдения районов орбитальной группировкой космических аппаратов с учетом дополнительных требований, связанных с детальностью и производительностью космической съемки. Практическая актуальность решаемой задачи состоит в сложившейся необходимости расширения состава показателей, определяющих эффективность контроля районов (объектов) с использованием космических средств.

Ключевые слова: космическая съемка, периодичность наблюдения, детальность, оптимизация, циклограмма, ранжирование.

Важнейшей научно-технической задачей в области космической деятельности является необходимость повышения эффективности использования российской орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Особенно актуальным направлением повышения эффективности ДЗЗ является задача синтеза различных вариантов построения орбитальной и наземной группировок космических систем наблюдения (КСН), решаемая на основе расчета показателей, характеризующих возможности наблюдения районов, объектов, техногенных или природных процессов.

Выбранный в процессе создания и применения КСН состав показателей количественно отражает степень соответствия текущего или прогнозируемого состояния процесса наблюдения космической системой некоторому уровню, соответствующему требованиям заказчиков и потребителей, определенному в тактико-техническом задании [1, 2].

Общеизвестно, что к основным показателям, характеризующим информационные возможности КСН, относят производительность и периодичность съемки, а также детальность получаемых данных. Однако, существующий набор показателей является более широким, а в действующих программно-целевых, нормативных и методических документах приведены дополнительные частные показатели, определяющие эффективность КСН. Наиболее важные из них приведены на рис. 1 [3, 4].

Конкретные требования к составу и значениям представленных показателей дифференцируются в зависимости от рассматриваемой задачи применения КСН и используемого для ее решения типа бортовой специальной аппаратуры, т.е. от вида получаемой информации.

В настоящее время в связи с развитием технологий оперативного получения, подготовки и предоставления потребителю космических снимков появляется новый класс задач применения КСН, связанный с периодическим обновлением (актуализацией) геопространственной информации (ГПИ). Основу ГПИ составляют базовые информационные ресурсы и тематические информационные слои, включающие мозаики космических снимков, которые являются равномерным однородным покрытием [5].

В данном случае показателем периодичности наблюдения объектов (районов) будет являться не интервал времени между последовательными потенциальными наблюдениями заданных объектов или районов, а время, затрачиваемое на получение, подготовку и доведение ГПИ заданного качества, объема и детальности (разрешения на местности).



Рис.1. Основные показатели возможностей КСН

Таким образом, при расчете периодичности наблюдения необходим учет дополнительных требований к применению КСН, параметров бортовой аппаратуры, а также совершенствованию существующего методического обеспечения расчета показателей.

В предлагаемой методике расчета периодичности наблюдения контролируемых районов используются следующие исходные данные:

- множество космических аппаратов (КА)  $A = \{a_i\}, i \in I$ ;
- вектор параметров  $i$ -го КА  $a_i = \langle x^k, x^n \rangle_i$ , включающий баллистические характеристики  $x^k$ , характеристики бортовой аппаратуры наблюдения  $x^n$ ;
- множество пунктов приема информации (ППИ)  $B = \{b_j\}, j \in J$ ;
- вектор параметров  $j$ -го ППИ  $b_j = \langle x^k, V^{np} \rangle_j$ , включающий координаты расположения  $x^k$  и скорость приема информации  $V^{np}$ ;
- множество пунктов управления (ПУ)  $C = \{c_k\}, k \in K$ ;
- вектор параметров  $k$ -го ПУ  $c_k = \langle x^k, Z \rangle_k$ , включающий координаты расположения  $x^k$  и количество одновременно управляемых КА  $Z$ ;
- технологический цикл управления КА  $Q$ , включающий требуемые периодичность и последовательность прохождения КА в зоне радиовидимости ПУ;
- множество районов наблюдения (РН)  $D = \{d_l\}, l \in L$ ;
- вектор параметров  $l$ -го РН  $d_l = \langle x^k, U \rangle_l$ , включающий координаты  $x^k = \langle \varphi, \lambda \rangle$  и среднестатистические метеорологические условия наблюдения  $U$ ;
- интервал времени применения КСН  $\Delta T = \langle t_1, t_2 \rangle$ .

Заказчиком или потребителем космической съемки формируются требования по детальности  $R_{mp}$ , полноте  $S_{mp}$  и оперативности  $T_{mp}$  космической съемки, а задача накопления и актуализации ГПИ формализуется следующим комплексным показателем периодичности ( $I$ ):

$$P = f(A, B, C, D, Q, S, R, T): S \geq S_{тр}, R \leq R_{тр}, T \leq T_{тр}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь снимаемой территории;

$R$  – разрешение на местности;

$T$  – время, затраченное на получение, обработку и доведение информации.

Кроме того, для  $i$ -го КА определяется вклад  $P_i$  в периодичность съемки  $P$ , а также рассчитывается производительность съемки  $W_i$  (площадь отснятой им территории с учетом сброса космических снимков на ППИ).

При планировании различных вариантов съемки района необходимыми условиями являются [1, 2]:

– угол возвышения Солнца ( $h_{\odot}$ ) должен быть больше или равен требуемому значению ( $h_{\odot} \geq h_{\odot}^{mp}$ ) или дневное время проведения съёмки  $\langle t_{\min}, t_{\max} \rangle$  (для оптико-электронного наблюдения);

– скорость перенацеливания при съемке должна быть меньше или равна требуемому значению ( $V_p \leq V_p^{mp}$ );

– текущий объем данных в бортовом запоминающем устройстве (БЗУ) должен быть меньше или равен максимальному значению его объема ( $E_t \leq E_{\max}$ ).

Методика решения поставленной задачи включает следующие этапы.

На первом этапе с учетом баллистического построения выполняется моделирование движения орбитальной группировки КА на заданном интервале времени. На основании исходных данных по орбитальной и наземной группировкам КСН формируются три циклограммы, отражающие моменты времени нахождения КА в зоне радиовидимости ПУ, ППИ, а также в зонах обзора районов наблюдения.

На основании сформированных циклограмм на втором этапе моделируется применение КСН с учетом требований и условий применения.

На третьем по сформированным вариантам определяются сценарии применения КСН, включая ПУ и ППИ. Для каждого сформированного сценария производится вычисление характеристик периодичности.

На четвертом этапе осуществляется выбор сценария, который обеспечивает минимальную периодичность получения ГПИ и учитывает предпочтения лица принимающего решение (ЛПР) – потребителя или заказчика ГПИ.

На заключительном этапе выполняется ранжирование КА на основе его вклада в реализацию выбранного сценария.

В процессе выполнения первых двух этапов методики решаются аналитические задачи, связанные с формированием циклограмм. Данные циклограммы являются математическими представлениями циклических процессов, связанных с применением КСН.

На основании численного интегрирования уравнений движения КА для каждого  $i$ -го КА  $X^{ОСН}$  определяются:

$(t_1)_i^l$  и  $(t_2)_i^l$  – времена входа и выхода КА в зону радиовидимости для  $l$ -го ПУ соответственно;

$(t_1)_i^m$  и  $(t_2)_i^m$  – времена входа и выхода КА в зону радиовидимости для  $m$ -го ППИ соответственно;

$(t_1)_i^n$  и  $(t_2)_i^n$  – времена входа и выхода КА в зону обзора для  $n$ -го района соответственно.

На рис. 2 представлена структурная схема методики.

Для оценки показателей периодичности и производительности КСН используются унифицированные частные модели [2, 5].

1. *Модель прогноза движения КА.* Предназначена для расчета параметров положения КА относительно поверхности Земли на заданный момент времени  $t \in \Delta T$ .

2. *Модель оценивания условий наблюдения.* Предназначена для расчета углов визирования на объект, параметров зон обзора и расчета параметров астрономических условий для заданного района и момента времени  $t \in \Delta T$ .

3. *Модель оценивания детальности наблюдения.* Предназначена для расчета разрешающей способности аппаратуры и разрешения на местности.

4. *Модель программы съемки районов.* Предназначена для формирования вариантов съемки районов с учетом обеспечения заданных размеров и необходимого перекрытия по всей

длине маршрутов района, максимальных углов отклонения оси визирования целевой аппаратуры от вертикали для обеспечения требуемого разрешения.

5. *Модель программы «сброса» информации.* Предназначена для формирования графика изменения объема БЗУ.

6. *Модель управления КСН.* Предназначена для формирования вариантов управления КА ДЗЗ и закладки программы работы БСА.

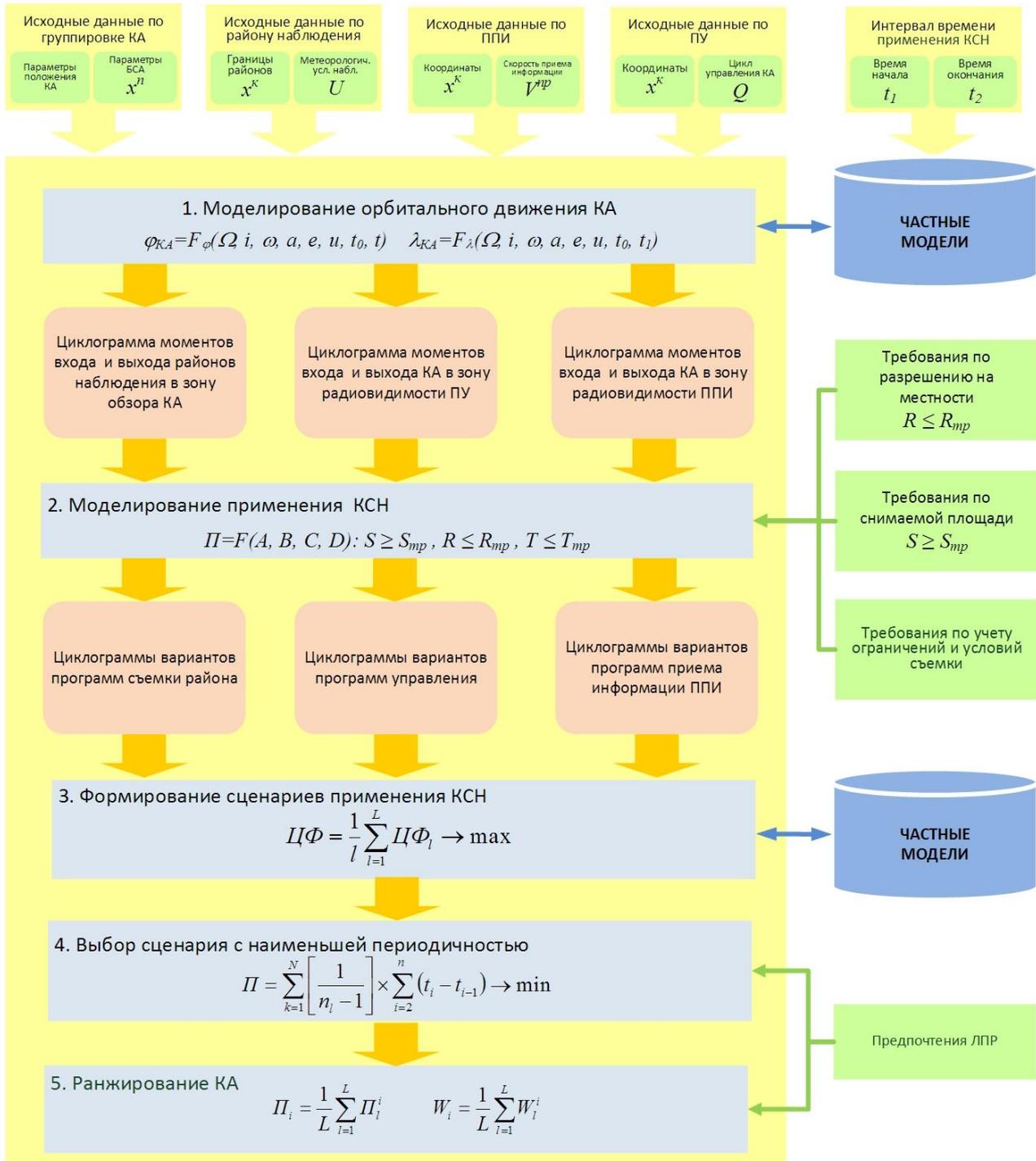


Рис.2. Методика оценки периодичности контроля района с учетом дополнительных условий

Указанные модели программно реализованы в составе программного комплекса моделирования орбитального сегмента информационно-управляющих систем различного целевого назначения [5].

В ходе процесса формирования вариантов съемки районов, в условиях ограничений на объем БЗУ, решаются три взаимосвязанные задачи: планирование работы БСА, планирование доставки данных на ППИ и планирование сеансов управления с КА (закладка программы съемки РН). Взаимосвязь данных задач состоит в том, что результат решения первой задачи является элементом исходных данных для второй задачи.

В соответствии с известным алгоритмом, расчет временных интервалов съемки площадных объектов выбирается в зависимости от ориентации района съемки относительно трассы и размеров кадра [2]:

$$\begin{aligned} \gamma(t_{ik}^1) - l^* &= r_{nik}, \gamma(t_{ik}^2) = r_{nik}, t_{ik}^1 < t_{ik}^2; \\ l^* &= \frac{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{R_z}; \\ \gamma(t) &= ar \cos \frac{(\bar{r}_{KA}(t), \bar{r}_{nik}(t))}{|\bar{r}_{KA}(t)| |\bar{r}_{nik}(t)|}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $r_{KA}$  – радиус вектор КА на момент съемки;  
 $r_{nik}$  – радиус вектор центра проекции кадра;  
 $l_x, l_y$  – линейные размеры проекции кадра.

Зависимость линейного разрешения на местности  $R$  от параметров оптико-электронной аппаратуры и параметров съемки вычисляется по формуле:

$$R = \frac{H}{f r_{an} \cos^2 \varphi \cos^2 \gamma}, \quad (3)$$

где  $H$  – высота съемки;  
 $r_{an}$  – разрешающая способность фотоприемника (ПЗС-матрицы);  
 $f$  – фокусное расстояние оптико-электронной аппаратуры;  
 $\varphi$  – угол наклона оптической оси;  
 $\gamma$  – угол поля зрения на объект наблюдения.

Зависимость линейного разрешения на местности по дальности  $R_x$  и азимуту  $R_r$  от параметров радиолокационной аппаратуры вычисляется по формулам:

$$R_x = \frac{D\lambda}{D_x}, \quad R_r = \frac{c}{2\Delta f \cos \alpha}, \quad (4)$$

где  $D$  – дальность съемки;  
 $c$  – скорость распространения ЭМВ;  
 $\Delta f$  – частота следования импульсов сигнала;  
 $D_x$  – линейный размер антенны;  
 $\lambda$  – длина волны.

План съемки РН орбитальной группировкой КА, составленный в соответствии с критерием минимизации времени доставки информации потребителям, формируется относительно приоритета съемки районам с наилучшим разрешением на местности:

$$\begin{aligned} \text{ЦФ} &= \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \text{ЦФ}_l \rightarrow \max, \\ \text{ЦФ}_l &= a_1 \left( 1 - \frac{\tau_l}{\tau_{\max}} \right) + a_2 \left( 1 - \frac{S_l}{S_{\max}} \right) + a_3 \left( 1 - \frac{R_l}{r_{\max}} \right), \\ a_1 + a_2 + a_3 &= 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $L$  – количество районов наблюдения;  
 $\tau_l$  – оперативность получения снимка  $l$ -го района наблюдения на ППИ;  
 $S_l$  – площадь снимка  $l$ -го района наблюдения;  
 $R_l$  – разрешение на местности снимка  $l$ -го района наблюдения;  
 $\tau_{\max}$  – предельное время хранения снимка;  
 $S_{\max}$  – максимальная площадь снимка;  
 $R_{\max}$  – предельно допустимое разрешение снимка;  
 $a_1, a_2, a_3$  – весовые коэффициенты.

В качестве показателя периодичности используется показатель, характеризующий среднее значение периодичности наблюдений:

$$\Pi = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{1}{n_l - 1} \right] \times \sum_{i=2}^n (t_i - t_{i-1}). \quad (6)$$

Исходя из выражения (6), показатель  $\Pi$  зависит только от числа выходов на РН, т. е. из суммы выходов на РН каждого КА. Вклад каждого КА в наблюдение  $l$ -го РН представляется в следующем виде:

$$\Pi_l^i = \frac{h_l^i}{n_l}, \quad W_l^i = \frac{h_l^i}{n_l}, \quad (7)$$

где  $\Pi_l^i$  – относительный взвешенный коэффициент вклада  $i$ -го КА в периодичность наблюдаемости  $l$ -го РН;  
 $W_l^i$  – относительный взвешенный коэффициент вклада  $i$ -го КА в производительность наблюдения  $l$ -го РН;  
 $h_l^i$  – количество сеансов наблюдения  $i$ -ым КА  $l$ -го РН;  
 $n_l$  – общее число сеансов наблюдения  $l$ -го РН.

Общий вклад  $i$ -го КА в наблюдение всего множества РН можно записать в следующем виде:

$$\Pi_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \Pi_l^i, \quad W_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W_l^i, \quad (8)$$

Данный показатель (относительный взвешенный коэффициент вклада КА в периодичность наблюдаемости) лежит в интервале от 0 до 1. Сумма вклада всех КА всегда равна 1, что позволяет оценить значимость каждого КА из состава орбитальной группировки КСН.

Приведем расчетный пример определения периодичности наблюдения контролируемых районов орбитальной группировкой КА с учетом детальности космической съемки.

Космическая система наблюдения применяется на интервале 10 суток (с 00.00 25 апреля 2019 г.) и включает в свой состав:

- орбитальную группировку в составе пяти КА («Ресурс-П1», «Канопус-В3», «Канопус-В4», «Канопус-В5», «Канопус-В6»);
- пункты приема информации, расположенные в г. Москва и г. Хабаровск;
- пункты управления, расположенные в г. Москва и г. Енисейск.

Цель применения КСН заключается в экологическом контроле района расположения космодрома Восточный ( $S_{\text{тр}}=4000 \text{ км}^2$ ) с требованием по детальности получаемых изображений  $R_{\text{тр}} \leq 2,5 \text{ м}$ . Требование по оперативности доставки информации не учитывается.

Необходимо определить периодичность наблюдения района, а также вклад каждого КА в производительность контроля, оцениваемую площадью отснятой им территории, а также провести ранжирование КА.

По результатам расчетов, выполненных с использованием программного комплекса моделирования применения космических систем и средств, периодичность наблюдения контролируемого РН орбитальной группировкой КА с учетом детальности космической съемки (П) составила 22 ч 46 мин.

Результаты ранжирования и вклад КА в обеспечение контроля РН представлены на рис. 3.

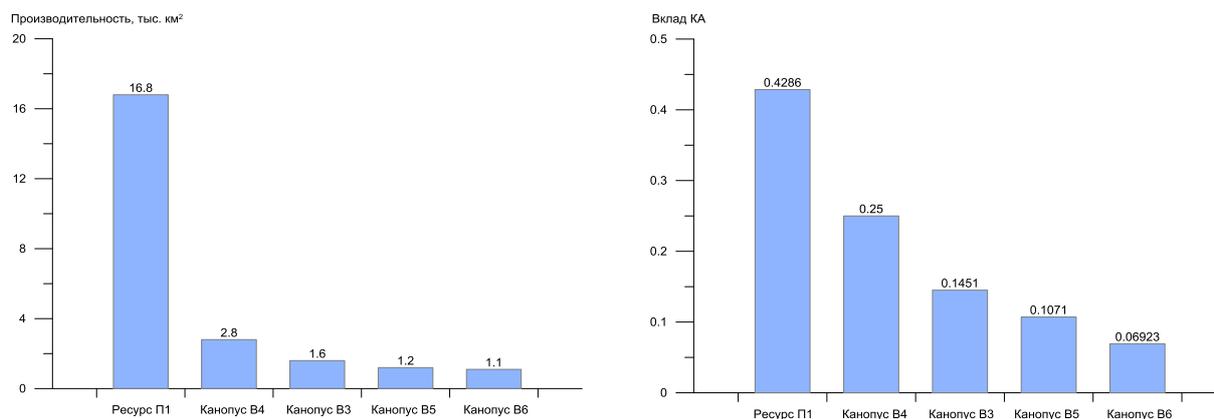


Рис.3. Вклад КА в обеспечение контроля РН и результаты ранжирования КА

Таким образом, получены оценки периодичности контроля РН, а также выполнено ранжирование КА по площади снимаемой территории и определен вклад каждого КА в решение задачи контроля.

Установлено, что периодичность съемки, определяемая без ограничений по производительности (покрытия съемкой всей площади районов) и детальности (требуемого разрешения на местности) может быть завышена в 2,7 раза.

Данное обстоятельство может привести к невыполнению требований ТТЗ на создание КСН, а также требований к орбитальной группировке КСН военного и двойного назначения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная методика расчета периодичности наблюдения контролируемых районов орбитальной группировкой КА обладает научной и практической новизной. В ней учитывается наземная инфраструктура КСН, которая включает не только ППИ, но и ПУ, обеспечивающие закладку программы съемки районов наблюдения.

Кроме того, задача определения периодичности съемки в условиях ограничений на снимаемую площадь и детальность получаемой ГПИ является актуальной в области обеспечения военной безопасности при контроле районов применения войск, а также приграничных территорий Российской Федерации.

Разработанный научно-методический аппарат программно реализован и используется при выполнении научных исследований в области оценки эффективности применения космических систем и средств.

### Список используемых источников

1. *Гонин Г.Б.* Космические съемки Земли. – Л.: Недра, 1989. – 252 с.
2. *Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А.* Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие. – Самара: СГАУ, 2006. – 295 с.
3. *Лебедев А.А., Нестеренко О.П.* Космические системы наблюдения: синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
4. Методические рекомендации по подготовке предложений в проекты Концепции Федеральной космической программы России и Федеральной космической программы России на 2016–2025 гг. – М.: Госкорпорация «Роскосмос», 2016. – 84 с.
5. О порядке получения, использования и предоставления геопространственной информации: пост. Правит-ва РФ №326 от 28 мая 2007. – URL: <http://base.garant.ru/12153856/> (дата обращения: 10.06.2019).
6. *Колесник А.В., Прокопенко Е.А., Янов С.В.* Результаты разработки прикладного программного обеспечения во 2 управлении военного института (научно-исследовательского) // Новатор. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 34. – С.56–61.

А.С. Данилюк,

кандидат военных наук, доцент

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург;

С.В. Дианов,

Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники;

Д.А. Тавалинский,

доктор техн. наук, доцент

Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники

## ОЦЕНИВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ ПРИМЕНИМОСТИ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЛИНЕЙНЫХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОДОВ БЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ

Рассмотрены особенности применения алгебраического и статистического методов анализа линейных корректирующих кодов блочной структуры (ЛККБС) в двоичных последовательностях в условиях априорной структурной и параметрической неопределенности.

Предложен подход применения полученных оценок границ применимости метода на основе решения систем линейных уравнений (СЛУ) со статистической выбраковкой ошибочных кодовых слов и статистическим усреднением результатов решения СЛУ при определении параметров ЛККБС с большой длиной блока.

Ключевые слова: анализ кодов, двоичная последовательность, линейный корректирующий код блочной структуры, система линейных уравнений, статистическая обработка.

Из всего многообразия помехоустойчивых кодов (ПК), использующихся в сигналах телекоммуникационных систем (ТКС), большую часть занимают двоичные ЛККБС. Помимо линейных блочных кодов (ЛБК), класс ЛККБС дополняют блочные турбокоды и схемы каскадного кодирования на основе ЛБК. Характерными представителями данного класса являются *LDPC* коды, обладающие большой длиной блока, на которой существуют линейные зависимости. Применение в сигналах ТКС ЛККБС с большой длиной блока определяет рост априорной неопределенности относительно параметров ПК на уровне канального кодирования при их идентификации.

Устранение априорной неопределенности относительно вида и параметров ПК является одной из важнейших задач анализа сигналов, без решения которой невозможно извлечение передаваемой информации из сигналов ТКС. Определение наличия и параметров ЛККБС в демодулированной двоичной последовательности (ДП) реализуется, как правило, методом пробного декодирования, а при отсутствии эталонного описания (декодера) – расчетными методами [1, 2] в отложенном режиме.

Среди методов анализа ДП на уровне кодера канала широкое применение получил метод анализа ПК на основе решения систем линейных уравнений (СЛУ) в поле  $GF(2)$  [2]. При отсутствии ошибок в анализируемой ДП метод на основе решения СЛУ обеспечивает наибольшую полноту анализа ПК, так как применим для всего класса линейных кодов, включая ЛККБС. Основным недостатком данного метода является его низкая помехоустойчивость, определяемая размером неискаженной выборки ДП для решения СЛУ. Размер выборки пропорционален квадрату длины  $n$  кодового слова (КС), что ограничивает применение данного метода для анализа ЛККБС с большой длиной блока. Можно показать, что вероятность формирования неискаженной выборки размера  $n^2$  из ДП  $\hat{x}$ , содержащей одиночные независимые ошибки с вероятностью  $p_{\text{ош.}}$ , определяется выражением  $(1 - p_{\text{ош.}})^{n \times n}$  и быстро стремится к нулю с ростом длины  $n$  ЛККБС.

Одним из способов повышения помехоустойчивости метода на основе решения СЛУ является выбраковка искаженных ошибками кодовых комбинаций (КК) на этапе формирования выборки. В настоящее время данная задача решается путем анализа статистики встречаемо-

сти КК в анализируемой ДП и отбора для формирования СЛУ тех КК, встречаемость которых выше некоторого порога  $L_{отб.}$ , где  $L_{отб.}$  – максимально возможное число КК, соответствующих какому-либо неразрешенному КС. Превышение частоты встречаемости КК значения  $L_{отб.}$  является признаком принадлежности КК разрешенному КС ЛККБС. Встречаемость каждой КК, соответствующей разрешенному КС ЛККБС, зависит от статистики кодируемого сообщения и параметров кода. Это определяет минимальный размер выборки, исходя из того, что полную группу событий составляют  $2^n$  КК из которых  $2^k$  разрешенных КС, где  $k$  – число информационных символов,  $n$  – длина ЛККБС.

Пусть разрешенные КС  $(n, k)$  ЛККБС скорости  $R=k/n$  встречаются в анализируемой ДП одинаково часто. Тогда размер анализируемой выборки в КС определяется значением

$$N_{КС} = \nu \times 2^k = \nu \times 2^{nR}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – объем выборки по каждой КК, требуемый для принятия решения о принадлежности КК разрешенному КС ЛККБС. В этом случае  $\nu$  определяет «контрастность» признака принадлежности КК разрешенному КС.

Значения минимального требуемого объема выборки ДП  $Q = n \times N_{КС}$  для значений скорости ЛККБ  $R_1=1/2$  и  $R_2=7/8$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Минимальный требуемый объем выборки  $Q_{min}$  ДП и время  $t_{min}$  ее накопления при символьной скорости 40 Мбит/с**

R	$\nu$	n=32		n=64	
		$Q_{min}, \text{МБ}^*$	$t_{min}$	$q_{min}, \text{МБ}^*$	$t_{min}$
$R_1$	3	0,75	0,15 с	98304	5,46 ч
	7	1,75	0,35 с	229376	12,74 ч
	15	3,75	0,75 с	491520	27,31 ч
$R_2$	3	3072	≈10 мин	1,649E+12	≈10460 лет
	7	7168	≈24 мин	3,848E+12	≈24406 лет
	15	15360	≈51 мин	8,246E+12	≈52298 лет

\* 1 МБ = 1048576 бит.

Значение порога  $L_{отб.}$  определяется длиной КК и вероятностью битовой ошибки в анализируемой ДП, как максимально возможное число искажений разрешенного КС, не приводящих к другим разрешенным КС. Ввиду сложности оценки частоты встречаемости КК, вычислим значение порога для выбраковки ошибочных КК при искажении ДП одиночными независимыми ошибками как среднее числа искаженных КК.

Пусть ошибки в анализируемой ДП  $\hat{x}$  не переводят разрешенные КС ЛККБС в другие, также разрешенные. Тогда,  $P_{\hat{x}}(z)$  – вероятность искажения  $z$  кодовых слов на выборке ДП длиной  $Q = n \times N_{КС}$ , где  $n$  – длина ЛККБС, а  $N_{КС}$  – число КК, используемое для статистической выбраковки ошибочных КС, будет определяться биномиальным законом распределения в соответствии с выражением

$$P_{\hat{x}}(z) = \binom{N_{КС}}{z} p_{КС}^z (1 - p_{КС})^{N_{КС} - z}, \quad (2)$$

где  $z = (0 \dots N_{КС})$ ;

$\binom{N_{КС}}{z}$  – число сочетаний из  $N_{КС}$  по  $z$ ;

$p_{КС}$  – вероятность искажения кодового слова ЛККБС, полученная как вероятность искажения хотя бы одного бита на длине  $n$  кодового слова,

$$p_{КС} = 1 - (1 - p_{ош.})^n. \quad (3)$$

Математическое ожидание и дисперсия числа искаженных кодовых слов  $Z_{\hat{x}}$  на выборке ДП задаются выражениями:

$$\tilde{m}(Z_{\dot{x}}) = p_{\text{КС}} N_{\text{КС}}, \quad (4)$$

$$\tilde{d}(Z_{\dot{x}}) = p_{\text{КС}} (1 - p_{\text{КС}}) N_{\text{КС}}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5), определим значение порога  $L_{\text{отб.}}$  для отбора неискаженных КС как возможное число искаженных КС на выборке (1), усредненное по числу разрешенных КС. Возможное число искаженных КС рассчитывается из «правила трех сигма» для  $Z_{\dot{x}}$ . Тогда, используя (1), получим

$$L_{\text{отб.}} = \frac{\tilde{m}(Z_{\dot{x}}) + 3\sqrt{\tilde{d}(Z_{\dot{x}})}}{2^{nR}} = \nu p_{\text{КС}} + 3\sqrt{\frac{\nu p_{\text{КС}} (1 - p_{\text{КС}})}{2^{nR}}}. \quad (6)$$

Нормированные значения порога ( $L_{\text{отб.}} / \nu$ ) для различных значений длины  $n$  ЛККБС и вероятности ошибки на бит  $p_{\text{ош.}}$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Оценки значений ( $L_{\text{отб.}} / \nu$ ) для отбора неискаженных КС

$p_{\text{ош.}}$	Длина кодового слова ЛККБС $n$						
	15	63	255	1023	4095	16383	65535
$10^{-2}$	0,2233	0,4691	0,9229	0,9999	≈1	≈1	≈1
$10^{-3}$	0,0421	0,0611	0,2252	0,6407	0,9834	0,9999	≈1
$10^{-4}$	0,0101	0,0063	0,0252	0,0972	0,3360	0,8057	0,9986
$10^{-5}$	0,0029	0,0006	0,0025	0,0102	0,0401	0,1511	0,4807
$10^{-6}$	0,0009	0,0001	0,0003	0,0010	0,0041	0,0162	0,0634

Анализ значений табл. 1 показал ограничения метода статистической выбраковки ошибочных КС уже при  $n \geq 32$  для высокоскоростных ЛККБС по показателям ресурсоемкости и оперативности. Значения порога  $L_{\text{отб.}}$  (табл. 2) при большой длине КС  $n$  и/или  $p_{\text{ош.}}$  достигают значения, близкого к единице, что делает практически невозможным отбор неискаженных КС при формировании выборки для решения СЛУ. В табл. 2 подобные значения порога выделены темным фоном. В связи с этим, метод статистической выбраковки ошибочных кодовых слов по показателям ресурсоемкости и оперативности применим для коротких ( $n \leq 31$ ) ЛККБС и ограничен в применении по показателю помехоустойчивости парами значений длины КС и вероятности битовой ошибки (табл. 2), для которых по порогу (6) возможно отобрать разрешенные КС.

Другим способом повышения помехоустойчивости метода на основе решения СЛУ является статистическая обработка множества результатов решений СЛУ по различным выборкам. Частным случаем такого подхода, позволяющим минимизировать число хранимых в памяти вычислителя промежуточных решений, является усреднение (8) значений на позициях элементов в матрицах  $[a_{i,j}^{(m)}]$  множества решений СЛУ по числу матриц  $M$  с последующим преобразованием (9) матрицы усредненных значений  $[b_{i,j}]$  к результирующей матрице  $[c_{i,j}]$  с элементами из  $GF(2)$ :

$$\{[a_{i,j}^{(m)}]\}_{<M>} \xrightarrow{(8)} [b_{i,j}] \xrightarrow{(9)} [c_{i,j}], m = 1 \dots M; \quad (7)$$

$$b_{i,j} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_{i,j}^{(m)}, b_{i,j} \in \mathbf{Q}_{[0,1]}, a_{i,j}^{(m)} \in GF(2); \quad (8)$$

$$c_{i,j} = \begin{cases} 0, & b_{i,j} < 0,5 \\ 1, & b_{i,j} \geq 0,5 \end{cases}, c_{i,j} \in GF(2), b_{i,j} \in \mathbf{Q}_{[0,1]}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{Q}_{[0,1]}$  – множество рациональных чисел в диапазоне от нуля до единицы включительно,  $i = 1 \dots n, j = 1 \dots n$ .

Этапы реализации метода усреднения решений СЛУ (УРСЛУ) для (63,32) ЛККБС с порождающей матрицей (ПМ)  $[g_{i,j}]$  и  $p_{\text{ош.}} = 5,64 \times 10^{-4}$  приведены на рис. 1. Здесь матрицы  $[g_{i,j}]$  и  $[b_{i,j}]$  для  $i = 1..32, j = 1..63$  представлены в виде фотограмм. На фотограммах единичному значению элемента из  $GF(2)$  соответствует черный элемент фотограммы, а нулевому – белый. Матрицы с элементами из  $Q_{[0,1]}$  представлены градациями серого цвета, где черный цвет соответствует единице, белый – нулю. При  $M=1$  (рис. 1,а)  $b_{i,j} \in \{0,1\}$ . Матрица  $[g_{i,j}]$  прорисована поверх матрицы  $[b_{i,j}]$ . Для их различения элементы матрицы  $[g_{i,j}]$  изображены контурными линиями.

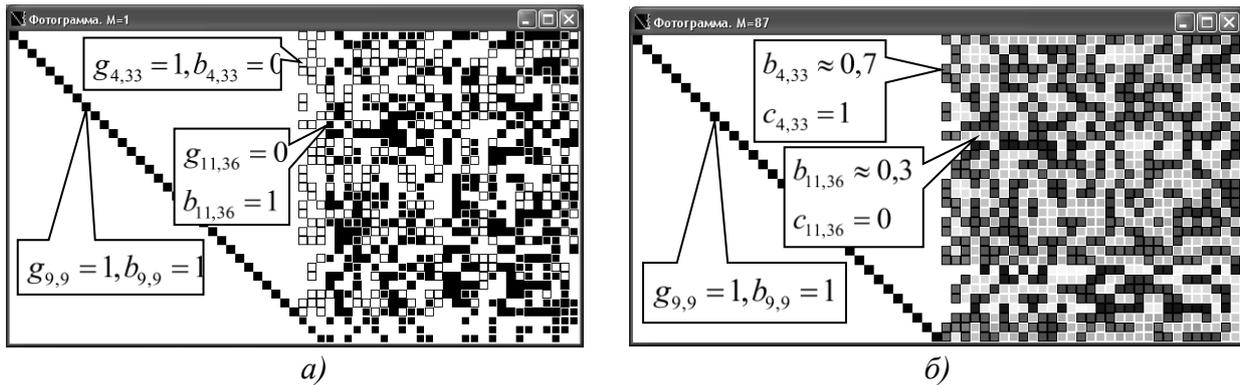


Рис. 1. Фотограммы значений матриц  $[g_{i,j}]$  и  $[b_{i,j}]$  для (63,32) ЛККБС:  
а –  $M=1$ ; б –  $M=87$

При  $M=1$  значения  $[b_{i,j}]$  и  $[c_{i,j}]$  совпадают, при этом из-за наличия ошибок в  $[a_{i,j}^{(1)}], [c_{i,j}] \neq [g_{i,j}]$  (рис. 1,а). В результате накопления и усреднения решений СЛУ  $[a_{i,j}^{(m)}]$  при  $M \geq 87$   $[c_{i,j}] = [g_{i,j}]$ , где  $i = 1..32, j = 1..63$  (на рис. 1,б единичные элементы  $[c_{i,j}]$  и  $[g_{i,j}]$ , представленные черными контурными линиями, совпадают).

При практической реализации метода УРСЛУ значение  $M$  может быть задано в виде некоторой константы  $M = M_{\text{const}}$  или увеличиваться от  $M_{\text{min}}$  до  $M_{\text{max}}$  по мере поступления (считывания) данных ДП. Во втором случае выражение (8) пересчитывается для очередного значения  $M$ , а остановка алгоритма (7) при  $M_{\text{min}} \leq M < M_{\text{max}}$  может выполняться по достижению «контраста» матрицы  $[b_{i,j}]$ , определяемого минимальной разницей  $\Delta_b$  значений  $b_{i,j}$  и среднего уровня

$$\Delta_b = \min(|b_{i,j} - 0,5|), i = 1..n, j = 1..n. \quad (10)$$

В отличие от способа статистической выбраковки ошибочных КК метод УРСЛУ применим для анализа ЛККБС с большой длиной блока. Минимальный объем выборки, требуемый для реализации способа, составляет  $N_{\text{КС}} = M \times n$  кодовых слов ( $q_{\text{min}} = M \times n^2$  элементов ДП для ЛККБС). Решение СЛУ, как правило, реализуется по алгоритму Гаусса. Из-за размножения ошибок при реализации алгоритма Гаусса оценка помехоустойчивости метода УРСЛУ является аналитически сложной, поэтому проведена экспериментально на ПЭВМ.

План эксперимента состоит в следующем. Проводятся  $\psi$  серий однородных и независимых испытаний, в которых оценивается доля  $D(n, p_{\text{ош.}})$  верных ( $[c_{i,j}] = [g_{i,j}]$ , где  $i = 1..k, j = 1..n$ ) исходов алгоритма (7) метода УРСЛУ для различных значений длины  $n$  ЛККБС и вероятности одиночной независимой ошибки  $p_{\text{ош.}}$ . При проведении эксперимента длина  $n$  и границы КС ЛККБС считаются известными. Число  $\psi$  для каждой пары значений  $n$  и  $p_{\text{ош.}}$

определяется значениями доверительной вероятности  $\beta$  и погрешности  $\varepsilon$  статистической оценки  $D(n, p_{\text{ош.}})$  [4].

Из ДП с ЛККБС формируются две одинаковые выборки размером  $q_\psi$ , необходимым для проведения  $\psi$  серий испытаний. Вторая выборка искажается одиночными независимыми ошибками с заданной вероятностью  $p_{\text{ош.}}$ . Моделирование ошибок на выборке размером  $q_\psi$  позволяет имитировать одиночные независимые ошибки с вероятностью  $p_{\text{ош.}} < 1/n^2$  и оценить апостериорную вероятность ошибки  $p_{\text{ош.}}^*$ .

В каждой  $\varphi$ -й серии ( $\varphi = 1, \dots, \psi$ ) испытаний из полученных выборок формируются матрицы  $[x_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,1)}$  и  $[\hat{x}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,2)}$  соответственно, где строки матрицы  $[x_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,1)}$  соответствуют КС ЛККБС

$$[\hat{x}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,2)} = [x_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,1)} \oplus [\hat{e}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi)}, \quad (11)$$

где  $i = 1 \dots n, j = 1 \dots n$ ,  $[\hat{e}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi)}$  – матрицы ошибок;

$\oplus$  – сумма в поле  $GF(2)$ .

На сформированных матрицах  $[x_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,1)}$  и  $[\hat{x}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,2)}$  независимо выполняются алгоритм Гаусса (AG) и алгоритм (7) метода УРСЛУ с  $1 \leq M_\varphi \leq M_{\text{max}}$ :

$$\begin{aligned} [x_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,1)} &\xrightarrow{AG} [a_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,1)} \xrightarrow{(7)} [c_{i,j}]^{(\varphi,1)}, \\ [\hat{x}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,2)} &\xrightarrow{AG} [\hat{a}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi,2)} \xrightarrow{(7)} [\hat{c}_{i,j}]^{(\varphi,2)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Затем выполняется сравнение результатов (12) по числу  $\nu$  одинаковых столбцов матриц  $[c_{i,j}]^{(\varphi,1)}$  и  $[\hat{c}_{i,j}]^{(\varphi,2)}$ . При равенстве рангов матриц  $[c_{i,j}]^{(\varphi,1)}$  и  $[\hat{c}_{i,j}]^{(\varphi,2)}$  сравниваются  $w_\varphi = n - \text{rang}([c_{i,j}]^{(\varphi,1)})$  столбцов матриц на одинаковых позициях правее крайнего ненулевого диагонального элемента. Результатом каждого испытания в  $\varphi$ -й серии является доля  $d_\varphi = \nu_\varphi / w_\varphi$  совпавших столбцов. При совпадении всех столбцов ( $d_\varphi = 1$ )  $\varphi$ -я серия считается завершенной с успешным исходом с числом испытаний в ней  $M_\varphi^*$ , где  $M_\varphi^* \leq M_{\text{max}}$ .

Значения  $M_\varphi^*$  для каждой пары значений  $n$  и  $p_{\text{ош.}}^*$  предлагается использовать для получения статистической оценки

$$\tilde{M}_\beta^* = \min(\arg(F^*(\hat{M}_\varphi^*) \geq \beta)), \quad (13)$$

где  $F^*(\hat{M}_\varphi^*)$  – статистическая функция распределения случайной величины  $\hat{M}_\varphi^*$ .

На рис. 2 приведены промежуточные результаты эксперимента по оцениванию помехоустойчивости метода УРСЛУ для (63,32) ЛККБС и  $p_{\text{ош.}}^* = 5,02 \times 10^{-4}$ . Пунктирными линиями показаны совпадающие столбцы матриц  $[c_{i,j}]^{(\varphi,1)}$  и  $[\hat{c}_{i,j}]^{(\varphi,2)}$  на позициях от  $(\text{rang}([c_{i,j}]^{(\varphi,1)}) + 1)$  до  $n$  включительно.

Доля  $D$  (без потери общности аргументы  $n$  и  $p_{\text{ош.}}$  опущены) верных исходов алгоритма (7) рассчитывается как отношение числа серий с успешным исходом  $\psi^*$  к общему числу серий  $\psi$

$$D = \frac{\psi^*}{\psi}. \quad (14)$$

Усреднение результатов решений СЛУ по первой выборке (верхняя строка формулы (12)) требуется для обеспечения равных условий при сравнении  $[c_{i,j}]^{(1)}$  и  $[\hat{c}_{i,j}]^{(2)}$  в случаях различных  $[a_{i,j}^{(m)}]^{(1)}$  для множества значений  $m$ . Это возможно в следующих случаях. Первый, когда  $[a_{i,j}^{(m_1)}]^{(1)} \neq [a_{i,j}^{(m_2)}]^{(1)}$ , где  $m_1 \in (1 \dots M)$ ,  $m_2 \in (1 \dots M)$  и  $m_1 \neq m_2$ , при  $\text{rank}[x_{i,j}^{(m_1)}]^{(1)} \neq \text{rank}[x_{i,j}^{(m_2)}]^{(1)}$ .

Второй, когда  $\text{rank} [x_{i,j}^{(m_1)}]^{(1)} = \text{rank} [x_{i,j}^{(m_2)}]^{(1)} < k$  и решения  $[a_{i,j}^{(m_1)}]^{(1)}$ ,  $[a_{i,j}^{(m_2)}]^{(1)}$  содержат различные наборы линейно-независимых КК.

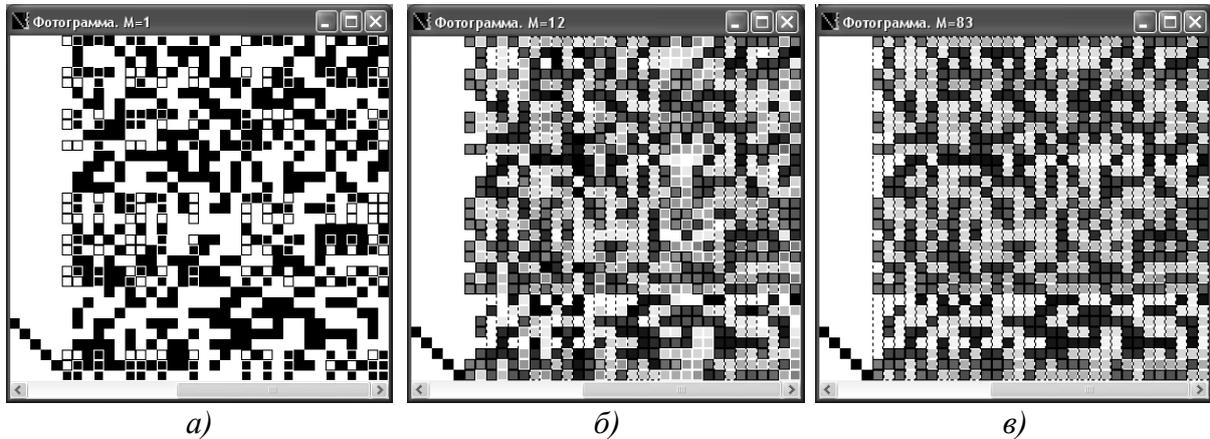


Рис. 2. Фотограммы значений матриц  $[c_{i,j}]^{(1)}$  и  $[b_{i,j}^{(m)}]^{(2)}$  для (63,32) ЛККБС:

$$a - M_\varphi = 1, d_\varphi = 0; \quad б - M_\varphi = 12, d_\varphi = 16/31; \quad в - M_\varphi^* = 83, d_\varphi = 1$$

Для каждой пары значений  $n$  и  $p_{\text{ош.}}$  по окончании испытаний рассчитывается апостериорная вероятность ошибки  $p_{\text{ош.}}^*$ , характеризующая границы применимости метода УРСЛУ по показателю помехоустойчивости

$$p_{\text{ош.}}^* = \frac{\sum_{\varphi} \sum_{m=1}^{M_\varphi^*} \text{wt}([\hat{e}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi)})}{q_\psi^*}, \quad (15)$$

где  $\text{wt}([\hat{e}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi)})$  — число ненулевых элементов в матрице  $[\hat{e}_{i,j}^{(m)}]^{(\varphi)}$ ;

$q_\psi^*$  — задействованный для расчетов объем выборки ДП,  $q_\psi^* = \sum_{\varphi} (M_\varphi^* \cdot n^2)$ .

В соответствии с описанным планом эксперимента проведена оценка помехоустойчивости метода УРСЛУ. В качестве показателя помехоустойчивости метода для различных значений длины  $n$  и  $p_{\text{ош.}}^*$  выступает доля  $D$  верных исходов алгоритма (7), определяемая выражением (14). Результаты оценивания с выбранными значениями доверительной вероятности  $\beta=0,95$  и погрешности статистической оценки  $\varepsilon=0,01$  величины  $D$  для  $(n, k)$  ЛККБС с  $R \approx 1/2$  приведены на рис. 3.

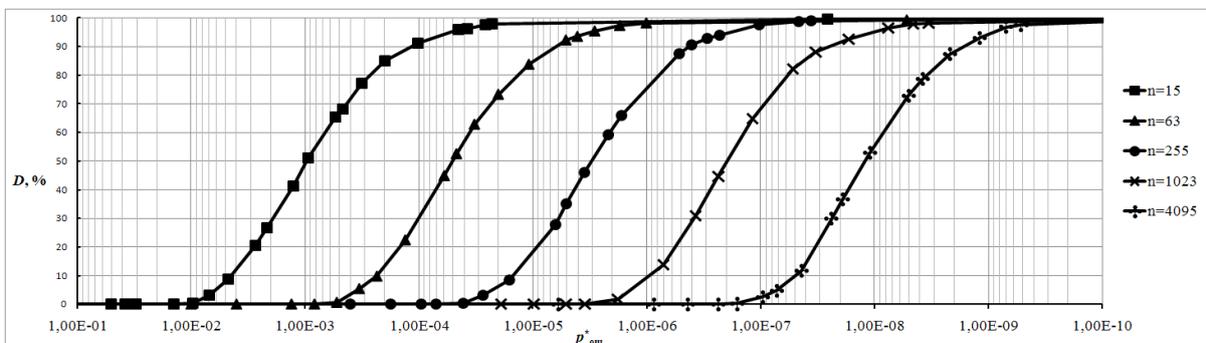


Рис. 3. Зависимости значений  $D$  от вероятности ошибки  $p_{\text{ош.}}^*$ .

Представленные на рис. 3 графики зависимостей имеют схожие формы и различаются положением по оси абсцисс в зависимости от длины  $n$  ЛККБС. Изменение (увеличение)  $n$ , в

среднем в четыре раза, приводит к смещению графика по оси абсцисс (сдвигу вправо) на величину, соответствующую изменению (уменьшению) вероятности битовой ошибки в 16 раз (на 24 дБ). Выявленная закономерность позволяет спрогнозировать зависимости значений  $D$  от вероятности битовой ошибки для длинных ( $n > 4095$ ) ЛККБС. Результаты оценивания помехоустойчивости метода УРСЛУ с учетом прогноза приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Граничные значения вероятностей битовых ошибок  $p_{\text{ош.}}$ , при которых обеспечивается не менее  $D'$  верных исходов реализации метода**

$D'$ , %	Длина кодового слова ЛККБС $n$						
	15	63	255	1023	4095	16383*	65535*
$\geq 90$	$\leq 1,1 \times 10^{-4}$	$\leq 6,4 \times 10^{-6}$	$\leq 4,1 \times 10^{-7}$	$\leq 2,4 \times 10^{-8}$	$\leq 1,5 \times 10^{-9}$	$\leq 9,4 \times 10^{-11}$	$\leq 5,8 \times 10^{-12}$
$\geq 70$	$\leq 4,2 \times 10^{-4}$	$\leq 2,4 \times 10^{-5}$	$\leq 1,4 \times 10^{-6}$	$\leq 9,0 \times 10^{-8}$	$\leq 5,5 \times 10^{-9}$	$\leq 3,4 \times 10^{-10}$	$\leq 2,1 \times 10^{-11}$
$\geq 50$	$\leq 9,1 \times 10^{-4}$	$\leq 5,0 \times 10^{-5}$	$\leq 3,0 \times 10^{-6}$	$\leq 1,9 \times 10^{-7}$	$\leq 1,2 \times 10^{-8}$	$\leq 7,5 \times 10^{-10}$	$\leq 4,7 \times 10^{-11}$

\* Значения  $p_{\text{ош.}}$  для отмеченных длин спрогнозированы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного оценивания совместного использования алгебраических методов анализа ЛККБС со статистической выбраковкой ошибочных КК и статистической обработкой множества результатов решений СЛУ получены границы их применения в условиях высокой степени зашумления ДП на уровне кодера канала.

1. Применение статистической выбраковки ошибочных КК ограничивается возможностью разделения разрешенных КС ЛККБС от запрещенных (ошибочных) по порогу (6), зависящему от длины  $n$  КК и вероятности битовой ошибки  $p_{\text{ош.}}$ . Оценки значений порога принятия решения для ЛККБС с длиной блока до 65535 приведены в табл. 2. Кроме того, выявлена степенная зависимость (1) размера выборки для выбраковки ошибочных КК от длины  $n$  кода и время ее накопления (см. табл. 1). Метод статистической выбраковки ошибочных КК по показателю оперативности, при отсутствии априорных сведений о принадлежности КК множеству разрешенным КС ЛККБС, применим для коротких ( $n \leq 31$ ) кодов.

2. Частным случаем статистической обработки результатов решений СЛУ является метод УРСЛУ, применимый для анализа ЛККБС с большой длиной блока и позволяющий минимизировать число хранимых в памяти вычислителя промежуточных решений. Экспериментально получены границы применимости метода УРСЛУ для ЛККБС с длиной блока до 4095, которые характеризуются процентной зависимостью числа верных исходов алгоритма (7) метода УРСЛУ от вероятности битовой ошибки (см. рис. 3). На основании полученных зависимостей спрогнозированы показатели помехоустойчивости метода УРСЛУ для ЛККБС с длиной блока до 65535 (табл. 3).

## Список используемых источников

1. Гизунов С.А., Гречкин А.О., Коновальчик П.М. Анализ сигналов электросвязи. – М.: Янус-К, 2005. – 347 с.
2. Антипин В.Н., Еремеев И.Ю., Шишкалов А.В. Алгебраические методы анализа дискретных сигналов: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 108 с.
3. Статистические методы обработки результатов наблюдений / под ред. Р.М. Юсупова. – Л.: МО СССР, 1984. – 564 с.

Э.Р. Дашкин,  
кандидат техн. наук;  
В.В. Поляков,  
кандидат техн. наук, доцент

## СПОСОБ СОВМЕСТНОГО СОКРАЩЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ И ОЦЕНИВАНИЯ РАНГА КОВАРИАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Предложены способ сокращения избыточности представления данных изображения, регистрируемого матричным оптическим датчиком, и процедура нахождения ранга его ковариационной матрицы при обнаружении элементов «космического мусора» с использованием наземной оптико-электронной системы. Показана взаимосвязь между оцениваем количества элементов разложения оптического датчика занятых сигналами целей и звезд в изображении и сокращением его избыточности.

Ключевые слова: околоземный космос, техногенные объекты, «космический мусор», оптико-электронная система, обнаружение сигналов, оптический датчик, сокращение избыточности изображений, ранг многомерно-го процесса.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных научно-технических проблем в области космических исследований является проблема повышения эффективности контроля за элементами «космического мусора» (целями) в околоземном космосе. Ее решение требует, в частности, повышения качества обнаружения целей [1] и их распознавания [2] оптико-электронными системами (ОЭС). В работе [1] был предложен наиболее эффективный способ обнаружения целей, позволяющий учитывать в обработке не только средние значения обрабатываемых сигналов целей, но и их случайные составляющие при работе ОЭС в условиях априорной неопределенности статистических характеристик обрабатываемых сигналов в виде гауссовых случайных величин, снимаемых с матричного оптического датчика (ОД). При этом совмещение изображений при межкадровой обработке предлагается осуществлять на основе многоуровневого квантования [3] с оцениванием центров тяжести сигналов целей по трем координатам [4].

Практическая реализация такой обработки требует использования высокопроизводительной вычислительной системы и применения методов сокращения избыточности представления данных изображений [4].

### СХЕМА СОКРАЩЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ОБРАБОТКОЙ В ОБЛАСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Все изображения, регистрируемые ОД ОЭС при обнаружении целей, характеризуются большой информационной избыточностью, за счет редукции которой можно упростить их обработку. В этом случае применимы различные методы и алгоритмы сокращения избыточности представления данных из теории цифровой обработки сигналов [5].

Избыточность представления данных изображений можно характеризовать ковариационной матрицей размера  $PN \times PN$

$$\mathbf{K}_v = M \left[ (\vec{v} - M(\vec{v}))(\vec{v} - M(\vec{v}))^T \right], \quad (1)$$

где  $M[\cdot]$  – среднее значение по ансамблю;  
 $\vec{v}$  – вектор, построенный из сигнальных отсчетов  $v(x, y)$  изображения;  
 $PN$  – размерность ОД.

Использование разложения Карунена-Лоэва в совокупности с методом главных компонент позволяет сократить избыточность представления данных изображения [6].

Ковариационная матрица изображения  $\mathbf{K}_v$  учитывает корреляцию отсчетов изображения в плоскости  $(x, y)$ , являющейся координатной плоскостью изображения, снимаемого с ОД. В этом случае важным методом многомерного статистического анализа служит исследование массива данных не только в их естественных координатах, но и в системах координат, основанных на собственных значениях и собственных векторах ковариационной матрицы

$$\mathbf{K}_v = \Phi \Lambda \Phi^T, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – матрица, составленная из ортогональных собственных вектор-столбцов  $\vec{\Phi}_i$ ;  
 $\Lambda$  – диагональная матрица собственных значений.

Матрица  $\Phi$  обладает тем свойством, что умножение ее на вектор-изображение  $\vec{v}$ , снимаемый с ОД (образованный лексикографической расстановкой), дает вектор размера  $l \times 1$

$$\vec{N}_l = \Phi \vec{v}, \quad (3)$$

где  $l$  – количество элементов разложения ОД, занятых сигналами космических объектов искусственного и естественного происхождения в изображении.

Компоненты вектора  $\vec{N}_l$  имеют некоррелированные компоненты, расставленные в порядке убывания их дисперсий, что является свойством дискретного варианта разложения Карунена-Лоэва, фактически описанного соотношениями (2) и (3).

Использование метода главных компонент в данном случае позволяет не только сократить избыточность представления данных изображений, но и оценить число элементов разложения ОД, занятых сигналами звезд и целей, находящихся в изображении. Для этого необходимо осуществить процедуры (2) и (3) таким образом, чтобы получить оценки собственных чисел  $\lambda_{ii}$  ковариационной матрицы  $\hat{\mathbf{K}}_v$  в порядке убывания, т.е.  $\lambda_{11} \geq \lambda_{22} \geq \dots \geq \lambda_{MM}$ . При этом  $p$  первых собственных числа будут иметь существенно большие значения по сравнению с остальными  $M - p$  собственными числами.

Факторный анализ определяет, что  $p$  первых больших собственных числа в соответствии с методом главных компонент относят к главным информативным факторам. Остальные собственные числа обычно отбрасывают. Главным вопросом при этом является автоматическое определение числа главных компонент. Решение задачи упрощается благодаря тому, что число главных компонент  $p$  равно рангу ковариационной матрицы сигналов составляющих «звездного фона» и целей  $\mathbf{K}_v = \mathbf{K}_z + \mathbf{K}_s$  (где  $\mathbf{K}_z$  – ковариационная матрица сигналов составляющих «звездного фона», а  $\mathbf{K}_s$  – ковариационная матрица сигналов целей). Поэтому задача определения числа главных компонент состоит в оценке ранга матрицы  $\mathbf{K}_z + \mathbf{K}_s$ . Поскольку матрица  $\mathbf{K}_z + \mathbf{K}_s$  априорно неизвестна, приходится оценивать «эффективный ранг»  $p$ , располагая оценками ковариационных матриц  $\hat{\mathbf{K}}_1 = \hat{\mathbf{K}}_z + \hat{\mathbf{K}}_0$  или  $\hat{\mathbf{K}}_0$  ( $\hat{\mathbf{K}}_0$  – ковариационная матрица совокупности сигналов составляющих «звездного фона» и интегрального помехового фона – «фона неба»), имеющих ранг  $M - p$ .

Оценить эффективный ранг можно, используя критерий [7]:

$$J_p = \sum_{i=1}^p \frac{\hat{\lambda}_{ii}}{\text{tr}[\hat{\mathbf{K}}_0]}, \quad (4)$$

где  $\text{tr}[\cdot]$  – след ковариационной матрицы, находящейся в квадратных скобках.

Величина  $J_p$  равна доле следа матрицы  $\hat{\mathbf{K}}_0$ , обусловленной первыми  $p$  главными компонентами. Чем ближе значение величины  $J_p$  к единице, тем меньше ошибка, получаемая за счет отбрасывания малых  $M - p$  чисел.

В алгоритмах оценивания больших выбросов можно использовать обучающую выборку совокупности «фона неба» и собственных шумов ОД, по которой можно сформировать оценки малых собственных чисел и с их помощью установить порог и использовать статистические тесты для проверки равенства нескольких дисперсий [8]. К ним относятся: критерий Хартли, критерий Кокрена, критерий Бартлета [8].

Оценка эффективного ранга реализуется на основе следующей многоэтапной процедуры. На первом этапе проверяется гипотеза о том, что дисперсии двух последних собственных чисел равны между собой, т.е. выполняется условие, что  $\lambda_{M-1, M-1} = \lambda_{M, M}$ . Если эта гипотеза принимается, то проверяется гипотеза о равенстве дисперсий трех последних собственных чисел. Если принимается решение о том, что дисперсии трех последних собственных чисел равны между собой, проверяется гипотеза о равенстве дисперсий четырех последних собственных чисел. Указанная процедура повторяется до тех пор, пока приведенные тесты позволяют принять решение о том, что дисперсии  $i$  последних собственных чисел равны между собой, а дисперсии  $i + 1$  последних не равны. При этом принимается решение о том, что имеется  $M - i$  больших собственных чисел.

В соответствии с критерием Хартли при условии равенства объемов групп  $k$  гипотезу о равенстве или однородности дисперсий  $\sigma_M^2 = \sigma_{M-1}^2 = \dots = \sigma_i^2 = \sigma^2$  можно проверить с помощью распределения [9]

$$d\hat{F}_{\max}(\vec{\mathbf{v}}) = \frac{\sigma_{\max}^2(\vec{\mathbf{v}})}{\sigma_{\min}^2(\vec{\mathbf{v}})}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\max}^2$  – наибольшая дисперсия;

$\sigma_{\min}^2$  – наименьшая дисперсия.

Параметрами распределения служит число групп  $k$  и число степеней свободы каждой групповой дисперсии  $\nu = n - 1$ . Если  $\hat{F}_{\max}$  при заданной статистической надежности превосходит табличные значения, то гипотеза о равенстве или однородности дисперсий отклоняется и принимается альтернативная гипотеза  $\sigma_i^2 \neq \sigma^2$  для определенного значения  $k$ .

## АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ РАНГА КОВАРИАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Исследуемый алгоритм оценивания ранга случайного процесса должен быть работоспособен в условиях параметрической априорной неопределенности статических характеристик обрабатываемых векторов

$$\vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{s}}_{\Sigma} + \vec{\mathbf{w}}, \quad (6)$$

где  $\vec{s}_\Sigma$  – суммарный сигнал составляющих «звездного фона» и целей,  $\vec{s}_\Sigma = \sum_{i=1}^L \vec{s}_i$ ;

$\vec{w}$  – сигнал помехового фона.

Здесь

$$M[\vec{s}_\Sigma] = \vec{0}, \mathbf{K}_{s\Sigma} = M[\vec{s}_\Sigma \vec{s}_\Sigma^T], \mathbf{K}_v = M[\vec{v}_i \vec{v}_i^T].$$

Требуется по  $\hat{\mathbf{K}}_v$  оценить значение величины ранга  $\mathbf{K}_{s\Sigma}$  или, что тоже, оценить значение величины  $L$ .

Для определения ранга необходимо сформулировать и решить задачу многоальтернативного обнаружения – последовательно (или параллельно) осуществить проверку  $L+1$  гипотез, которые имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} H_0 : & \vec{v} = \vec{w} \\ H_1 : & \vec{v} = \vec{w} + \vec{s}_{1t} \\ H_2 : & \vec{v} = \vec{w} + \vec{s}_{1t} + \vec{s}_{2t} \\ & \dots \dots \dots \dots \dots \\ H_{L+1} : & \vec{v} = \vec{w} + \sum_{i=1}^L \vec{s}_{it}. \end{aligned} \tag{7}$$

Проверка гипотез (7) эквивалентна следующей проверке:

$$\begin{aligned} H_0 : & \hat{\mathbf{K}}_v = \hat{\mathbf{D}} \\ H_1 : & \hat{\mathbf{K}}_v = \hat{\mathbf{D}} + \hat{\mathbf{K}}_{s1} \\ H_2 : & \hat{\mathbf{K}}_v = \hat{\mathbf{D}} + \hat{\mathbf{K}}_{s1} + \hat{\mathbf{K}}_{s2} \\ & \dots \dots \dots \dots \dots \\ H_{L+1} : & \hat{\mathbf{K}}_v = \hat{\mathbf{D}} + \sum_{i=1}^L \hat{\mathbf{K}}_{si}, \end{aligned} \tag{8}$$

где  $\hat{\mathbf{K}}_{si}$  – ковариационная матрица сигнала составляющей «звездного фона» и целей;

$\hat{\mathbf{D}}$  – диагональная матрица ранга  $L+1$ .

Плотность распределения вероятностей ковариационной матрицы  $\hat{\mathbf{K}}_v$  определяется выражением, описывающим плотность распределения вероятности Уишарта  $p(\hat{\mathbf{K}}_v)$

$$p(\hat{\mathbf{K}}_v) = \frac{\left[ |\hat{\mathbf{K}}_v|^{p-L} \exp\{-\text{tr}[\mathbf{K}_v^{-1} \hat{\mathbf{K}}_v]\} \right]}{\pi^{2 \frac{1}{2}L(L-1)} \Gamma(p) \dots \Gamma(p-L+1) |\mathbf{K}_v|^p}, \tag{9}$$

где  $||$  – значение определителя матрицы;

$\Gamma(p)$  – неполные Гамма-функции степени  $p$ .

Используя подход по оптимизации обработки сигналов объектов, предложенный в работе [10], совместную плотность распределения вероятности  $p(\hat{\Phi}, \hat{\Lambda})$  собственных чисел  $\hat{\Lambda}$  и собственных векторов  $\hat{\Phi}$  выборочной матрицы  $\hat{\mathbf{K}}_v$  можно описать выражением

$$p(\hat{\Phi}, \hat{\Lambda}) = \frac{c_1 |\hat{\Lambda}|^{p-L} \exp\{-\text{tr}[\mathbf{K}_v^{-1} \hat{\Phi} \hat{\Lambda} \hat{\Phi}^T]\}}{\pi^{2 \frac{1}{2}L(L-1)} \Gamma(p) \dots \Gamma(p-L+1) |\hat{\Lambda}|^p} 2^L \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{k=i+1}^L (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{kk})^2, \tag{10}$$

где  $c_1$  – нормирующая постоянная.

Проинтегрировав (10) по элементам  $\hat{u}_{ii}, \forall i, l \in [1, L]$  матрицы  $\hat{\Phi}$ , получим:

$$p(\hat{\Lambda}) = c_2 \frac{2^L \pi^{\frac{1}{2}L} |\hat{\Lambda}|^{p-\frac{3L}{2}} y(\hat{\Lambda}) \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{k=i+1}^L (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{kk})^2}{\Gamma(p) \dots \Gamma(p-L+1) |\Lambda|^p}, \quad (11)$$

где  $c_2$  – коэффициент нормировки  $p(\hat{\Lambda})$ ;

$y(\hat{\Lambda})$  – функция от  $\hat{\Lambda}$ .

Для проверки гипотез о ранге в соответствии с (7) и (8) необходимо сформировать  $L-1$  отношения правдоподобия и сравнить их с соответствующим порогом и между собой, а затем выбрать наибольшее. Особенностью данной процедуры является то, что плотности распределения вероятностей по каждой из гипотез будут отличаться числом  $l = \overline{1, L}$ , и, как следствие, числом собственных чисел  $\hat{\lambda}_{ii}$  и  $\lambda_{ii}$ , степенями определителей  $p - (3l/2)$ , а также функциями  $y_l(\hat{\Lambda})$ . Кроме того, в случае истинности гипотезы  $H_0$ , когда совместная плотность распределения вероятностей элементов  $\hat{\mathbf{K}}_v$  определяется выражением  $p(0, \sigma_w^2)$ , плотность распределения вероятности  $p(\hat{\Lambda})$  будет существенно отличаться от (11). В этом легко убедиться, если заменить определитель в знаменателе (11) на величину  $(\sigma_w^2)^{pL}$ , а вместо матрицы  $\mathbf{K}_v^{-1}$  использовать матрицу  $\mathbf{I} \sigma_w^{-2}$ . В результате, получим выражение для условной плотности распределения вероятности

$$p(\hat{\Lambda} | H_0) = \frac{c_3 |\hat{\Lambda}|^{p-L} \exp\{-\text{tr}[\sigma_w^{-2} \hat{\Lambda}]\}}{\pi^{\frac{1}{2}L(L-1)} \Gamma(p) \dots \Gamma(p-L+1) (\sigma_w^2)^{pL}} 2^L \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{k=i+1}^L (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{kk})^2. \quad (12)$$

Формула (12) является обобщением результата, полученного в [11] для вещественных выборок случайного процесса  $\hat{v}$ .

Тогда для получения значения нормирующей константы  $c_3$  вычислим интеграл

$$2^L c_3 \int_0^{\lambda_{11}} \dots \int_0^{\lambda_{LL}} |\hat{\Lambda}|^{p-L} \exp\{-\text{tr}[\sigma_w^{-2} \hat{\Lambda}]\} \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{k=i+1}^L (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{kk})^2 d\hat{\lambda}_{11} \dots d\hat{\lambda}_{LL} = \pi^{\frac{1}{2}L(L-1)} \Gamma(p) \dots \Gamma(p-L+1) (\sigma_w^2)^{pL}. \quad (13)$$

Интеграл (13) целесообразно вычислять с помощью итерационной процедуры. Можно, однако, применить и другой вариант вычисления, если в (13) сделать замену переменных вида  $\sigma_w^{-2} \hat{\lambda}_{ii} = r_{ii}$ . В результате получается многочлен, состоящий из неполных Гамма-функций  $\Gamma(a, z) = \int_z^\infty r^{a-1} e^{-r} dr$  максимальной степени  $a = p + L - 2$ , который обозначим  $p_\Gamma(p + L - 2, z)$ .

Тогда окончательный вариант выражения (12), с учетом (13) и введенных обозначений, можно записать следующим образом:

$$p(\hat{\Lambda} | H_0) = \frac{|\hat{\Lambda}|^{p-L} \exp\{-\text{tr}[\sigma_w^{-2} \hat{\Lambda}]\}}{p_\Gamma(p + L - 2, z)} \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{k=i+1}^L (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{kk})^2. \quad (14)$$

Для проверки гипотезы  $H_l$  независимо от применяемого критерия качества необходимо сформировать отношение правдоподобия, вычислить его логарифм или достаточную статистику и сравнить ее с соответствующим порогом. Как было показано в [10], выбранный критерий качества влияет только на величину порога. Тогда вид обработки будет определяться отношением правдоподобия, которое в случае проверки гипотезы  $H_{l+2}$  против альтернативы  $H_{l+1}$  имеет вид

$$LR = \frac{p(\hat{\Lambda} | H_{l+2})}{p(\hat{\Lambda} | H_{l+1})} = \frac{|\hat{\Lambda}|^{p-\frac{3(l+2)}{2}} y_{l+2}(\hat{\Lambda}) \prod_{i=1}^{l-1} \prod_{k=i+1}^{l+2} (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{kk})^2 c_{2,l+2} 2\pi^{\frac{1}{2}}}{|\hat{\Lambda}|^{p-\frac{3(l+1)}{2}} y_{l+1}(\hat{\Lambda}) \prod_{i=1}^l \prod_{k=i+1}^{l+1} (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{kk})^2 c_{2,l+1} \lambda_{l+2,l+2}^p} =$$

$$= \frac{\hat{\lambda}_{l+2,l+2}^{p-\frac{3(l+2)}{2}} y_{l+2}(\hat{\Lambda})}{|\hat{\Lambda}|_{l+1}^{\frac{3}{2}} y_{l+1}(\hat{\Lambda})} \prod_{i=1}^{l+1} (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{l+2,l+2})^2 \frac{c_{2,l+2} 2\pi^{\frac{1}{2}}}{c_{2,l+1} \lambda_{l+2,l+2}^p} \stackrel{\geq}{<} \gamma_{l+1},$$

где  $\gamma_{l+1}$  – соответствующий порог,  $l+1 \in [0, L-1]$ .

Представим  $y_{l+1}(\hat{\Lambda})$  и  $y_{l+2}(\hat{\Lambda})$  как функции вида:

$$y_{l+2}(\hat{\Lambda}) = \prod_{i=1}^{l+2} \prod_{q=1}^{l+2} \chi_{qi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-f_{qi}}^{f_{qi}} \exp\left\{-\frac{|\hat{v}_{qi0}|^2}{2}\right\} d\hat{v}_{qi0},$$

$$y_{l+1}(\hat{\Lambda}) = \prod_{i=1}^{l+1} \prod_{q=1}^{l+1} \chi_{qi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-f_{qi}}^{f_{qi}} \exp\left\{-\frac{|\hat{v}_{qi0}|^2}{2}\right\} d\hat{v}_{qi0},$$

где  $f_{qi} = 2^{\frac{1}{2}} \hat{\lambda}^{\frac{1}{2}} \sum_{r=1}^q k^{qr}$ , а  $\chi_{iq} = \sum_{r=1}^l \frac{d\hat{v}_{ir}}{d\hat{v}_{iq}}$ .

Тогда

$$\frac{y_{l+2}(\hat{\Lambda})}{y_{l+1}(\hat{\Lambda})} = \prod_{i=1}^{l+1} \chi_{l+2,i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-f_{l+2,i}}^{f_{l+2,i}} \exp\left\{-\frac{|\hat{v}_{l+2,i}|^2}{2}\right\} d\hat{v}_{l+2,i} \prod_{q=1}^{l+2} \chi_{q,l+2} \int_{-f_{q,l+2}}^{f_{q,l+2}} \exp\left\{-\frac{|\hat{v}_{q,l+2}|^2}{2}\right\} d\hat{v}_{q,l+2}. \quad (17)$$

Поскольку слагаемое  $\frac{c_{2,l+1} \lambda_{l+2,l+2}^p}{2\pi^{\frac{1}{2}} c_{2,l+2}}$  в левой части неравенства (15) не зависит от входной ре-

ализации, его можно перенести в порог. В итоге, с учетом (16) и (17), можно записать (15) в виде:

$$LR = \frac{p(\hat{\Lambda} | H_{l+2})}{p(\hat{\Lambda} | H_{l+1})} = \frac{\lambda_{l+2,l+2}^{p-\frac{3(l+2)}{2}}}{|\hat{\Lambda}|_{l+1}^{\frac{3}{2}}} \prod_{i=1}^{l+1} (\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{l+2,l+2})^2 \prod_{i=1}^{l+1} \chi_{l+2,i} \prod_{q=1}^{l+2} \chi_{q,l+2} \times$$

$$\times \int_{-f_{l+2,i}}^{f_{l+2,i}} \exp\left\{-\frac{|\hat{v}_{l+2,i}|^2}{2}\right\} d\hat{v}_{l+2,i} \int_{-f_{q,l+2}}^{f_{q,l+2}} \exp\left\{-\frac{|\hat{v}_{q,l+2}|^2}{2}\right\} d\hat{v}_{q,l+2} \stackrel{\geq}{<} \gamma_{l+1} \frac{c_{2,l+1} \lambda_{l+2,l+2}^p}{2\pi^{\frac{1}{2}} c_{2,l+2}}. \quad (18)$$

Прологарифмировав (18), получим следующую процедуру принятия решения:

$$\begin{aligned} \ln(LR) = & \left( p - \frac{3(l+2)}{2} \right) \ln \hat{\lambda}_{l+2,l+2} + 2 \sum_{i=1}^{l+1} \ln(\hat{\lambda}_{ii} - \hat{\lambda}_{l+2,l+2}) - \frac{3}{2} \sum_{i=1}^{l+1} \ln \hat{\lambda}_{ii} + \sum_{i=1}^{l+1} \ln \chi_{l+2,i} \times \\ & \times \sum_{q=1}^{l+2} \ln \chi_{q,l+2} + \ln \left[ \int_{-f_{l+2,i}}^{f_{l+2,i}} \exp \left\{ -\frac{|\hat{v}_{l+2,i}|^2}{2} \right\} d\hat{v}_{l+2,i} \right] + \ln \left[ \int_{-f_{q,l+2}}^{f_{q,l+2}} \exp \left\{ -\frac{|\hat{v}_{q,l+2}|^2}{2} \right\} d\hat{v}_{q,l+2} \right] \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} \\ & \geq \ln \gamma_{l+1} + \ln c_{2,l+1} - \ln c_{2,l+2} + p \ln \lambda_{l+2,l+2} - \ln \pi. \end{aligned} \quad (19)$$

При использовании (18) в случае непревышения порога принимается решение об истинности гипотезы  $H_{l+1}$ . Если порог превышен, то истинной может быть любая из гипотез  $H_{l+2}, \dots, H_L$ . Поэтому необходимо продолжить проверку гипотез для  $l+2, l+3, \dots$  до тех пор, пока порог не будет превышен.

Таким образом, алгоритм оценивания ранга сводится к проверке гипотез, осуществляемой последовательно, начиная с  $l=1$ , путем вычисления выражений (18) или (19), сравнения их с соответствующими порогами и между собой с последующим выбором наибольшего. Номер наибольшего из полученных результатов принимается за оценку величины ранга сигнального случайного процесса. Какой из двух вариантов процедуры проверки гипотез (18) или (19) воспользоваться зависит от простоты аппаратной реализации.

Совместное применение разложения Карунена – Лозва и метода главных компонент позволяет сократить избыточность представления данных изображения в  $m$  раз, которую можно оценить по формуле

$$m = \frac{\tau}{l},$$

где  $\tau$  – размерность ковариационной матрицы,  $\tau = PN \times PN$ ;

$l$  – размерность вектора главных компонент,  $l \times 1$ .

Использование в адаптивных алгоритмах обнаружения целей [1] оценки вектора главных компонент вместо оценки ковариационной матрицы изображения позволит существенно снизить нагрузку на спецвычислитель ОЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что для сокращения избыточности представления данных изображений при гауссовской статистике наблюдаемых сигналов целесообразно использовать методы факторного анализа, одним из которых является метод главных компонент. В ходе работы рассмотрена возможность совместного решения задач сокращения избыточности представления данных и оценивания ранга ковариационной матрицы изображения.

Применение полученного математического аппарата позволит реализовывать сложные адаптивные алгоритмы обнаружения техногенных космических объектов, описанные в исследовании [1] и алгоритмов обнаружения целей с поиском центра тяжести изображения цели по трем координатам, так называемым барицентрическим координатам, описанным в работе [5].

### Список используемых источников

1. *Поляков В.В., Дашкин Э.Р.* Алгоритм обнаружения сигналов техногенного космического объекта по последовательности кадров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения: научно-техн. журн. – 2013. – Вып. 2, № 5. – С. 112–122.
2. *Жуков А.О., Логунов С.В.* Способ определения конструктивных особенностей космических объектов по спектральным характеристикам // Нелинейный мир. – М.: Радиотехника, 2013. – № 8, Т. 11. – С. 554–558.
3. *Поляков В.В., Дашкин Э.Р.* Комплексная математическая модель обрабатываемых сигналов техногенных космических объектов в матричном фотоприемнике оптико-электронной системы // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения: научно-техн. журн. – 2017. – Вып. 4. – С. 111–119.
4. *Шаталов А.А., Поляков В.В.* Апостериорная плотность распределения вероятностей оценок барицентрических координат телевизионных изображений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – Т. 4, № 6. – С. 93–102.
5. *Оппенгейм Э.* Применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1980. – 552 с.
6. *Фаддеев Д.К., Фадеева Д.К.* Вычислительные методы линейной алгебры. – М.-Л.: Физматгиз, 1963. – 658 с.
7. *Шаталов А.А., Ястребков А.Б.* Эвристические алгоритмы разрешения-обнаружения случайных сигналов в шумах // Радиотехника и радиоэлектроника, 1991. – Т. 36, № 2. – С. 419–422.
8. *Закс Л.* Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
9. *Рао С.Р.* Линейные статистические методы и их применения. – М.: Наука, 1968. – 548 с.
10. *Шаталов А.А.* Многомерные адаптивные спецпроцессоры для обработки сигналов по методу главных компонент // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 44–49.

А.Н. Ефременко,  
*кандидат техн. наук;*  
И.Д. Канарский,  
*кандидат географических наук;*  
О.А. Королёва

## МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, БЛАГОПРИЯТНЫХ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

Рассматривается подход к диагностике условий возникновения опасных природных процессов (явлений) (ОППЯ) с использованием возможностей методов нечеткой логики (например, метод Шортлифа – Бьюкенена).

Предлагается методика реализации этого подхода и результаты ее экспериментальной проверки применительно к анализу сейсмотектонических процессов.

Подобный подход позволяет оперативно диагностировать стадию развития конкретного ОППЯ и может быть использован в практике геофизического (гидрологического) обеспечения различных отраслей экономики.

Ключевые слова: опасные природные процессы и явления (ОППЯ), степени их опасности, комплекс геофизических (гидрометеорологических) показателей условий развития ОППЯ, идентифицируемые гипотезы об опасности текущей стадии развития ОППЯ, выявление (идентификация) районов с опасной стадией развития ОППЯ, сейсмотектоническая деформация, сейсмоактивные и сейсмоспокойные районы.

Практика гидрометеорологического и геофизического обеспечения различных отраслей экономики показывает, что весьма актуальной и крайне сложной остается проблема контроля и учета крупномасштабных опасных природных процессов и явлений (ОППЯ), таких как землетрясения, склоновые процессы, наводнения, волны цунами, засухи, ионосферно-магнитосферные возмущения и др.

Актуальность проблемы ОППЯ обусловлена постоянным ростом их количества, повышением интенсивности связанных с ними разрушительных явлений и, соответственно, усилением влияния на технологическую инфраструктуру и хозяйственно-промышленную деятельность РФ.

Сложность проблемы связана с многофакторностью этих ОППЯ, отсутствием устоявшейся их теоретической базы, надежных методов прогнозирования, взаимозависимостью процессов, а главное с неточной и, часто нерепрезентативной, «зашумленной» исходной геофизической информацией. Все это выливается в большую степень неопределенности ее анализа и диагноза при решении задач по диагностике и учету степени опасности развивающихся ОППЯ в процессе геофизического (гидрометеорологического) обеспечения различных отраслей экономики РФ.

В этих условиях представляется целесообразным воспользоваться возможностями решения подобных задач на основе правил нечеткой логики, многофакторной логики, подхода Байеса, Шортлифа – Бьюкенена или других подобных схем. Они позволяют, в результате специальной обработки исходной геофизической информации в виде значений различных показателей, экспертных оценок и имеющихся свидетельств, выбрать правильный результат диагностики (решение) или, как минимум, не допустить принятия явно ошибочного результата диагностики (решения).

Применительно к задаче по диагностике условий возникновения ОППЯ логично использовать метод Шортлифа – Бьюкенена (теория фактора уверенности) [1, 2], обладающий следующими преимуществами:

– возможность использовать всю доступную информацию о данном ОППЯ: фундаментальные и теоретические знания, фактическую, прогностическую и архивную информацию;

- возможность использовать имеющиеся единичные экспериментальные данные и экспертные оценки специалистов, при отсутствии достаточного статистического ряда результатов наблюдений (что требуется, например, в схеме Байеса);
- отсутствует необходимость анализа взаимосвязей с различными частями исходных данных;
- используются простые механизмы вычислительного процесса;
- имеется возможность изменения алгоритма решений на любом этапе применения метода;
- отсутствует необходимость строить заранее структурированное дерево решений;
- имеется возможность автоматизации процесса диагностики степени опасности ОППЯ, и, как следствие, разработки автоматизированной экспертной системы анализа каждого такого процесса и явления в отдельности.

Смысл метода Шортлифа – Бьюкенена заключается в замене понятия  $P(H_j/X)$  – условная вероятность гипотезы  $H_j$  при свидетельстве  $X$  на понятия:

$D[H_j/X]$  – мера доверия к гипотезе  $H_j$  при свидетельстве  $X$  со значениями в интервале  $[0, 1]$ ;

$HD[H_j/X]$  – мера недоверия к этой же гипотезе  $H_j$  при свидетельстве  $X$ , значения тоже в интервале  $[0, 1]$ , как и значения самой вероятности;

$K[H_j/X]$  – коэффициент уверенности в гипотезе  $H_j$ , со значениями, соответственно, в интервале  $[-1, 1]$ .

Меры доверия ( $D$ ,  $HD$ ,  $K$ ) рассчитываются по следующим соотношениям [2]:

$$D[H_j/X] = \begin{cases} \frac{P(H_j/X) - P(H_j)}{1 - P(H_j)}, & \text{при } P(H_j/X) > P(H_j) \\ 0, & \text{при } P(H_j/X) \leq P(H_j) \end{cases}; \quad (1)$$

$$HD[H_j/X] = \begin{cases} \frac{P(H_j) - P(H_j/X)}{P(H_j)}, & \text{при } P(H_j/X) < P(H_j) \\ 0, & \text{при } P(H_j/X) \geq P(H_j) \end{cases}; \quad (2)$$

$$K[H_j/X] = D[H_j/X] - HD[H_j/X]. \quad (3)$$

где  $P(H_j)$  – априорная вероятность гипотезы  $H_j$ , значение которой чаще принимается за 0,5;

$P(H_j/X)$  – условная вероятность гипотезы  $H_j$ , при свидетельстве (комплексе свидетельств)  $X(x_i)$ .  $P(H_j/X)$  задается экспертами для каждого свидетельства  $x_i$  из  $i = 1 \div n$  и каждой гипотезы  $H_j$  из  $j = 1 \div K$ .

После перевода экспертных значений  $P(H_j/X)$  в соответствующие меры доверия по соотношениям (1)–(3), производится их комплексирование по всем  $x_i$  в рамках каждой гипотезы  $H_j$  с использованием следующих отношений:

$$\begin{aligned} D[H_j/x_{1,2}] &= D[H_j/x_1] + D[H_j/x_2] \cdot (1 - D[H_j/x_1]), \\ HD[H_j/x_{1,2}] &= HD[H_j/x_1] + HD[H_j/x_2] \cdot (1 - D[H_j/x_1]), \\ K[H_j/x_{1,2}] &= D[H_j/x_{1,2}] - HD[H_j/x_{1,2}], \\ D[H_j/x_{1,2,3}] &= D[H_j/x_{1,2}] + D[H_j/x_3] \cdot (1 - D[H_j/x_{1,2}]), \\ HD[H_j/x_{1,2,3}] &= HD[H_j/x_{1,2}] + HD[H_j/x_3] \cdot (1 - D[H_j/x_{1,2}]), \\ K[H_j/x_{1,2,3}] &= D[H_j/x_{1,2,3}] - HD[H_j/x_{1,2,3}] \text{ и т.д.} \end{aligned} \quad (4)$$

В результате, для каждой гипотезы  $H_j$  ( $j = 1 \div K$ ), рассчитываются меры доверия по всему комплексу  $X(x_i)$

$$D[H_j/X]; HD[H_j/X]; K[H_j/X].$$

Из всех гипотез, как наиболее достоверная, выбирается та, где выполняется условие

$$\begin{aligned} D[H_j/X] &= \max D[H_j/X]; \\ K[H_j/X] &= \max K[H_j/X], \end{aligned} \quad (5)$$

что, собственно, и является решением задачи по выбору «правильного» ответа, при идентификации суждения (факта), отраженного в гипотезе  $H_j$ .

Подобный подход к диагностике опасности возникновения ОППЯ может быть использован, например, в сейсмологии, где проблема прогноза землетрясений считается некоторыми исследователями [3] практически неразрешимой. Именно поэтому теоретические и экспериментальные исследования в этой области уже с середины прошлого века были направлены, у нас в стране и за рубежом, не столько на поиск методов прогнозирования землетрясений (определение места, времени и силы), сколько на разработку методов выявления (идентификации) сейсмоопасных районов, где относительно сильные землетрясения (с магнитудой  $M \geq 4$ ) могут произойти в ближайшем будущем.

С 1972 г. основным методом распознавания районов возможных землетрясений считался так называемый метод *EPA (Earthquake-Prone Areas recognition)* [4]. Метод предусматривал идентификацию возможных районов коровых землетрясений (глубина гипоцентров в интервале 0–70 км) на базе векторного представления объектов распознавания в пространстве геолого-геофизических и геоморфологических параметров, априорно определяющих высокую сейсмичность.

В работах российских исследователей [5, 6] идентификация областей подготовки сильных землетрясений осуществляется уже на основе слежения за вариациями сейсмичности по данным о месте, времени и силе землетрясений.

В 90-х годах прошлого столетия основной упор в прогнозе землетрясений стал делаться на поиск, в основном, косвенных геофизических предвестников как следствий сейсмотектонических процессов (СТП) и на статистический анализ закономерностей этих процессов [7].

В дальнейшем предпринимались попытки в методах выявления сейсмоопасных районов брать за основу процесс слежения за развитием сейсмотектонических явлений, где в качестве объектов распознавания использовались характеристики так называемой сейсмотектонической деформации (СТД). По мнению многих исследователей, СТД в среднем, лучше всего отражает смысл и особенности развития СТП [7–10].

Несмотря на довольно значительные усилия, предпринимаемые исследователями, надежных методов распознавания сейсмоопасных районов на данный момент так и не появилось.

Между тем, актуальность данной проблемы современной геофизики, одной из самых сложных и до конца не решенных, неуклонно растет, что обусловлено стремительным ростом урбанизированных территорий. В связи с этим, представляется целесообразным на данном этапе решать ее путем автоматизации процесса идентификации сейсмоопасных районов с использованием различных схем нечеткой логики применительно к анализу объектов распознавания в виде различных показателей процессов сейсмотектонической деформации.

Преимущества использования схемы Шортлифа – Бьюкенена для достижения данной цели указаны выше. В качестве примера рассмотрим метод оперативной диагностики сейсмоопасных районов, в котором сейсмическая обстановка оценивается в трех градациях:

«опасная» – гипотеза  $H_1$ , содержащая утверждение, что в данной точке (данном районе) состояние и развитие сейсмических процессов с вероятностью  $P > 0,75$  свидетельствует о зреющем здесь крупном сейсмическом явлении (землетрясении с магнитудой  $M \geq 4$ );

«допустимая» – гипотеза  $H_2$ , утверждающая то же самое, но уже с вероятностью  $0,75 \geq P \geq 0,25$ ;

«безопасная» – гипотеза  $H_3$ , утверждающая то же самое, но с вероятностью  $P < 0,25$ , т.е. с вероятностью  $> 0,75$  идентифицируется отсутствие в обозримое время достаточно сильных сейсмических явлений (с  $M \geq 4$ ).

Для диагностики сейсмической обстановки формируется специализированный комплекс показателей  $X(x_i, i = 1 \div n)$  следующих типов:

– уровень сеймотектонической деформации (СТД)

$$x_{1,2,3} = \varepsilon_{1,2,3}, [\varepsilon \cdot 10^{-8}],$$

где  $\varepsilon_1$  – за предыдущую 5-летку;

$\varepsilon_2$  – за последнюю 5-летку;

$\varepsilon_3$  – за последнее полугодие;

– средняя скорость СТД за соответствующие промежутки времени

$$x_{4,5,6} = \bar{V}_{1,2,3}, [\varepsilon \cdot 10^{-8}];$$

– логарифм отношения скоростей СТД за выбранные промежутки времени (1, 2, 3)

$$\left. \begin{aligned} x_7 - C_1 &= \lg \frac{\bar{V}_2}{V_1}, \\ x_8 - C_2 &= \lg \frac{\bar{V}_3}{V_2}, \end{aligned} \right\};$$

– сейсмическая активность – количество сейсмических явлений класса  $K=10$  (магнитуда  $M \approx 3,3$ ) на площади в  $1000 \text{ км}^2$  за 1 год

$$x_{9,10} = A_{1,2}^{10}, [N_{1,2}^{10} / 10^3 \text{ км}^2 \cdot \text{год}];$$

– отношение сейсмических активностей в смежных пятилетках (1, 2)

$$x_{11} - a = \frac{A_2^{10}}{A_1^{10}}$$

и др.

В качестве исходной информации для расчета значений этих показателей используются сведения из глобальных, национальных, региональных каталогов сейсмических явлений глубиной в десятки календарных лет с привлечением оперативной информации о них. Последнее позволяет диагностировать сейсмическую обстановку практически в реальном масштабе времени.

В основу расчетов значений показателей положены соотношения (6), (7) [8, 11], позволяющие оценить значения сеймотектонической деформации (СТД)  $\varepsilon_t$  за период времени  $t = \Delta t$  в данном районе [8]

$$\varepsilon_t = \frac{1}{2\mu v} \cdot \sum_{i=1}^m M_{oi}, [-], \quad (6)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига горных пород;

$M_{oi}$  – скалярный сейсмический момент  $i$ -го землетрясения, [Н·м];

$v$  – объем деформированной области за счет землетрясений в данном районе за период времени  $t = \Delta t$ , [ $\text{м}^3$ ];

и соответствующей сейсмической активности  $A^{10}$  [11]

$$A^{10} = \frac{(1 - 10^{-\gamma})}{10^{-\gamma \cdot (K_{\min} - K_0)}} \cdot \frac{1000 \cdot N \geq 2}{\Delta S \cdot T}, [N^{10} / 1000 \text{ км}^2 \cdot \text{год}], \quad (7)$$

где  $A^{10}$  – сейсмическая активность в количестве сейсмических явлений класса  $K = 10$  в районе площадью  $1000 \text{ км}^2$  за 1 год;  
 $N \geq 2$  – число землетрясений с магнитудой  $M \geq 2$  ( $K = 7,6$ ) за время  $t = \Delta t$  на площади  $\Delta S$ ;  
 $K_{\min}$  – минимальный класс представительного ряда сейсмических явлений в выборке, здесь  $K_{\min} = 7,6$  ( $M \geq 2$ );  
 $K_0$  – класс сейсмических явлений, к которому приводится их выборка. Чаще всего  $K_0$  принимается равным 10.

Здесь

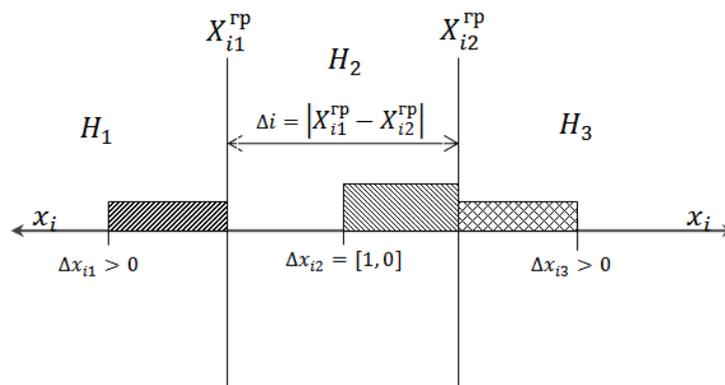
$$\gamma = \frac{\Delta \lg N}{(K_{\min} - K_0)} = \operatorname{tg} a,$$

где  $a$  – угол наклона прямой зависимости значений логарифма количества сейсмических явлений от их класса  $K$ .

Амплитуды значений всех показателей  $x_i$  разбиваются граничными значениями  $x_{i1}^{sp}$  и  $x_{i2}^{sp}$  на три части в соответствии с идентифицируемыми тремя гипотезами  $H_j$ , ( $j = 1 \div 3$ ). Сами граничные значения определяются экспертным путем.

Рассчитанные значения показателей группируются по соответствующим градациям оценок сейсмической опасности («опасно» –  $H_1$ , «допустимо» –  $H_2$ , «безопасно» –  $H_3$ ). Каждая градация, таким образом, представляется:

- $n_{ij}$  – количество попавших в градацию значений показателей ( $i$  – номер показателя,  $j$  – номер градации);
- $\Delta x_{ij}$  – величина отклонений значений  $x_{ij}$  от граничных значений (рис. 1).



$$\Delta x_{i3} = |x_{i3} - X_{i3}^{sp}| > 0 \text{ – для градации «безопасно»};$$

$$\Delta x_{i1} = |x_{i1} - X_{i1}^{sp}| > 0 \text{ – для градации «опасно»};$$

$$\Delta x_{i2} = |x_{i2} - X_{i2}^{sp}|, [\Delta i, 0] \text{ – для градации «допустимо»}$$

Рис. 1. К расчету величины отклонений значений показателя  $x_{ij}$  от их граничных значений  $X_{i1,2}^{sp}$

Значения отклонений приводятся путем нормирования к безразмерному виду  $x_{ij}^*$  (в долях амплитуды или в долях разницы граничных значений).

Осреднив безразмерные значения показателей каждой градации  $j(\bar{x}_j^*)$  и нормировав их по единице, получаем некоторую оценку «условной вероятности» данной градации по данной величине отклонений значений показателей от их граничных значений

$$P(H_j / X)_\Delta = \frac{1}{\sum_{j=1}^3 \bar{x}_j^*} \cdot \bar{x}_j^*, \text{ где } \bar{x}_j^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}^*. \quad (8)$$

Еще одна оценка условной вероятности той же градации  $j$  может быть получена с учетом количества значений показателей, попавших в нее

$$P(H_j / X)_n = \frac{n_j}{n},$$

где  $n_j$  – число значений показателей в градации  $j$ ;

$n$  – общее число показателей, одинаковое для всех градаций.

Далее, эти оценки условной вероятности  $P(H_j / X)$  переводятся в меры доверия (1)–(3), комплексировуются (4), и в итоге получают оценки мер доверия для всех трех экспертируемых гипотез:

$$\begin{aligned} D[H_1 / X]; HD[H_1 / X]; K[H_1 / X] & \text{ – «опасно»;} \\ D[H_2 / X]; HD[H_2 / X]; K[H_2 / X] & \text{ – «допустимо»;} \\ D[H_3 / X]; HD[H_3 / X]; K[H_3 / X] & \text{ – «безопасно»}. \end{aligned}$$

При выполнении условия (5)  $D[H_j / X] = \max D[H_{1+3} / X]$ , и  $K[H_j / X] = \max K[H_{1+3} / X]$ , и гипотеза  $H_j$  принимается как достоверная оценка степени сейсмической опасности в данной точке (ограниченном районе).

Выполнение условия  $H_{1+3}$ , например для гипотезы  $H_1$  означает, что район данной точки является сейсмически активным (СА) и, с вероятностью  $P > 0,75$ , сейсмические процессы здесь развиваются в сторону разрядки упругих напряжений земной коры в виде достаточно крупного сейсмического события (землетрясения с магнитудой  $M \geq 4$ ) в ближайшее время. Этот смысл гипотез  $H_j$  закладывался экспертами при формировании комплекса показателей  $X(x_i)$  и определении их граничных значений  $X_{i1}^{sp}$  и  $X_{i2}^{sp}$ .

Соответственно, выполнение этого же условия, но для гипотезы  $H_3$ , означает, что данная точка (район) является сейсмически спокойной и с вероятностью  $P \geq 0,75$  землетрясений с магнитудой  $M \geq 4$  в обозримом будущем здесь не ожидается.

Для оценки пространственного распределения сейсмической активности территория исследуемого района разбивается на ячейки площадью  $S \approx 1000 \text{ км}^2$  (характерный размер проявленной сеймотектонической деформации) и в каждой из них по рассмотренной методике диагностируется степень сейсмической опасности. В результате получаем довольно детальную картину сейсмической активности в данном районе (регионе) на текущий момент времени.

Пример подобной картины представлен на рис. 2, где отражен результат диагностики сейсмической обстановки в сейсмогенерирующем районе полуострова Камчатка на 01.01.2013 г. (по данным о землетрясениях за период с 2003 по 2013 гг.). Результаты диагностики сейсми-

ческой обстановки показывают, что здесь все основные сейсмоактивные зоны (ячейки) располагаются в районе западного склона Курило-Камчатского желоба (восточное побережье Камчатки), что соответствует данным, приводимым в других источниках.

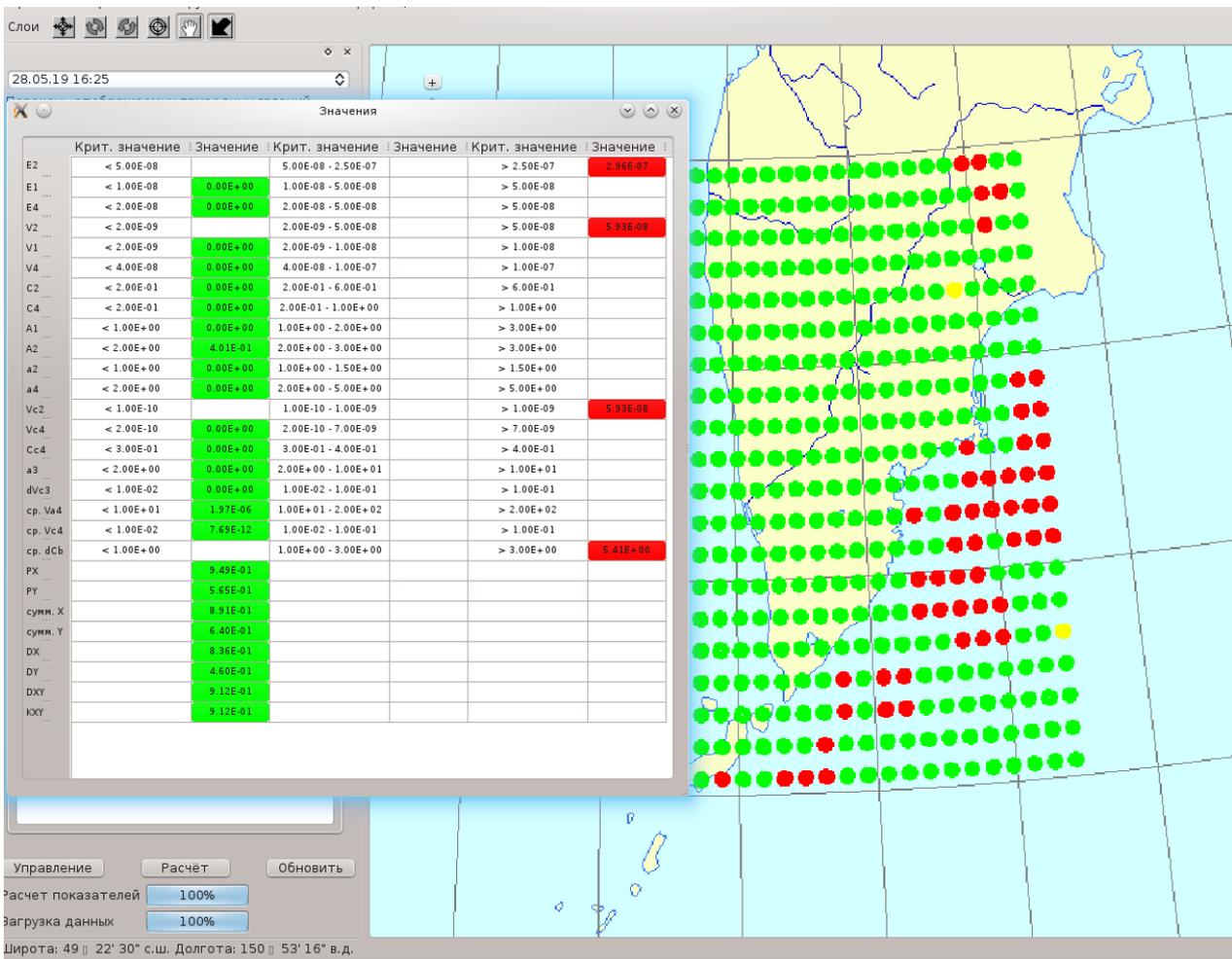


Рис. 2. Сейсмическая обстановка в районе полуострова Камчатка на 01.01.2013 г.

В частности, на рис. 3 приведена карта сейсмической активности ( $A^{10}$ ) [11] того же района, построенная по данным детальных наблюдений за землетрясениями с магнитудами  $M \geq 3$  за период с 1964 по 1973 гг. (свыше 600 тыс. таких землетрясений). Оцифровка изолиний дана в числах землетрясений класса  $K = 10$  ( $M \approx 3,3$ ) на площади  $1000 \text{ км}^2$  за год.

Данные оперативного контроля сейсмической обстановки (рис. 2) указывают на удовлетворительную идентификацию сейсмоопасных зон, где с вероятностью  $P \geq 0,75$  сейсмодетонические процессы развиваются в сторону возможного в обозримом будущем, относительно сильного землетрясения с магнитудой  $M \geq 4$ . Причем, хорошо видно, что общие локализации сейсмоактивных зон (в океане, у восточного побережья Камчатки) и асейсмичных зон (Западная Камчатка) на обеих картах (рис. 2 и рис. 3) практически совпадают, а на карте оперативного контроля (рис. 2) диагностированы сейсмоопасные и сейсмостойкие ячейки района (с разрешением порядка 30 км) на 01.01.2013 г. и на обозримое будущее.

По сути, подобный подход к отслеживанию тенденций в формировании и развитии опасных сейсмических явлений, при его автоматизации (получение из различных источников, обработка большого объема разнообразной геофизической информации и реализация не-

сложных, но в большом объеме и часто повторяющихся вычислений) позволит специалистам осуществить решение следующих основных задач:

– оперативный и постоянный контроль за сейсмической обстановкой в любом районе земного шара;

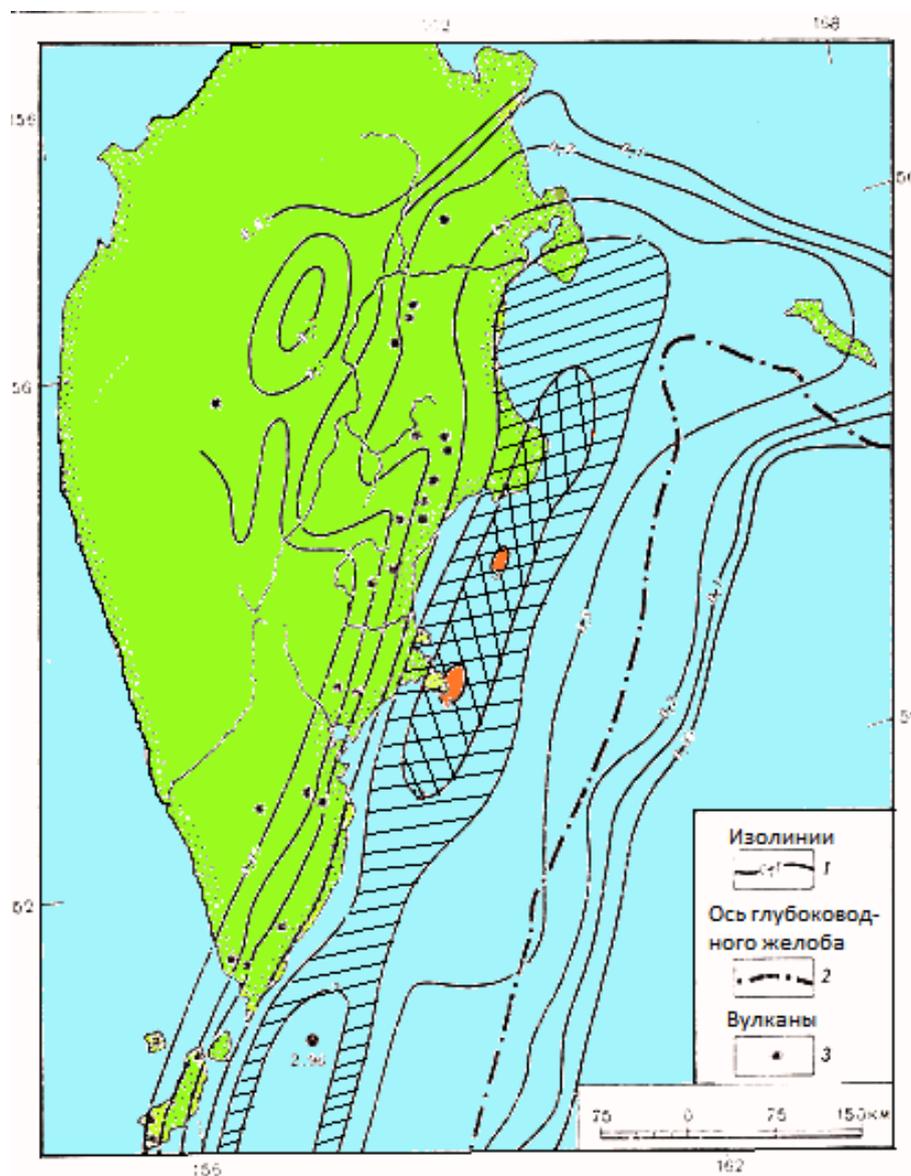


Рис. 3. Карта сейсмической активности ( $A^{10}$ ) в районе полуострова Камчатка на 1973 г.

– исследование сейсмических процессов и накопление статистического материала по результатам численных экспериментов в целях развития физико-статистических методов прогноза землетрясений;

– совершенствование методов учета сейсмической обстановки при геофизическом обеспечении различных отраслей экономики РФ;

– отлаживание системы централизованного сбора, обработки и архивации сейсмической информации глобального, регионального и локального масштабов от различных национальных и зарубежных источников.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная методика оперативной диагностики геофизических условий применима к слежению за формированием и развитием любых других ОППЯ, особенно тех, для которых практически отсутствуют надежные методы прогноза, не до конца ясны физические основы (на уровне функциональных или физико-статистических зависимостей), а возможные последствия имеют глобальный и катастрофический характер (типа океанических, морских землетрясений, волн цунами, наводнений, засух, резких и частых смен погодных условий, массовых пожаров, крупномасштабных ионосферных возмущений и т.п.).

Естественно, реализация данной методики по диагностике опасности и стадии развития других ОППЯ потребует разработки новых формулировок идентифицируемых гипотез  $H_j$ , своих соответствующих показателей  $X(x_i)$  и их граничных значений  $X_{i1}^{sp}$  и  $X_{i2}^{sp}$

При этом возможно, и даже целесообразно, не только совершенствование схемы применения метода Шортлифа – Бьюкенена, но и применение других подобных схем, более подходящих для идентификации гипотез об особенностях развития того или иного ОППЯ.

В итоге, по существу, речь может идти о разработке серии автоматизированных экспертных систем, представляющих из себя программные комплексы, каждый из которых (или несколько) предназначен для идентификации стадии развития конкретного ОППЯ или их отдельных сторон.

Преимуществом предлагаемого способа по диагностике условий развития ОППЯ является возможность, используя в полном объеме любую имеющуюся информацию о таком процессе (явлении) (фундаментальные знания, физико-статистические зависимости, фактическую, прогностическую, архивную ГФИ, экспериментальные данные, знания и опыт экспертов), обойтись без анализа сложных взаимосвязей с различными частями исходной ГФИ и, таким образом, использовать простые механизмы вычислительного процесса.

В свою очередь, использование подобного способа оперативной диагностики ОППЯ в практике геофизического и гидрометеорологического обеспечения экономики РФ позволит держать под постоянным контролем процессы их формирования и развития на территории РФ.

### Список используемых источников

1. Экспертные системы. Принципы работы и примеры / под. ред. Р. Форсайта. – М.: Радио и связь, 1987. – С.224.
2. Поддержка принятия решений эргатическим элементом в условиях неопределенности методом Шортлифа – Бьюкенена // Вестник ТГУ. – 2013. – Т.18, вып. 4. – С. 1435–1439.
3. Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я. Флуктуации геофизических полей и прогноз землетрясений // Физика Земли. – М.: Изв. АН СССР. – 2003. – № 4. – С. 3–20.
4. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений / И.М. Гельфанд, Ш.А. Губерман, М.П. Жидков и др. / под. ред. В.И. Кейлис-Борока // Вычислительная сейсмология. Машинный анализ цифровых сейсмических данных. – 1974. – Вып. 7. – С. 41–64.
5. Завьялов А.Д. Параметр концентрации сейсмогенных разрывов как предвестник сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 1986. – № 3. – С. 58–76.
6. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильным землетрясением // Вулканология и сейсмология. – 1996. – № 4. – С. 44–55.
7. Карты ожидаемых землетрясений, основанные на комплексе сейсмологических признаков / Г.А. Соболев, Т.Л. Челидзе, А.Д. Завьялов и др. // Физика Земли. – 1990. – № 11. – С. 45–56.

8. *Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – С.176.
9. *Ребецкий Ю.Л.* Методы реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Доклады РАН, – 1999. – Т.365, № 3. – С. 392–395.
10. *Гвишиани А.Д., Дзэбоев Б.А., Атаян С.М.* О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. – 2013. – № 6. – С. 3–19.
11. Сейсмическое районирование территорий СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г.: методические указания / отв. ред.: В.И. Бунэ, Г.П. Горшков, А.Д. Гвишиани, И.М. Гельфанд и др. – М.: Наука, 1980. – С.307.

А.Н. Шульгин,  
кандидат техн. наук;  
А.О. Шушаков,  
кандидат техн. наук

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ МОБИЛЬНЫХ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ИХ АВТОНОМНОСТЬ**

Рассмотрены методы управления вычислительной нагрузкой как основной инструментацией снижения энергоемкости мобильных вычислительных комплексов и их влияние на время автономной работы комплексов. Представлены результаты сравнительного анализа энергоэффективности многопроцессорных систем при различных методах управления вычислительной нагрузкой. Предложен подход к оцениванию автономности мобильных вычислительных комплексов через относительные показатели экономии энергоресурса автономного источника питания при различных многопроцессорных конфигурациях. На основе анализа результатов исследований сделан вывод о возможности повышения автономности мобильных вычислительных систем на основе метода интеллектуального управления вычислительной нагрузкой.

Ключевые слова: мобильный вычислительный комплекс, автономность, вычислительная нагрузка, энергоемкость, многопроцессорный.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Обеспечение высокой автономности функционирования многопроцессорных мобильных вычислительных комплексов (МВК) различного назначения на сегодняшний день остается одной из приоритетных задач развития средств вычислительной техники [1, 2]. Известно, что автономность характеризуется суммарным интервалом времени, в течение которого МВК в состоянии выполнять вычислительные задачи, используя ресурсы своего автономного источника питания (АИП). Очевидно, что время автономной работы напрямую зависит от энергопотребления наиболее энергоемкой аппаратной составляющей вычислительной системы (например, процессоров), что с точки зрения общего баланса характеристик применительно к МВК является определяющим [3, 4].

Одним из путей решения задачи снижения энергоемкости мобильных многопроцессорных систем является управление вычислительной нагрузкой каждого процессора. Суть такого подхода сводится к снижению функциональной активности процессоров МВК, вплоть до полного их отключения, на время отсутствия вычислительных задач и связанных с этим вынужденных простоев. В данной работе рассматриваются результаты исследований с применением двух методов управления вычислительной нагрузкой: дискретного управления, подробно описанного в [5, 6] и интеллектуально управления [7, 8].

### **АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ МВК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ УПРАВЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ**

При сравнительной оценке энергоэффективности многопроцессорных МВК различной конфигурации важным является оценка ее функционирования за определенный период времени  $\Delta T$ . В качестве такой оценки может выступать количество рабочих циклов  $L$  вычислений за период  $\Delta T$ , которое находится из соотношения:

$$L = \frac{\Delta T}{T_{\text{алг}}} \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – период времени функционирования МВК;  
 $T_{\text{алг}}$  – время выполнения алгоритма МВК.

Тогда с учетом выражения (1) вычислительная энергоемкость  $E_{\text{выч}}$  многопроцессорного МВК за период  $\Delta T$  может быть найдена из выражения:

$$E_{\text{выч}} = (T_{\Sigma\text{п}} \cdot P_{\text{PP}} + T_{\Sigma\text{пр}} \cdot P_{\text{C}}) L, \quad (2)$$

где  $L$  – количество рабочих циклов за  $\Delta T$ ;  
 $T_{\Sigma\text{п}}$  – суммарное время работы всех процессоров;  
 $T_{\Sigma\text{пр}}$  – суммарное время простоев всех процессоров;  
 $P_{\text{PP}}$  – мощность, потребляемая процессором в рабочем режиме;  
 $P_{\text{C}}$  – мощность, потребляемая процессорами в энергосберегающих режимах.

Результаты расчетов энергоемкости вычислительной нагрузки многопроцессорного МВК для конфигураций из различного количества процессоров и способов управления их энергопотреблением за период функционирования в течение 1 часа (3600 сек), представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчетов параметров работы МВК с различным числом процессоров и способов управления вычислительной нагрузкой (ВН)**

Кол-во процессоров	$T_{\text{алг}}, \text{с}$	$T_{\Sigma\text{п}}, \text{с}$	$T_{\Sigma\text{пр}}, \text{с}$	$L$	$E_{\text{выч}}, \text{Вт}\cdot\text{ч}$		
					Без управления ВН	С дискретным управлением ВН	С интеллект. управлением ВН
$m=1$	240,29	240,29	0,0	14,8	5,83	–	–
$m=2$	177,20	240,29	106,90	20,3	11,72	8,13	7,81
$m=3$	164,70	240,29	253,81	22,1	17,63	9,52	8,53
$m=4$	159,54	240,29	397,87	23,1	23,41	10,23	8,81

Для качественной оценки зависимостей энергоемкости и производительности МВК от количества процессоров в каждой конфигурации за период  $\Delta T$ , введем показатели относительной энергоемкости  $\theta_E$  и относительной производительности  $\theta_T$  многопроцессорного МВК, которые можно вычислить в соответствии с выражениями:

$$\theta_E(m) = \frac{E_{\text{ВК}_m} - E_{\text{ВК}_1}}{E_{\text{ВК}_1}} \quad \text{и} \quad \theta_T(m) = \frac{L_m - L_1}{L_1}, \quad (3)$$

где  $L_1$  – количество рабочих циклов за  $\Delta T$  при однопроцессорной конфигурации МВК;  
 $L_m$  – количество рабочих циклов за  $\Delta T$  для  $m$ -процессорной конфигурации;  
 $E_{\text{ВК}_m}$  – энергоемкость МВК при  $m$ -процессорной конфигурации;  
 $E_{\text{ВК}_1}$  – энергоемкость МВК при однопроцессорной конфигурации.

На основе вышеизложенного для сравнительной оценки изменения энергоемкости МВК при изменении его производительности можно использовать соответствующий показатель  $\varphi_m$ , определяемый следующим соотношением:

$$\varphi_m = \frac{\Delta\theta_T}{\Delta\theta_E} = \frac{\theta_T(m) - \theta_T(m-1)}{\theta_E(m) - \theta_E(m-1)}. \quad (4)$$

Оценки сравнительных показателей  $\theta_E$ ,  $\theta_T$  и  $\varphi_m$  вычислительной энергоемкости МВК для различного количества процессоров (по отношению к одномодульной архитектуре) за 1 час (3600 с) функционирования МВК представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения показателей  $\theta_E$  и  $\theta_T$  для МВК с различным количеством процессоров

Показатели	Количество процессоров в МВК			
	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
$E_{\text{выч}}, \text{Вт}\cdot\text{ч}$	5,83	7,82	8,53	8,81
$L$	14,82	20,34	22,12	23,13
$\theta_E, \%$	00,00	34,04	45,13	50,12
$\theta_T, \%$	00,00	37,14	51,23	60,22
$\varphi_m, \%$	00,00	1,13	1,32	2,04

Из табл. 2 видно, что с увеличением количества процессоров прирост производительности МВК опережает рост энергоемкости всего вычислительного процесса.

## ОЦЕНИВАНИЕ АВТОНОМНОСТИ МВК ЧЕРЕЗ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМИИ РЕСУРСА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Количественно оценить расходование ресурса (емкости) [9] автономного источника питания в ходе выполнения высокопроизводительных вычислений МВК различной конфигурации за период времени  $\Delta T$  можно через показатели  $Q_{\text{БУ}}$  (для функционирования МВК без управления вычислительной нагрузкой процессоров),  $Q_{\text{ДУ}}$  (с дискретным управлением вычислительной нагрузкой процессоров) и  $Q_{\text{ИУ}}$  (с интеллектуальным управлением вычислительной нагрузкой процессоров) в соответствии с формулами:

$$Q_{\text{БУ}} = T_{\Sigma\text{п}} \cdot I_{\text{АР}} \cdot m \cdot L, \quad (5)$$

где  $L$  – количество циклов выполнения алгоритма за период функционирования МВК;  
 $m$  – количество процессоров;  
 $I_{\text{АР}}$  – ток, потребляемый процессорами в активном режиме;

$$Q_{\text{ДУ}} = \left( (T_{\Sigma\text{п}} + \Delta T_{\text{перев}}) \cdot I_{\text{АР}} + T_{\Sigma\text{пр}} \cdot I_{\text{С}} \right) L, \quad (6)$$

где  $\Delta T_{\text{перев}}$  – временные параметры переходов между состояниями процессоров;  
 $I_{\text{С}}$  – среднее значение тока, потребляемого процессорами в энергосберегающих состояниях;

$$Q_{\text{ИУ}} = \left( T_{\Sigma\text{п}} \cdot I_{\text{АР}} + T_{\Sigma\text{пр}} \cdot I_{\text{С}} \right) L, \quad (7)$$

где  $I_{\text{С}}$  – ток, потребляемый каждым процессором в энергосберегающем состоянии.

Тогда оценить энергоэффективность применяемых методов управления вычислительной нагрузкой можно через показатели экономии энергоресурса аккумуляторной батареи  $\Delta Q_1$  (при функционировании МВК с интеллектуальным управлением вычислительной нагрузкой по отношению к функционированию без управления вычислительной нагрузкой) и  $\Delta Q_2$  (с дискретным управлением вычислительной нагрузкой), которые можно определить следующим образом:

$$\Delta Q_1 = \frac{Q_{\text{БУ}} - Q_{\text{ИУ}}}{Q} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где  $Q$  – электроемкость аккумуляторной батареи;

$$\Delta Q_2 = \frac{Q_{\text{ДУ}} - Q_{\text{ИУ}}}{Q} \cdot 100\%. \quad (9)$$

В качестве АИП рассматривается никель-металлгидридная аккумуляторная батарея НМГ-20 [10]. Основные характеристики данного АИП представлены в табл. 3.

Таблица 3

### Основные характеристики НМГ-20

Номинальная электрическая емкость, А·ч	Ток разряда, А	Допустимая глубина разряда, %	Масса, кг	Ресурс лет/циклов	Рабочая температура
20	до 10	100	0,54	5/2000	-30...+40

Если принять во внимание тот факт, что при максимальной вычислительной нагрузке общее энергопотребление мультипроцессорного МВК составляет порядка 100 Вт, то очевидно, что АИП (НМГ-20) емкостью 20 А·ч в данном случае в состоянии обеспечить функционирование вычислительного комплекса в течение  $\Delta T_{\text{БП}} = 160$  минут [11]. При этом, используя значения, представленные в табл. 1, можно рассчитать экономию энергоресурса АИП, а также оценить, насколько отличается время автономного функционирования МВК с различным количеством процессоров (от двух до четырех) по отношению к методам управления их вычислительной нагрузкой (с безусловным управлением и интеллектуальным управлением) для значений потребляемого тока в активном режиме  $I_{\text{AP}} = 1,62$  А и среднего значения тока в энергосберегающих состояниях  $I_{\text{С*}} = 0,12$  А.

На основании положений, изложенных выше, были проведены расчеты показателей (5) – (9), значения которых представлены в табл. 4.

Таблица 4

### Оценки показателей экономии энергоресурса АИП для МВК с различным количеством процессоров

Показатели	Количество процессоров МВК		
	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
$Q_{\text{БУ}}, \text{А}\cdot\text{ч}$	8,62	12,91	17,24
$Q_{\text{ДУ}}, \text{А}\cdot\text{ч}$	6,23	7,82	8,41
$Q_{\text{ИУ}}, \text{А}\cdot\text{ч}$	5,41	6,14	6,53
$\Delta Q_1, \%$	16,04	34,03	53,51
$\Delta Q_2, \%$	4,02	8,51	9,53

По графикам на рис. 1 и 2 можно проследить динамику изменения значений показателей  $Q$  и  $\Delta Q$  в зависимости от количества процессоров ( $m$ ) в МВК.

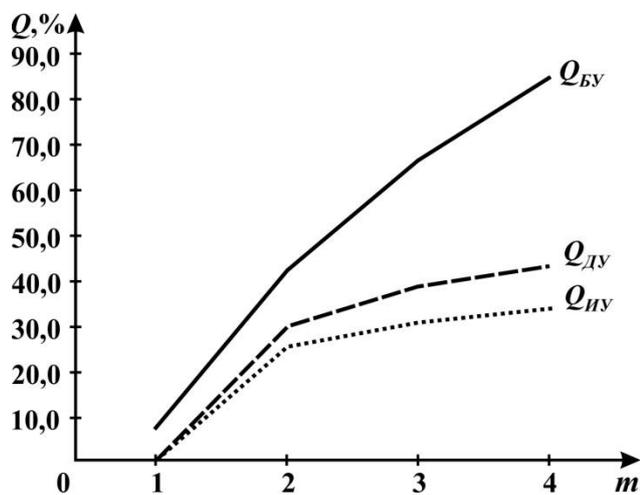


Рис. 1. Зависимости показателей  $Q_{\text{БУ}}, Q_{\text{ДУ}}$  и  $Q_{\text{ИУ}}$  от количества процессоров

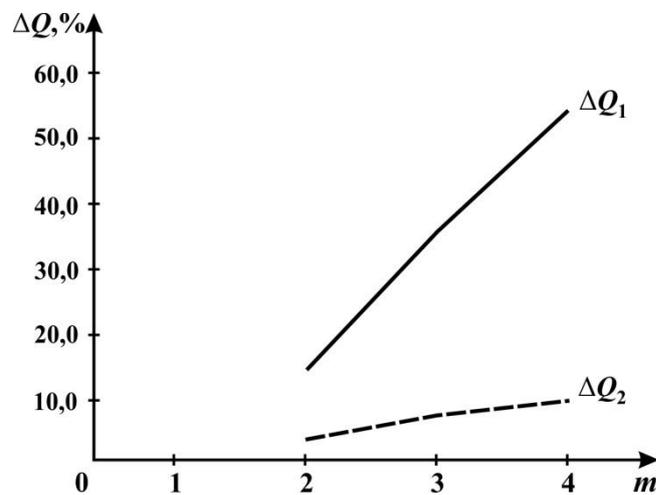


Рис. 2. Зависимости показателей  $\Delta Q_1$  и  $\Delta Q_2$  от количества процессоров

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- методы управления вычислительной нагрузкой процессоров являются достаточно эффективным инструментом повышения энергоэффективности функционирования мобильных вычислительных систем;
- управление вычислительной нагрузкой позволяет снизить рост энергоемкости вычислений при увеличении производительности МВК и наращивании мультипроцессорной конфигурации;
- использование метода интеллектуального управления вычислительной нагрузкой в мультипроцессорных мобильных вычислительных системах позволяет повысить автономность их функционирования от АИП до 14% по сравнению с другими подходами.

### Список используемых источников

1. Корнеев В.А. Будущее высокопроизводительных вычислительных систем // Открытые системы. СУБД. – 2003. – № 05. – С. 6–10.
2. Кремез Г.В., Перминов М.В. Состав и перспективы развития бортовых вычислительных комплексов малогабаритных КА // Малые космические аппараты. Принцип построения орбитальных систем и бортовых комплексов управления. – СПб.: МО РФ, 2001. – С. 72–75.
3. Головкин Б.А. Вычислительные системы с большим количеством процессоров. – М.: Радио и связь, 1995. – 320 с.
4. Шульгин А.Н., Басыров А.Г., Дудкин А.С. Перспективы развития бортовых вычислительных систем: деп. рукопись. – М.: ЦВНИИ МО РФ, 2011. – Инв. № А30914.
5. Басыров А.Г., Данеев А.В., Маслин А.Б. Диспетчер энергосберегающего параллельного вычислительного процесса // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 3 (27). – С. 157–162.
6. Басыров А.Г. Методика организации энергосберегающего функционирования бортовой вычислительной системы космического аппарата // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – Вып. 627. – С. 243–252.
7. Басыров А.Г., Шульгин А.Н., Малинка А.В. Методика энергосбережения в мобильных параллельных вычислительных системах // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация "ВНИИЭМ"», 2012. – Т. 126, № 1. – С. 43–46.
8. Шульгин А.Н. Моделирование обработки информации при диспетчировании энергосберегающих вычислительных процессов в параллельных вычислительных комплексах военного назначения // Высш. школа. – Уфа: Инфинити, 2016. – № 15. – С. 74–78.
9. Кашкаров А.П. Аккумуляторы: справочное пособие. – М.: ИП РадиоСофт, 2014. – 192 с.
10. Никель-металлгидридные аккумуляторы // НИАИ «Источник». – URL: [www.niai-istochnik.ru/catalog6e03.html?id=13](http://www.niai-istochnik.ru/catalog6e03.html?id=13) (дата обращения: 14.05.2019).
11. Выбор и эксплуатация аккумуляторов и автономное бесперебойное резервное электропитание // МАП «Энергия». – URL: <http://www.invertor.ru/akb.htm> (дата обращения: 18.05.2019).

А.Ф. Домбровский

## **ПОДХОД К ВОССТАНОВЛЕНИЮ НЕИЗВЕСТНЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ ПРОТОКОЛОВ ПО СЕТЕВОМУ ТРАФИКУ**

В статье рассматривается подход к восстановлению протоколов передачи данных. В основу положены автоматизированные формальные методы моделирования программ на основе теории взаимодействующих последовательных процессов Ч. Хоара (CSP – Communicating Sequential Processes). В нотации CSP разработаны модели типовых компонентов протоколов и модели программ обработки потоков данных протокола. Решение задачи восстановления протокола сводится к пошаговому уточнению реализации программы обработки потоков данных неизвестного протокола.

Ключевые слова: обратный инжиниринг, коммуникационные протоколы, взаимодействующие последовательные процессы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Восстановление неизвестного протокола – это построение его описания по анализу наблюдений за обменом сообщениями. По сути, необходимо провести обратное проектирование протокола, наблюдая за поведением реализующих протокол объектов сети. Применение обратного проектирования протоколов используется в следующих случаях:

- при выявлении особенностей реализации протокола в конкретной телекоммуникационной системе;
- при контроле правильности протокола;
- при исследовании реализаций протоколов на соответствие их стандартам;
- при выявлении возможностей, не предусмотренных стандартами;
- при анализе защищенности сетей;
- при исследовании несанкционированной сетевой активности.

Обычно восстановлением занимаются специалисты, которые ставят целью построение формальной модели протокола при помощи различных методов анализа его внешних признаков и синтеза его структуры. При этом результатом будет спецификация, полученная из комбинаций кода, доступной документацией, личного опыта, знания задачи и области ее применения [5]. Восстановление протокола должно предоставлять специалисту полную информацию для понимания того, что это за протокол, что этот протокол делает, почему он это делает и т. д. Воссоздание протокола требует гораздо больше информации, нежели обычные инженерные описания программ или код. Таким образом, восстановление протокола требует высокой квалификации занятого решением этой задачи специалиста. Тратится существенное количество его рабочего времени, при том, что зачастую эта задача не может быть решена в приемлемое время, либо не может быть решена вообще ввиду недостаточности исходных данных.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОТОКОЛОВ**

Критерием восстановления протокола будем считать получение доступа к информации, передаваемой с его использованием. Такой информацией является либо прикладные данные, либо последовательности протокольных блоков данных смежного верхнего уровня. Исходя из этого, сформулируем задачу восстановления протоколов следующим образом.

Существует неизвестный протокол  $P_n$  уровня  $n$ , в котором реализована некоторая функциональность по передаче последовательностей блоков данных протоколов уровня  $n+1$

$$P_n = \{U_{P_n}, S_{P_n}, \Phi_{P_n}\},$$

где  $U_{P_n}$  – множество структурных элементов, определенных в  $P_n$ ;

$S_{P_n}$  – множество порядков следования структурных элементов в протокольном блоке данных, определенных в  $P_n$ ;

$\Phi_{P_n}$  – множество функций, определенных в  $P_n$ .

Пусть принята  $V_n$ -последовательность протокольных блоков данных, передаваемых между протокольными объектами, реализующими протокол  $P_n$ . Данная последовательность была сформирована при предоставлении сервиса протокольному уровню  $n+1$ , в том числе для передачи  $V_{n+1}$ -последовательности протокольных блоков данных верхнего уровня.

Необходимо сформировать программу обработки потоков данных неизвестного протокола  $P_n$ , входными данными которой будет  $V_n$ , а выходными данными  $V_{n+1}$

$$P_n(V_n) = V_{n+1}.$$

При этом корректность полученной последовательности протокольных блоков данных верхнего уровня будет являться критерием того, что восстановление произведено правильно.

## ПОДХОД К ВОССТАНОВЛЕНИЮ НЕИЗВЕСТНЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ ПРОТОКОЛОВ

Исследования принципов протокольного взаимодействия в сетях передачи данных позволили сделать выводы, что в качестве основы протоколов используется ряд типовых базовых процедур, т.е. используется конечное число схем реализации протокольных функций и структурные элементы одинакового назначения [1, 2]. Соответственно, для построения программы обработки возможно использование типовых компонентов обработки. Таким образом, при разработке программ обработки потоков данных протокола целесообразно использовать композиционный подход к проектированию программных средств – параметризации ранее созданных (унаследованных) программных компонентов, реализующих типовые процедуры обработки, и их агрегировании в программу, соответствующую восстанавливаемому протоколу. В множестве типовых компонентов обработки потоков данных протоколов должны быть представлены: типовые структурные элементы и форматы протокольных блоков данных (ПБД), типовые процедуры обработки потоков декодированных ПБД, типовые схемы реализации программы обработки потоков данных протоколов (ПОПД), унифицированный интерфейс межуровневого взаимодействия.

Общая схема композиционного метода проектирования, основанного на работе [4], состоит в следующем (рис. 1).

На первом этапе осуществляется первичное проектирование. Описание программного средства и описания различных существующих компонентов, полученные на данном этапе, должны быть представлены спецификациями на некотором специализированном языке.

Следующим этапом композиционного проектирования является поиск релевантных компонентов, т.е. таких, из которых требуемая программа могла бы быть построена. Релевантные компоненты соединяются в композицию.

Завершающим этапом композиционного проектирования является формальное доказательство корректности построения композиции. Условием корректности является уточнение спецификации требуемой программы спецификацией композиции компонентов. Неформально понятие уточнения (refinement) можно пояснить следующим образом – система В уточняет систему А, если разработчик может использовать систему В вместо системы А, не замечая разницы.

При реализации композиционного подхода применительно к задаче восстановления неизвестного протокола на первом этапе необходимо провести следующие исследования:

- определить множество компонентов протокольной обработки;
- выбрать средства их формального моделирования.

Для моделирования компонентов протокольной обработки необходим аппарат формального описания, отвечающий следующим требованиям:

- высокие выразительные возможности в области моделирования распределенных алгоритмов с синхронизацией посредством обмена сообщениями;
- возможность достижения требуемой абстракции моделирования;
- наличие механизмов доказательства свойств корректности специфицируемых взаимодействий.

В качестве аппарата формального описания компонентов протокольной обработки предложено использовать теорию взаимодействующих последовательных процессов (англ. Communicating Sequential Process (CSP)) Ч. Хоара [3], которая обладает вышеперечисленным арсеналом.



Рис. 1. Общая схема композиционного метода проектирования

Программная система в CSP состоит из  $n > 1$  процессов, которые существуют независимо, но взаимодействуют посредством обмена сообщениями через именованные сущности, называемые каналами. CSP, с одной стороны, позволяет описывать только «наблюдаемое поведение» объектов без определения их внутренней структуры, что дает возможность добиться максимально возможной общности описаний и специфицировать внешние требования к программе, не детализируя каким образом они должны быть выполнены. С другой – описать его внутреннюю структуру как композицию процессов, взаимодействующих друг с другом. Формализация процессов протокольной обработки с использованием CSP позволяет задать спецификацию требований и конструкцию реализации программы обработки с доказательством соответствия проекта и воплощения.

Предлагаемый метод восстановления протоколов представляет собой совокупность следующих процедур (рис. 2):

- моделирование компонентов программ обработки потоков данных протокола;
- формирование спецификации требований к программе обработки потоков данных протокола;
- пошаговое уточнение реализации ПОПД неизвестного протокола.

Раскроем этапы метода.

На этапе моделирования компонентов программ обработки потоков данных протокола производится разработка спецификаций программ обработки, разработка программных компонентов и описание программных компонентов на языке спецификации.

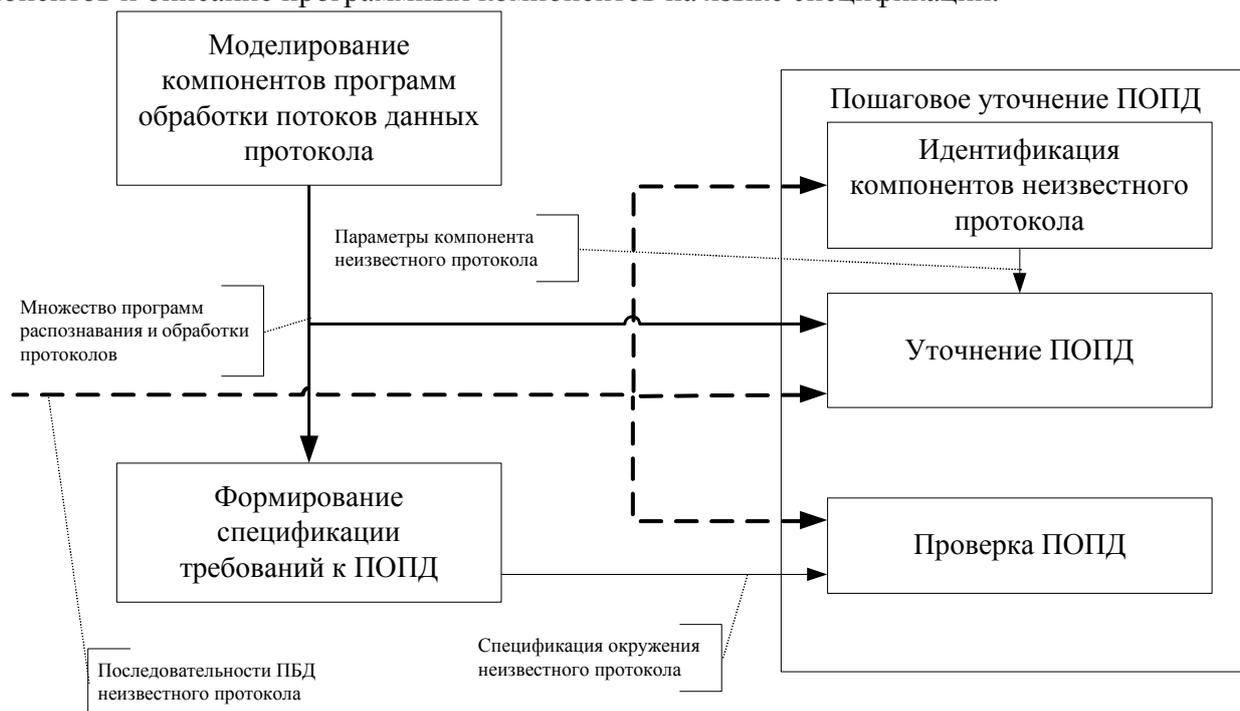


Рис. 2. Схема этапов процесса восстановления протокола

Программа обработки потоков данных протокола представляет собой следующую систему процессов (рис. 3):

$$P = \langle D, O, K \rangle,$$

где  $D$  – процесс декодирования протокольных блоков данных.

$O$  – процесс обработки декодированных протокольных блоков данных.

$K$  – множество каналов,  $K = \{in, out, dec\}$  ( $in$  – канал взаимодействия с нижним уровнем,  $out$  – канал взаимодействия с верхним уровнем,  $dec$  – канал передачи декодированными сообщениями).

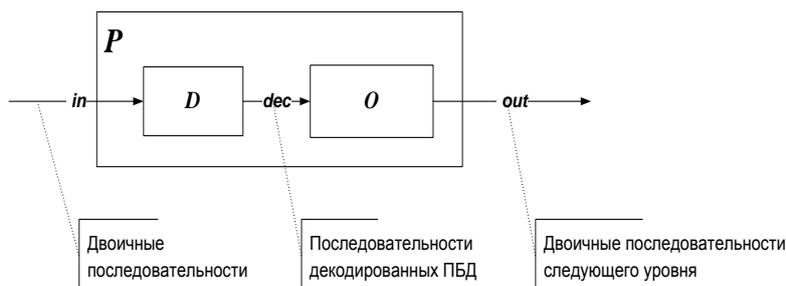


Рис. 3. Программа обработки потоков данных протокола

Процесс декодирования протокольных блоков данных задается как последовательный процесс его побитового декодирования (выделения из двоичной последовательности значений элементарных структурных элементов):

$$D = \langle A, D', R \rangle,$$

где  $A$  – алфавит процесса;

$D'$  – начальное процессное выражение,  $D' \in R$ ;

$R$  – множество процессных выражений вида:

$P = a \rightarrow Q$  – префикс процесса (процесс выполняет действие  $a$ , далее ведет себя как  $Q$ );

$P = x : B \rightarrow Q(x)$  – префикс процесса с выбором (процесс выполняет действие  $x$  из множества  $B$ , далее ведет себя как  $Q(x)$ );

$P = Q;T$  – последовательная композиция процессов (выполняется процесс  $Q$ , затем  $T$ );

$P = a \rightarrow SCIP$  – завершение процесса (процесс выполняет действие  $a$ , далее завершается).

Здесь  $P, Q, T \in R$  – процессные выражения;  $a \in A$  – действие (символ алфавита);  $B \subseteq A$  – множество действий (подмножество алфавита).

Моделирование процесса обработки декодированных протокольных блоков данных происходит на двух уровнях:

– уровень реализации процесса (моделируются типовые варианты внутренней реализации);

– уровень спецификации внешних требований к процессу (моделируются его внешнее поведение).

Реализация процесса обработки декодированных протокольных блоков данных задается как параллельная композиция процессов, каждый из которых реализует один из компонентов неизвестного протокола:

$$O = C_1 // C_2 // C_3 // \dots,$$

где  $C_i$  – компонент протокола,  $C_i \in C = \{C_1, C_2, \dots, C_Z\}$  – множество типовых компонентов;

$C_z$  – множество способов реализации компонента  $z$ ,  $C_z = \{C_{z,1}, C_{z,2}, \dots, C_{z,w}\}$ .

Реализация компонента протокола  $C_n$  задается как процессное выражение, ставящее в соответствие входному сообщению дальнейшее поведение процесса:

$$C = in ? x : \Sigma_{in}^{\tau \perp} \rightarrow F(x),$$

где  $\Sigma_{in}^{\tau \perp}$  – алфавит процесса, включающий допустимые протоколом сообщения,  $\Sigma_{in}^{\tau \perp} = \{M_1, \dots, M_K\}$ .

На основе типовых реализаций производится построение частично упорядоченного множества моделей реализации протокола

$$\Omega = \{P_n^1, P_n^2, \dots, P_n^K\}.$$

Отношение частичного порядка **уточнение** между двумя моделями устанавливается с помощью средства проверки моделей FDR

$$P_n^1 \subseteq P_n^2 \subseteq \dots \subseteq P_n^K.$$

Спецификация процесса обработки декодированных протокольных блоков данных задается как параллельная композиция:

$$S = P_{n-1} // P_n // P_{n+1},$$

где  $P_n$  – спецификация процесса неизвестного протокола,

$P_{n+1}$  и  $P_{n-1}$  – спецификации процессов известных протоколов смежных верхнего и нижнего уровней, взаимодействующих между собой, как показано на рис. 4.

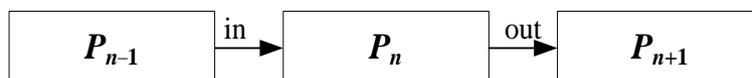


Рис. 4. Окружение неизвестного протокола

Физический смысл такой спецификации – система должна работать корректно (без тупиков и расхождений), что будет возможно только при такой реализации  $P_n$ , когда при корректных входных последовательностях  $P_n$  на его выходе будут корректные последовательности сообщений протокола  $P_{n+1}$ .

На этапе пошагового уточнения реализации ПОПД неизвестного протокола осуществляется поиск в  $\Omega = \{P_n^1, P_n^2 \dots P_n^K\}$  такой ПОПД, которая соответствует неизвестному протоколу и позволяет получать на выходе потоки данных протоколов смежного верхнего уровня, то есть выбор такой реализации, которая соответствует спецификации требований:

$$P_n^k \subseteq S_n.$$

Ввиду сложности протоколов выявить сразу все его компоненты не представляется возможным, поэтому восстановление производится итеративно, по одному компоненту. На каждой итерации производятся:

1. Идентификация компонента протокола. Под идентификацией компонента протокола понимается выявление факта наличия в протоколе этого компонента и способа его реализации. Идентификация производится на основе частных методов анализа последовательностей протокольных блоков данных [6].

2. Уточнение ПОПД. Для этого производится выбор из множества программ такой, которая соответствует выявленному на данном шаге набору компонентов.

3. Проверка полученной ПОПД неизвестного протокола на соответствие требованиям.

При проверке полученной ПОПД неизвестного протокола на соответствие требованиям проводится ее тестирование, то есть обработка входных последовательностей протокольных блоков данных. В случае, если получаемые выходные последовательности блоков данных протокола  $P_{n+1}$  корректны, принимается решение об окончании восстановления. Если же последовательности некорректны, то производится возврат к этапу пошагового уточнения.

Таким образом, в результате восстановления получается частичная модель неизвестного протокола в виде программы обработки последовательностей его протокольных блоков данных. При этом протокол характеризуется тем набором компонентов, которые были идентифицированы в процессе восстановления. Описание является частичным, так как не существует критериев, позволяющих определить, что мы наблюдали все возможные варианты взаимодействия, а также мы ограничиваемся в восстановлении только теми компонентами и способами их реализации, которые были реализованы на этапе моделирования компонентов ПОПД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход позволяет в автоматизированном режиме частично восстанавливать коммуникационные протоколы. Несмотря на неполноту получаемого описания и ограниченность только смоделированными компонентами, его применение позволяет сократить временные затраты специалистов, занятых решением этой задачи.

### Список используемых источников

1. *Зайцев С.С.* Описание и реализация протоколов сетей ЭВМ. – М. Наука, 1989. – 271 с.
2. Протоколы информационно-вычислительных сетей: справочник / под ред. И.А. Мизина и А.П. Кулешова – М.: Радио и связь, 1990. – 502 с.
3. *Хоар Ч.* Взаимодействующие последовательные процессы: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 264 с.

4. *Zemtsov N.A., Stupnikov S.A.* Formal modeling of process specifications for compositional development of workflows // *The Systems and Means of Informatics* – М.: Nauka, 2004. – Issue 14. – P. 186–198.

5. *Демин Н.Ю.* Обратный инженеринг протоколов передачи данных // *Безопасность информационных технологий: тр. научно-техн. конф.* – Пенза, 2002. – Т. 3. [Секция № 4: Анализ вычислительной среды, верификация, сертификация программ]. – С. 40–46.

6. *Домбровский А.Ф., Киселев А.Н., Савин И.С.* Метод идентификации протоколов сетей передачи данных // *Сб. тр. 10-й Международной конф. «Радиолокация, навигация, связь».* – Воронеж: ВНИИС, 2000. – Т. 1. – С. 504–509.

7. A Survey of Automatic Protocol Reverse Engineering Approaches, Methods, and Tools on the Inputs and Outputs View / *B.D. Sija, Y.-H. Goo, K.-S. Shim, H. Hasanova, M.-S. Kim* // *Security and Communication Networks*. – Vol. 2018. – Article ID 8370341. – 17 p.

8. *J. Narayan, S. K. Shukla, T. C. Clancy.* A survey of automatic protocol reverse engineering tools. *ACM Computing Surveys*. – 2015. – Vol. 48, no. 3. – Article 40.

9. *А.И. Аветисян, А.И. Гетьман.* Восстановление структуры бинарных данных по трассам программ // *Тр. Института системного программирования*. – 2012. – Т. 22. – С. 95–118.

В.Н. Арсеньев,

*доктор техн. наук, профессор;*

К.Г. Зиновьев

1-й Государственный испытательный космодром МО РФ;

И.А. Трофимов,

*кандидат техн. наук;*

А.А. Ядренкин,

*кандидат техн. наук, доцент*

## **МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ОГРАНИЧЕННОМУ ЧИСЛУ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Рассматривается задача оценивания характеристик точности систем управления перспективных объектов по данным, полученным до и после проведения испытаний опытных образцов. Для ее решения используется метод приоритета опытной информации, позволяющий уточнять опытные оценки, если априорная информация не противоречит результатам испытаний. Получены аналитические выражения для апостериорного оценивания характеристик точности и определения выигрыша в качестве оценивания. Приведен пример применения полученных результатов.

Ключевые слова: характеристики точности, априорная информация, ограниченные опытные данные, апостериорное оценивание, выигрыш в оценивании.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из основных задач испытаний перспективных объектов, в качестве которых могут рассматриваться, например, ракеты-носители, космические аппараты, перспективные образцы вооружения, является получение объективных оценок их точностных характеристик. Для ее решения проводятся натурные испытания опытных образцов. Однако из-за высокой стоимости опытных образцов, организации и проведения испытаний, а также некоторых других причин не всегда удается получить достаточный объем опытной информации и, как следствие, статистически устойчивые оценки точностных характеристик системы управления (СУ) объекта. Всесторонний анализ факторов, влияющих на точность СУ на этапах, предшествующих опытной отработке, позволяет получить априорные оценки характеристик точности. Повысить качество оценивания этих характеристик можно путем совместной обработки априорной информации и результатов натурных испытаний опытных образцов [1].

Известные методы комплексирования априорной и опытной информации [2–14] можно разделить на несколько групп. Первую и наибольшую группу составляют методы, базирующиеся на теореме гипотез (формуле Байеса) [2–7]. Качество оценок, полученных на основе данного подхода при ограниченных опытных данных, существенно зависит от априорного распределения, которое часто выбирается из эвристических соображений. Кроме того, в этих процедурах, как правило, не учитывается близость априорной информации к результатам испытаний. Вторую группу составляют методы линейного объединения априорных и опытных оценок [7–14]. Сложность их практического применения связана с отсутствием общих рекомендаций по выбору весовых коэффициентов для различных оценок. Еще большую неопределенность, на наш взгляд, имеют апостериорные оценки, полученные на основе мультипликативных моделей и параметрических функций [7].

В различных практических задачах, связанных с исследованием свойств СУ, физические величины, характеризующие качество протекающих в ней процессов, являются случайными

и распределены по закону арксинуса [15–17]. Это распределение используется, например, для оценивания точности стрельбы по цели, движущейся по гармоническому закону [15]. Ошибки угломерного прибора с эксцентрично закрепленным по отношению к оси вращения визирного устройства лимбом также распределены по закону арксинуса [16].

В общем случае распределению арксинуса подчиняются отклонения точки, колеблющейся по закону вида  $\hat{X} = \mu \sin(2\pi\hat{t}/T + \varphi_0)$  при условии, что отсчеты производятся в случайные моменты  $\hat{t}$  периода колебаний  $T$ , подчиняющиеся закону равномерной плотности. В этой формуле знак «^» используется для обозначения случайной величины,  $\mu$  – максимальное значение случайной величины  $\hat{X}$ , а  $\varphi_0$  – фаза ее колебаний.

Отсюда видно, что параметр  $\mu$  характеризует максимальное значение погрешности и может рассматриваться как показатель точности СУ.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается распределенная по закону арксинуса случайная величина  $-\mu < \hat{X} < \mu$ , характеризующая точность образца вооружения. Функция плотности распределения  $\hat{X}$  имеет вид [15]

$$\varphi_{\hat{X}}(X; \mu) = \frac{1}{\pi\sqrt{\mu^2 - X^2}}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – максимальное значение погрешности.

Математическое ожидание величины  $\hat{X}$   $M_{\hat{X}} = 0$ , а дисперсия определяется по формуле

$$D_{\hat{X}} = \mu^2/2. \quad (2)$$

На этапах, предшествующих испытаниям опытных образцов, получены априорные оценки  $\mu_p$ ,  $M_p$  и  $D_p$  соответственно параметра  $\mu$ , математического ожидания  $M_{\hat{X}}$  и дисперсии  $D_{\hat{X}}$  случайной величины  $\hat{X}$ , причем оценка  $M_p$  мала.

Проведено  $N_0$  испытаний опытных образцов. Их результаты представлены выборкой  $X_i, i = \overline{1, N_0}$ .

Необходимо получить апостериорные оценки  $\mu_a$ ,  $M_a$  и  $D_a$  соответственно параметра  $\mu$ , математического ожидания  $M_{\hat{X}}$  и дисперсии  $D_{\hat{X}}$  величины  $\hat{X}$ , учитывающие результаты априорных и опытных исследований точности СУ.

Данная задача может быть решена методом приоритета опытной информации [18, 19], согласно которому на первом этапе определяются опытные оценки характеристик точности.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОЦЕНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Для определения опытной оценки  $\mu_0$  параметра  $\mu$  используется метод максимального правдоподобия [16].

По выборке  $X_i, i = \overline{1, N_0}$  составляется функция правдоподобия

$$\prod_{i=1}^{N_0} \varphi_{\hat{X}}(X_i; \mu) = \pi^{-N_0} \prod_{i=1}^{N_0} (\mu^2 - X_i^2)^{-1/2}. \quad (3)$$

Следует отметить, что функция плотности распределения (1) не удовлетворяет условиям регулярности [20], поскольку диапазон изменения ошибки  $\hat{X}$  зависит от оцениваемого параметра  $\mu$ . В связи с этим опытная оценка параметра  $\mu$  определяется из непосредственного анализа функции (3), который дает

$$\mu_o = \max \{ |X_1|, |X_2|, \dots, |X_{N_o}| \}. \quad (4)$$

Ниже будет показано, что эта оценка является смещенной.

Опытные оценки математического ожидания  $M_{\hat{X}}$  и дисперсии  $D_{\hat{X}}$  случайной величины  $\hat{X}$  определяются по известным формулам [1]:

$$M_o = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} X_i ; D_o = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} (X_i - M_o)^2. \quad (5)$$

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ АПОСТЕРИОРНЫХ ОЦЕНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ

В соответствии с методом приоритета опытной информации в качестве меры близости априорной оценки  $\mu_p$  параметра  $\mu$  к опытной оценке  $\mu_o$  используется отношение правдоподобия для проверки гипотезы  $H: \mu = \mu_p$ :

$$v^* = \prod_{i=1}^{N_o} (\mu_o^2 - X_i^2)^{1/2} (\mu_p^2 - X_i^2)^{-1/2}. \quad (6)$$

Отсюда видно, что априорная оценка  $\mu_p$  параметра  $\mu$  должна быть не меньше оценки  $\mu_o$ , поскольку в противном случае становится очевидным несоответствие априорной информации опытным данным.

Сопоставив формулы (4) и (6), можно заметить, что подстановка опытной оценки  $\mu_o$  параметра  $\mu$  в правую часть выражения (6) обращает ее в ноль и, как следствие, отношение правдоподобия становится равным нулю. Поэтому предлагается вместо оценки максимального правдоподобия  $\mu_o$  использовать другую оценку  $\tilde{\mu}_o$ , незначительно отличающуюся от последней:

$$\tilde{\mu}_o = k\mu_o. \quad (7)$$

Значение корректирующего коэффициента  $k$  определяется из условия несмещенности оценки (7)  $M[\tilde{\mu}_o] = kM[\mu_o] = \mu$ :

$$k = \mu / M[\mu_o], \quad (8)$$

где  $M[\cdot]$  – оператор математического ожидания.

Входящее в правую часть формулы (8) математическое ожидание  $M[\mu_o]$  можно найти, если известна плотность распределения  $\varphi_{\mu_o}(\mu_o; \mu)$  оценки  $\mu_o$ . Можно показать, что

$$\varphi_{\mu_o}(\mu_o; \mu) = \frac{N_o 2^{N_o}}{\pi^{N_o} \sqrt{\mu^2 - \mu_o^2}} \left( \arcsin \frac{\mu_o}{\mu} \right)^{N_o-1}. \quad (9)$$

Тогда математическое ожидание оценки  $\mu_o$

$$M[\mu_o] = \int_0^{\mu} \mu_o \varphi_{\mu_o}(\mu_o; \mu) d\mu_o = \mu \left( \frac{N_o 2^{N_o}}{\pi^{N_o}} \int_0^{\pi/2} y^{N_o-1} \sin y dy \right), \quad (10)$$

а корректирующий коэффициент

$$k = \frac{\pi^{N_o}}{N_o 2^{N_o} \int_0^{\pi/2} y^{N_o-1} \sin y dy}. \quad (11)$$

Отсюда видно, что коэффициент  $k \rightarrow 1$  при  $N_o \rightarrow \infty$ . Так, при  $N_o = 5$   $k = 1,060$ , а при  $N_o = 10$   $k = 1,019$ .

Приближенное значение отношения правдоподобия для проверки гипотезы  $H: \mu = \mu_p$  вычисляется по формуле

$$\tilde{v}^* = \prod_{i=1}^{N_o} (\tilde{\mu}_o^2 - X_i^2)^{1/2} (\mu_p^2 - X_i^2)^{-1/2}. \quad (12)$$

Для определения апостериорных оценок математического ожидания  $M_{\hat{X}}$  и дисперсии  $D_{\hat{X}}$  случайной величины  $\hat{X}$  используются формулы, приведенные в [18]:

$$M_a = \frac{M_o + \tilde{v}^* M_p}{1 + \tilde{v}^*}; \quad D_a = \frac{D_o + \tilde{v}^* D_p}{1 + \tilde{v}^*} + \frac{\tilde{v}^* (M_o - M_p)^2}{(1 + \tilde{v}^*)^2}. \quad (13)$$

По величине  $D_a$  из формулы (2) находится апостериорная оценка параметра  $\mu$  распределения (1)

$$\mu_a = \sqrt{2D_a}. \quad (14)$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫИГРЫША В КАЧЕСТВЕ ОЦЕНИВАНИЯ

Согласно [18] апостериорная оценка  $\mu_a$  может рассматриваться как оценка, полученная по выборке объемом  $N_a = N_o + E[\tilde{v}^* N_o]$ , где  $E[\cdot]$  – функция округления до ближайшего целого числа. Поэтому можно говорить о выигрыше в числе испытаний

$$\delta_{ч.и} = E[\tilde{v}^* N_o], \quad (15)$$

получаемом за счет учета априорной информации.

Очевидно, что выигрыш в числе испытаний будет максимальным  $\delta_{ч.и} = N_o$  при  $\tilde{v}^* = 1$ , т. е. когда  $\mu_p = \tilde{\mu}_o$ . В этом случае полагается, что апостериорная оценка  $\mu_a$  получена по результатам испытаний  $2N_o$  опытных образцов.

Для определения выигрыша в точности оценивания используется величина

$$\delta_T = \left( \sqrt{D[\mu_o]} - \sqrt{D[\mu_a]} \right) 100 / \sqrt{D[\mu_o]}, \quad (16)$$

где  $D[\cdot]$  – оператор дисперсии.

Дисперсия опытной оценки определяется по формуле

$$D[\mu_o] = \mu^2 \frac{N_o 2^{N_o}}{\pi^{N_o}} \int_0^{\pi/2} y^{N_o-1} \sin^2 y dy - \mu^2 \left( \frac{N_o 2^{N_o}}{\pi^{N_o}} \int_0^{\pi/2} y^{N_o-1} \sin y dy \right)^2.$$

Положив, что апостериорная оценка  $\mu_a$  получена по выборке объемом  $N_a$  из совокупности с распределением (1), можно найти приближенное значение ее дисперсии по аналогичной формуле

$$\tilde{D}[\mu_a] = \mu^2 \frac{N_a 2^{N_a}}{\pi^{N_a}} \int_0^{\pi/2} y^{N_a-1} \sin^2 y dy - \mu^2 \left( \frac{N_a 2^{N_a}}{\pi^{N_a}} \int_0^{\pi/2} y^{N_a-1} \sin y dy \right)^2.$$

Подстановка  $D[\mu_0]$  и  $\tilde{D}[\mu_a]$  в формулу (16) позволяет определить приближенный выигрыш в точности оценивания, получаемый за счет учета априорной информации.

### ПРИМЕР

Рассматривается новый зенитный комплекс, предназначенный для поражения воздушных целей. Цель – самолет, осуществляющий прямолинейный горизонтальный полет. Движение самолета сопровождается гармоническими колебаниями в горизонтальной плоскости около генерального курса и описывается уравнением

$$\hat{X} = \mu \cos(2\pi\hat{t}/T + \varphi_0),$$

где  $\hat{X}$  – отклонение самолета от генерального курса;

$\hat{t}$  – текущее время;

$T$  и  $\varphi_0$  – период и начальная фаза колебаний [15].

Зенитная комплекс и курс самолета находятся в одной вертикальной плоскости. Период колебаний самолета  $T$  существенно меньше времени полета снаряда.

Можно полагать, что величина  $\hat{t}$  имеет равномерное распределение, поскольку любое значение текущего времени не имеет преимуществ перед другими моментами времени. Угол  $\hat{\varphi} = 2\pi\hat{t}/T + \varphi_0$ , как линейная функция от  $\hat{t}$ , также подчиняется закону равномерной плотности. Следовательно, отклонение самолета от генерального курса  $\hat{X}$  распределено по закону арксинуса с параметром  $\mu$ .

До проведения испытаний зенитного комплекса получены априорные оценки  $\mu_p = 19$  м,  $M_p = 0,2$  м,  $D_p = 180$  м<sup>2</sup> соответственно максимального значения  $\mu$ , математического ожидания  $M_{\hat{X}}$  и дисперсии  $D_{\hat{X}}$  рассеивания снарядов в боковом направлении, обусловленного отклонениями самолета от генерального курса. В процессе опытной отработки испытывались шесть зенитных комплексов в одних и тех же условиях. Отклонения снарядов составили:  $X_1 = 13$  м,  $X_2 = -12$  м,  $X_3 = 11$  м,  $X_4 = -16$  м,  $X_5 = 10$  м,  $X_6 = -9$  м.

Необходимо определить апостериорные оценки максимальной и средней квадратической ошибок стрельбы в боковом направлении, обусловленных отклонениями самолета от генерального курса.

Величина средней квадратической ошибки стрельбы зависит от способа выработки упреждения. Считается, что при определении упрежденной точки учитывается только генеральный курс самолета. При этом условии средняя квадратическая ошибка стрельбы в боковом направлении не отличается от среднеквадратического отклонения самолета от генерального курса и равна  $\sigma_{\hat{X}} = \sqrt{D_{\hat{X}}} = \mu/\sqrt{2}$ .

Оценка максимального правдоподобия параметра  $\mu$ , скорректированная (несмещенная) оценка этого параметра и корректирующий коэффициент, полученные по результатам испытаний опытных образцов зенитного комплекса в соответствии с формулами (4), (7), (11), имеют вид:  $\mu_0 = 16$  м,  $\tilde{\mu}_0 = 16,7$  м,  $k = 1,045$ . Опытные оценки математического ожидания и дисперсии ошибки стрельбы в боковом направлении согласно формулам (5) принимают значения:  $M_0 = -0,5$  м,  $D_0 = 145$  м<sup>2</sup>. Можно заметить их значительное отличие от соответствующих априорных оценок.

Подстановка  $\tilde{\mu}_0$  и  $\mu_p$  в формулу (12) дает значение  $\tilde{v}^* \approx 0,161$  отношения правдоподобия, характеризующего близость данных, полученных расчетным путем и в процессе испытаний опытных образцов. Тогда апостериорные оценки математического ожидания и дисперсии

ошибки стрельбы зенитного комплекса в боковом направлении определяются по формулам (13):  $M_a = -0,4$  м и  $D_a = 150$  м<sup>2</sup>. На основе оценки  $D_a$  получаются искомые апостериорные оценки максимального значения ошибки стрельбы  $\mu_a = \sqrt{2D_a} \approx 17$  (м) и ее среднеквадратического отклонения  $\sigma_a = \sqrt{D_a} \approx 12$  (м).

Выигрыш, полученный за счет учета априорной информации при оценивании максимальной погрешности стрельбы по точности составил  $\delta_T \approx 16\%$ , а по числу испытаний –  $\delta_{ч.и}=1$ . Таким образом, можно полагать, что апостериорная оценка  $\mu_a$  получена по результатам испытаний семи опытных образцов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод приоритета опытной информации позволяет оценить точность СУ перспективных объектов путем взвешенного учета информации, полученной до и после проведения испытаний ограниченного числа опытных образцов. Выигрыш в качестве оценивания зависит от близости априорных и опытных данных, мерой которой является отношение правдоподобия для проверки гипотезы об однородности имеющейся информации. Применение адекватных моделей на этапах, предшествующих натурным испытаниям, повышает достоверность априорной информации и, как следствие, качество апостериорных оценок.

## Список используемых источников

1. Буренок В.М., Найденов В.Г. Испытательная база: выход из кризиса // Возд.-косм. оборона: журн. – 2009. – № 1 (44). – С. 18–25.
2. Фроленков К.В. Уточнение оценок вероятностей при локальном апостериорном выводе алгебраической байесовской сети в случае неточного свидетельства // Тр. СПИИРАН. – 2013. – № 1 (24). – С. 152–164.
3. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases / Daniel Kahneman, et al. – Cambridge University Press, 2005. – 555 p.
4. Тулупьев А.Л. Апостериорные оценки вероятностей в алгебраических байесовских сетях // Вест. СПбГУ. Сер. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2012. – № 2. – С. 51–59.
5. Дорожко И.В., Осипов Н.А. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматических систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации // Тр. СПИИРАН. – 2012. – № 1(20). – С. 165–185.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для студ. вузов. – 9-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.
7. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др. – М.: Логос, 2003. – 736 с.
8. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / под ред. Р.М. Юсупова. – Л.: Энергия, 1978. – 192 с.
9. Арсеньев В.Н., Лабецкий П.В. Метод апостериорного оценивания характеристик системы управления летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. – 2014. – Т.57, № 10. – С. 23–28.
10. Пат. 2015554 Российская Федерация. Статистический анализатор / В.Н. Арсеньев. – Оpubл. 1994. Бюл. № 12.

11. *Постников В.М., Спиридонов С.Б.* Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – № 6. – С. 267–287.
12. *Коробов Б.В.* Сравнительный анализ методов определения весовых коэффициентов «влияющих факторов» // Социология: методология, методы, математическое моделирование. – 2005. – № 20. – С. 54–73.
13. *Пугачёв В.Н.* Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. – М.: Сов.радио, 1973. – 256 с.
14. *Щербаков П.С.* Использование априорной информации для уточнения оценок параметров // Изв. АН СССР. Автом. и телемех. – 1988. – № 5. – С. 80–89.
15. Справочник по вероятностным расчетам / Г.Г. Абезгауз, А.П. Тронь, Ю.Н. Копенкин и др. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.
16. *Пугачёв В.С.* Теория вероятностей и математическая статистика. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Физматлит, 2002. – 496 с.
17. *Токарев А.Б.* Теория вероятностей и случайные процессы в радиотехнике: учеб. пособие. – Воронеж: ВГТУ, 2010. – Ч. 1. – 197 с.
18. *Арсеньев В.Н.* Метод приоритета опытной информации для апостериорного оценивания характеристик системы управления // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – Вып. 633. – С. 18–24.
19. *Ардашов А.А., Арсеньев В.Н., Силантьев С.Б.* Оценивание характеристик надежности сложной системы при ограниченном объеме экспериментальных данных // Изв. вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 3. – С. 197–201.
20. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Наука, 1985. – 640 с.

С.Ю. Быстров,  
*адъюнкт;*  
Ю.А. Кузьмичёв,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
Ю.В. Петров,  
*доцент;*  
И.А. Шевкунов,  
*кандидат техн. наук*

## **АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРЕНИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СБОЯХ, ОТКАЗАХ И УХУДШЕНИИ ТОЧНОСТИ В РАБОТЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Рассмотрены оценки статистических характеристик измерений навигационных параметров. Получены аналитические выражения для математических ожиданий и дисперсий оценок статистических характеристик измерений при сбоях, отказах, ухудшениях точности. Проведен анализ изменения статистических характеристик. Приведены результаты аналитических вычислений и зависимости изменения статистических характеристик от мешающих факторов.

Ключевые слова: статистические оценки, статистические характеристики, сбои, отказы, ухудшение точности, контроль работоспособности, навигационные датчики, взаимная корреляция.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В работе измерителей навигационных параметров (навигационных датчиков), устанавливаемых на борту летательного аппарата, возможны аномалии. К таким аномалиям относятся сбои, отказы и ухудшение точности. Для контроля исправного функционирования датчиков во время полета применяются различные методы и алгоритмы [1]. Одним из них является алгоритм контроля коэффициента взаимной корреляции измерений от нескольких датчиков, измеряющих один и тот же навигационный параметр [2]. Очевидно, что при различных аномалиях статистические характеристики измерений, в том числе коэффициент взаимной корреляции, будут принимать различные значения. В этой связи целесообразным является разработка алгоритма контроля отказов датчиков на основе анализа статистических характеристик измерений.

Целью работы является анализ изменения математических ожиданий и дисперсий оценок статистических характеристик измерений параметров производимых разнородными бортовыми навигационными датчиками при сбоях, отказах, ухудшениях точности.

### **АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРЕНИЙ В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

Рассмотрим в качестве параметра взаимную корреляцию измерений скорости движения летательного аппарата (ЛА). Измерения скорости движения летательного аппарата двумя измерителями  $x$  и  $y$  представим в виде двух составляющих - истинного значения и погрешности измерения:

$$x_i = V_i + \Delta V_{x_i},$$

$$y_i = V_i + \Delta V_{y_i}.$$

Изменение истинного значения  $V_i$  можно представить в виде Марковского случайного процесса с математическим ожиданием  $m_v$ , дисперсией  $\sigma_v^2$  и коэффициентом автокорреляции  $\rho_v$ . Изменение погрешностей измерения также представим, как Марковские случайные процессы. Так, для первого датчика погрешность  $\Delta V_{x_i}$  имеет математическое ожидание  $m_{\Delta V_x}$ , дисперсию  $\sigma_{\Delta V_x}^2$  и коэффициент автокорреляции  $\rho_{\Delta V_x}$ , а для второго датчика погрешность  $\Delta V_{y_i}$  имеет математическое ожидание  $m_{\Delta V_y}$ , дисперсию  $\sigma_{\Delta V_y}^2$ , и коэффициент автокорреляции  $\rho_{\Delta V_y}$ .

Предположим, что погрешности измерений не зависят от значения скорости, тогда имеем  $M[V_i \cdot \Delta V_{xi}] = 0, M[V_i \cdot \Delta V_{yi}] = 0$ . Допустим также, что они независимы между собой:  $M[\Delta V_{xi} \cdot \Delta V_{yi}] = 0$ .

В таком случае статистические характеристики измерений будут определяться показателями:

– математическим ожиданием

$$m_x = m_v + m_{\Delta V_x},$$

$$m_y = m_v + m_{\Delta V_y};$$

– дисперсией

$$\sigma_x^2 = \sigma_v^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2,$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_v^2 + \sigma_{\Delta V_y}^2;$$

– коэффициентом автокорреляции

$$\rho_x = \frac{1}{\sigma_x^2} \cdot [\rho_v \cdot \sigma_v^2 + \rho_{\Delta V_x} \cdot \sigma_{\Delta V_x}^2],$$

$$\rho_y = \frac{1}{\sigma_y^2} \cdot [\rho_v \cdot \sigma_v^2 + \rho_{\Delta V_y} \cdot \sigma_{\Delta V_y}^2];$$

– коэффициентом взаимной корреляции

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_v^2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{\Delta V_y}^2}{\sigma_v^2}}}.$$

В полете оценки статистических характеристик получают по ограниченной выборке, состоящей из  $k$  отсчетов:

$$\hat{m}_x = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k x_i;$$

$$\hat{\sigma}_x^2 = \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{i=1}^k (x_i - \hat{m}_x)^2;$$

$$\hat{\rho}_x = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=2}^k \left( \frac{x_i - \hat{m}_x}{\hat{\sigma}_x} \cdot \frac{x_{i-1} - \hat{m}_x}{\hat{\sigma}_x} \right);$$

$$\hat{\rho}_{xy} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \left( \frac{x_i - \hat{m}_x}{\hat{\sigma}_x} \cdot \frac{y_i - \hat{m}_y}{\hat{\sigma}_y} \right).$$

Математические ожидания и дисперсии оценок статистических характеристик при отсутствии отказов, сбоев или снижении точности имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
m[\hat{m}_x] &= (m_V + m_{\Delta V_x}); \\
D[\hat{m}_x] &= \frac{\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2}{k} \cdot \frac{1 + \left( \frac{\rho_V \cdot \sigma_V^2 + \rho_{\Delta V_x} \sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2} \right)}{1 - \left( \frac{\rho_V \cdot \sigma_V^2 + \rho_{\Delta V_x} \sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2} \right) \cdot \left( 1 + \frac{2}{k} \right)}; \\
m[\hat{\sigma}_x^2] &= (\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2) \cdot \left[ 1 - \frac{2}{k-1} \cdot \left( \sum_{i=1}^k \left( 1 - \frac{i}{k} \right) \cdot \left( \frac{\rho_V \cdot \sigma_V^2 + \rho_{\Delta V_x} \sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2} \right) \right) \right]; \\
D[\hat{\sigma}_x^2] &= \frac{2 \cdot (\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2)^2}{k} \cdot \left( 1 + \left( \frac{\rho_V \cdot \sigma_V^2 + \rho_{\Delta V_x} \sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2} \right)^2 \right); \\
m[\hat{\rho}_x] &= \frac{\rho_V \cdot \sigma_V^2 + \rho_{\Delta V_x} \sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2}; \\
D[\hat{\rho}_x] &= \frac{1}{k} \cdot \left( 1 - \left( \frac{\rho_V \cdot \sigma_V^2 + \rho_{\Delta V_x} \sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_V^2 + \sigma_{\Delta V_x}^2} \right)^2 \right).
\end{aligned}$$

Математическое ожидание и дисперсия оценки коэффициента взаимной корреляции измерений  $x$  и  $y$  определяется по выражениям

$$\begin{aligned}
m[\hat{\rho}_{xy}] &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_V^2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{\Delta V_y}^2}{\sigma_V^2}}}; \\
D[\hat{\rho}_{xy}] &= \frac{1}{k} \cdot \left( 1 - \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_{\Delta V_x}^2}{\sigma_V^2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{\Delta V_y}^2}{\sigma_V^2}}} \right)^2 \right).
\end{aligned}$$

Как видно из приведенных выше формул дисперсия оценки коэффициента взаимной корреляции уменьшается с увеличением времени наблюдения или коэффициента взаимной корреляции измерений.

В качестве примера рассмотрим измерения одной из проекций скорости инерциальной навигационной системы ( $x$ ) и приемника спутниковой навигационной системы ( $y$ ). Пусть статистические характеристики измерителей имеют следующие значения:

$$\begin{aligned}
m_V &= 200, m_{\Delta V_x} = 2, m_{\Delta V_y} = 0, \\
\sigma_V &= 0,834, \sigma_{\Delta V_x} = 0,000025, \sigma_{\Delta V_y} = 0,025, \\
\rho_V &= 0,9, \rho_{\Delta V_x} = 0,9, \rho_{\Delta V_y} = 0,3.
\end{aligned}$$

Оценки производятся по  $k = 4000$  измерений.

Тогда статистические характеристики (математические ожидания и дисперсии указанных выше оценок) принимают значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

**Статистические характеристики при отсутствии сбоев,  
отказов или ухудшений точности**

Стат. характеристика	Истинное значение	$m[...]$	$D[...]$
$m_x$	202	202	0,0033
$\sigma_x^2$	0,696	0,693	0,0004
$\rho_x$	0,9	0,9	0
$\rho_{xy}$	0,99	0,99	0

Как видно из этой таблицы, коэффициент взаимной корреляции при исправной работе обоих измерителей принимает значение, близкое к единице.

Для анализа изменения статистических характеристик измерений параметров при аномалиях введем модели отказов, сбоев и ухудшений точности.

**АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРЕНИЙ  
НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОТКАЗАХ**

Под отказом понимается ситуация, когда с некоторого момента времени измерения параметра принимают нулевые значения. Таким образом, модель измерений с отказом примет следующий вид:

$$x_i = \begin{cases} V_i + \Delta V_{x_i}, & i < i_{\text{отк}}; \\ 0, & i \geq i_{\text{отк}}, \end{cases}$$

где  $i_{\text{отк}}$  – номер измерения, при котором происходит отказ.

В данном случае статистические характеристики будут определяться выражениями

$$m_x^{\text{отк}} = m_x - m_x \cdot \frac{(k - k_{\text{отк}})}{k};$$

$$\sigma_x^{\text{отк}2} = \sigma_x^2 - (\Delta m_x^{\text{отк}})^2 - \sigma_x^2 \cdot \frac{k_{\text{отк}}}{k} + \frac{(m_x)^2 (k - k_{\text{отк}})}{k};$$

$$\rho_x^{\text{отк}} = \frac{\rho_x}{1 + \left(\frac{\Delta \sigma_x^{\text{отк}}}{\sigma_x}\right)^2} + \frac{2 \cdot \Delta m_x^{\text{отк}2} - m_x^{\text{отк}2}}{2 \cdot \sigma_x^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\Delta \sigma_x^{\text{отк}}}{\sigma_x}\right)^2\right)};$$

$$\rho_{xy}^{\text{отк}} = \frac{\rho_{xy}}{1 + \frac{\Delta \sigma_x^{\text{отк}}}{\sigma_x}}$$

где  $k_{\text{отк}}$  – количество измерений, при котором происходит отказ.

Так, например, при  $\frac{k_{\text{отк}}}{k} = \frac{1}{2}$  статистические характеристики (математические ожидания и дисперсии их оценок) принимают значения, приведенные в табл. 2.

Так как для контроля исправности наибольший интерес представляет коэффициент взаимной корреляции, то, пользуясь приведенными аналитическими выражениями, можно по-

лучить зависимость коэффициента взаимной корреляции от значения количества отказных отсчетов  $k_{отк}$ . Такая зависимость приведена на рис. 1.

Таблица 2

## Статистические характеристики при отказе

Стат. характеристика	Истинное значение	$m[...]$	$D[...]$
$m_x^{отк}$	101	101	48,233
$\sigma_x^{отк2}$	10201,3	10201,3	9416
$\rho_x^{отк}$	0,99999	0,99999	0
$\rho_{xy}^{отк}$	0,007	0,007	0

Как видно из рисунка, коэффициент взаимной корреляции измерений быстро уменьшается с ростом количества отказных отсчетов.

### АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРЕНИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СБОЯХ

Под сбоем понимается кратковременная самоустраняющаяся утрата техническим объектом работоспособности. Таким образом, модель измерений, учитывающая эти события, имеет следующий вид:

$$x_i = \begin{cases} V_i + \Delta(V_{x_i}), & i \neq k_{сб} \\ x^{сб}, & i = i_{сб} \end{cases},$$

где  $i_{сб}$  – номера отсчетов, при которых происходит сбой,

$x^{сб}$  – значение сбойного отсчета.

В случае единичного сбоя и  $x^{сб} = 0$  статистические характеристики будут определяться выражениями:

$$m_x^{сб} = m_x - m_x \cdot \frac{1}{k},$$

$$\sigma_x^{сб2} = \sigma_x^2 + (\Delta m_x^{сб})^2 + \frac{(m_x^{сб})^2}{k-1},$$

$$\rho_x^{сб} = \frac{\rho_x}{1 + \left(\frac{\Delta \sigma_x^{сб}}{\sigma_x}\right)^2} + \frac{\Delta m_x^{сб2}}{\sigma_x^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\Delta \sigma_x^{сб}}{\sigma_x}\right)^2\right)},$$

$$\rho_{xy}^{сб} = \frac{\rho_{xy}}{1 + \frac{\Delta \sigma_x^{сб}}{\sigma_x}}.$$

В этом случае статистические характеристики, их математические ожидания и дисперсии принимают значения, приведенные в табл. 3.

При одиночном сбое коэффициент взаимной корреляции будет зависеть от разности значений измерения в сбойном отсчете и математического ожидания измерений. Эта зависимость приведена на рис. 2.

Таблица 3

## Статистические характеристики при сбое

Стат. характеристика	Истинное значение	$m[...]$	$D[...]$
$m_x^{сб}$	201,95	201,95	0,003
$\sigma_x^{сб2}$	10,902	9,596	0,05
$\rho_x^{сб}$	0,058	0,058	0,00019
$\rho_{xy}^{сб}$	0,18	0,18	0,0002

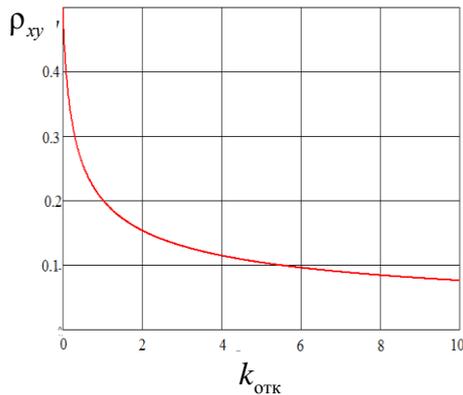


Рис. 1. Зависимость коэффициента взаимной корреляции от количества отказных отсчетов

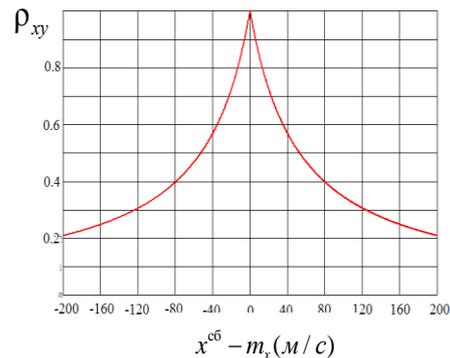


Рис. 2. Зависимость коэффициента взаимной корреляции от разности значения измерения в сбойном отсчете и математического ожидания

### АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРЕНИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СНИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ ПО СРЕДНЕМУ ЗНАЧЕНИЮ

Модель ухудшения точности может быть описана следующим образом:

$$x_i = V_i + \Delta(V_{x_i}) + \Delta m_{\Delta Vx} \cdot i \cdot \Delta t,$$

где  $\Delta t$  – шаг измерений параметра.

В этом случае статистические характеристики будут определяться выражениями:

$$m_x^{\Delta m} = m_x + \frac{\Delta m_{\Delta Vx} \cdot (k+1)}{2};$$

$$\sigma_x^{\Delta m2} = \sigma_x^2 + \frac{\Delta m_{\Delta Vx}^2}{k-1} \cdot \frac{k \cdot (k+1) \cdot (2k+1)}{6} - \frac{k \cdot (k+1) \cdot \Delta m_{\Delta Vx} \cdot \Delta m_x^{\Delta m}}{k-1} + \frac{k \cdot \Delta m_x^{\Delta m2}}{k-1};$$

$$\rho_x^{\Delta m} = \frac{\rho_x}{1 + \left(\frac{\Delta \sigma_x^{\Delta m}}{\sigma_x}\right)^2} + \frac{\Delta m_{\Delta Vx}^2 \cdot \sum_{i=1}^k (i^2 - i)}{k \cdot \sigma_x^{\Delta m2}} + \frac{\Delta m_x^{\Delta m2}}{\sigma_x^{\Delta m2}} - \frac{\Delta m_{\Delta Vx} \cdot \Delta m_x^{\Delta m} \cdot \sum_{i=1}^k (2 \cdot i + 1)}{k \cdot \sigma_x^2};$$

$$\rho_{xy}^{\Delta m} = \frac{\rho_{xy}}{1 + \frac{\Delta \sigma_x^{\Delta m}}{\sigma_x}}.$$

Пользуясь приведенными аналитическими выражениями, можно изобразить зависимость коэффициента взаимной корреляции от значения погрешности, накапливаемой на каждом шаге наблюдения ( $\Delta m_{\Delta Vx}$ ). Такая зависимость приведена на рис. 3.

Таким образом, при увеличении погрешности коэффициент взаимной корреляции измерений уменьшается.

## АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРЕНИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ УХУДШЕНИИ ТОЧНОСТИ ПО ДИСПЕРСИИ

Модель ухудшения точности по дисперсии ошибки измерения описывается выражением

$$x_i = V_i + \Delta V_{x_i} (\sigma_{\Delta V_{x_i}} + \Delta \sigma_{\Delta V_{x_i}} \cdot i \cdot \Delta t).$$

В данном случае статистические характеристики будут определяться выражениями:

$$m_x^{\Delta \sigma} = m_x,$$

$$\sigma_x^{\Delta \sigma^2} = \sigma_x^2 + \sum_{i=1}^k \sigma_{\Delta V_{x_i}}^2 \cdot i,$$

$$\rho_x^{\Delta \sigma} = \frac{\rho_x}{1 + \left( \frac{\Delta \sigma_x^{\Delta \sigma}}{\sigma_x} \right)^2},$$

$$\rho_{xy}^{\Delta \sigma} = \frac{\rho_{xy}}{1 + \frac{\Delta \sigma_x^{\Delta \sigma}}{\sigma_x}}.$$

Зависимость коэффициента взаимной корреляции от значения дисперсии измерений накапливаемой на каждом шаге наблюдения ( $\sigma_{\Delta V_{x_i}}$ ) приведена на рис. 4.

Из этого следует, что коэффициент взаимной корреляции уменьшается с ростом погрешности измерений по дисперсии.

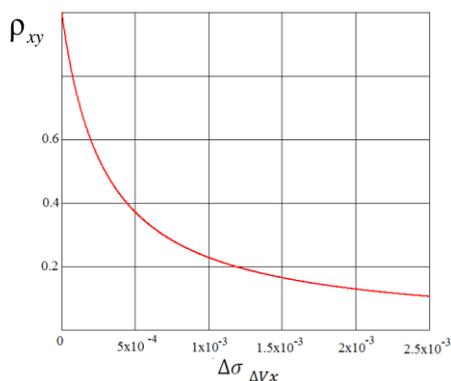


Рис. 3. Зависимость коэффициента взаимной корреляции от значения ошибки по математическому ожиданию

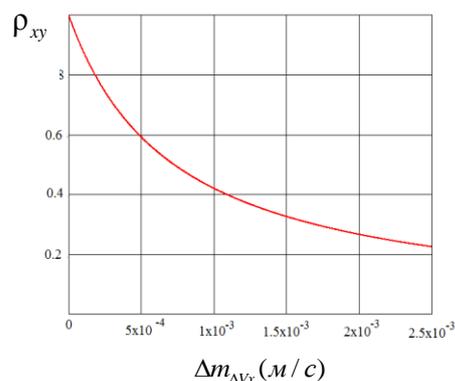


Рис. 4. Зависимость коэффициента взаимной корреляции от значения погрешности по дисперсии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье получены аналитические выражения для статистических характеристик измерений навигационных параметров для случаев отказа, сбоя, ухудшений точности по среднему значению и дисперсии.

2. Произведены вычисления изменений статистических характеристик для некоторых частных случаев, а также получены зависимости коэффициента взаимной корреляции от влияющих факторов.

3. Коэффициент взаимной корреляции измерений уменьшается при увеличении количества отказных отсчетов, при росте разности между значением измерения параметра в сбойном отсчете и математическим ожиданием измерений, а также при увеличении ошибок измерений, накапливаемых по математическому ожиданию и дисперсии.

4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов контроля информационных нарушений в навигационных системах летательных аппаратов.

### Список используемых источников

1. *Ипполитов С.В., Кучевский В.Л., Юдин В.Т.* Методы и средства контроля: учеб. пособие. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 239 с.

2. *Быстров С.Ю., Петров Ю.В.* Синтез алгоритма контроля коэффициента взаимной корреляции измерений навигационных параметров с целью обнаружения отказов в многократно резервируемых бортовых системах // Вестн. РГРТУ. – Рязань, РГРТУ, 2015. – № 1 (вып. 51). – С. 55–58.

3. *Куликов Е.И.* Методы измерения случайных процессов. – М.: Радио и связь, 1986. – 272 с.

4. *Фоминов И.В.* Концепция многоуровневой адаптации комплексных навигационных систем малых космических аппаратов // Вестн. Самарского университета им. академика С.П. Королёва. – Самара: СГАУ им. академика С.П. Королёва, 2015. – Т. 14, № 1. – С. 83–91.

5. *Голяков А.Д., Фоминов И.В.* Методы адаптивной обработки навигационных измерений бортовыми средствами искусственных спутников Земли // Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 28–35.

Р.М. Вивчарь,  
Д.В. Решетников,  
кандидат техн. наук, доцент

## ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РКК НА ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ЗА ЗАДАННОЕ ВРЕМЯ

В публикации рассматривается вопрос моделирования процесса применения технологического оборудования ракетно-космического комплекса и на его основе проводится оценка влияния параметров системы эксплуатации технологического оборудования на вероятность выполнения технологических операций за заданное время, а следовательно, и на вероятность подготовки и пуска ракеты космического назначения за заданное время. Актуальность темы определяется необходимостью обеспечения требуемого значения этой вероятности. Представлены результаты оценки влияния параметров системы эксплуатации технологического оборудования на вероятность ее выполнения за заданное время на примере технологической операции технологического графика подготовки ракеты-носителя Союз-2.1а.

Ключевые слова: ракетно-космический комплекс, система эксплуатации, технологическое оборудование, ракета-носитель.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из показателей, характеризующих процесс применения технологического оборудования (ТлОб) по назначению, является вероятность подготовки и пуска ракеты космического назначения (РКН) за заданное время ( $P_{\text{пп}}$ ). Требования к этому показателю задаются в тактико-техническом задании на ракетно-космический комплекс (РКК). Как показывает практика эксплуатации различных РКК, вероятность подготовки и пуска РКН не соответствует требуемым значениям. Так, в 75 % случаев время подготовки РН типа «Союз-2» превышает время, определенное в технологическом графике (ТГ) подготовки [5], что обуславливает актуальность задачи обеспечения требуемой  $P_{\text{пп}}$ .

Для ее решения необходима оценка влияния параметров СЭ ТлОб РКК на этот показатель. К ним относятся параметры системы подготовки личного состава боевого расчета (БР), параметры системы обеспечения запасами (СОЗ), параметры системы поддержания в готовности к применению по назначению (СПГПН). Это возможно сделать путем имитационного моделирования процесса подготовки РКН к пуску и построения на основе его результатов регрессионного уравнения зависимости  $P_{\text{пп}}$  от указанных выше параметров СЭ ТлОб РКК. Регрессионное уравнение позволит решить оптимизационную задачу обеспечения требуемой  $P_{\text{пп}}$ , что не позволяет сделать имитационное моделирование, но и проще провести оценку влияния этих параметров на  $P_{\text{пп}}$  даже на уровне эксплуатирующих организаций.

Процесс подготовки ракеты космического назначения к пуску осуществляется согласно ТГ. ТГ – это сетевой график, представляющий собой модель выполнения совокупности операций, отражающую взаимосвязи и результаты выполнения всех работ, необходимых для конечной цели процесса [3]. Поэтому целесообразно для начала оценить влияние параметров СЭ ТлОб РКК на вероятность выполнения отдельной технологической операции (ТехОп) за заданное время  $P_{\text{то}}$ . Под заданным временем будем понимать время, указанное в ТГ подготовки.

## ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ

В качестве параметров СЭ ТлОб РКК, оказывающих влияние на  $P_{то}$ , были взяты следующие параметры:

- количество запасных частей (ЗЧ) элементов замены (ЭЗ) ТлОб;
- времена доставки ЗЧ ЭЗ;
- уровень обученности личного состава БР, характеризующийся временем устранения неисправности  $t_{устр}$ ;
- период контроля технического состояния (ТС) ТлОб.

Основанием для выбора параметров стал анализ отчетов по пускам ракет-носителей «Союз-2» с 1 Государственного испытательного космодрома Министерства Обороны (МО) РФ [5], который показал, что именно эти параметры оказывают наиболее существенное влияние на продолжительность процесса подготовки РКН к пуску, а следовательно, и на  $P_{то}$  [2].

Для повышения эффективности оценивания влияния параметров СЭ было получено аналитическое выражение зависимости  $P_{то}$  от этих параметров. Алгоритм получения этого выражения представлен на рис. 1.

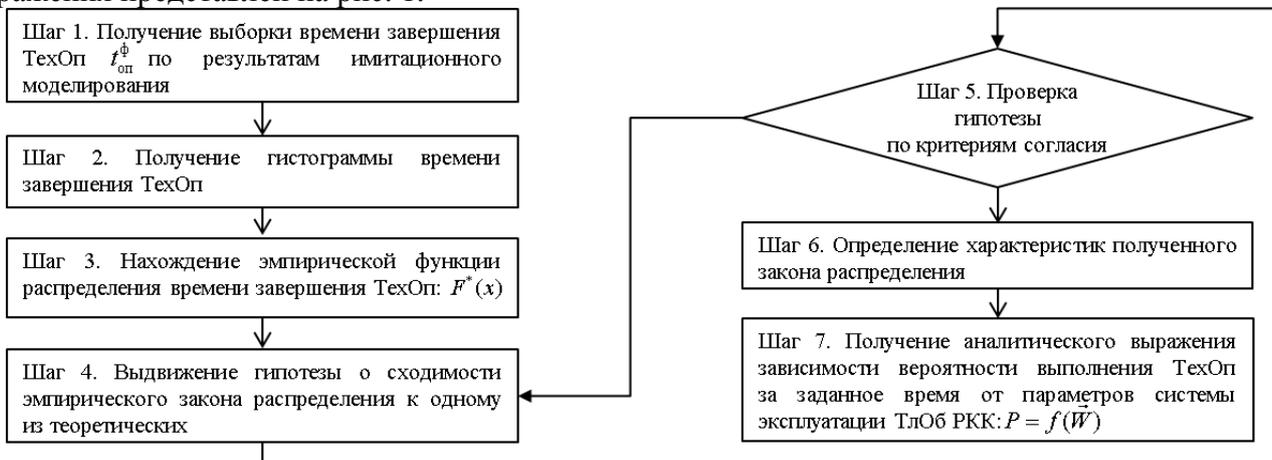


Рис. 1. Алгоритм получения аналитического выражения зависимости  $P_{то}$  от параметров СЭ ТлОб РКК

На шаге 1 (рис. 1) по результатам имитационного моделирования процесса применения ТлОб РКК по назначению удастся получить выборку времен выполнения технологической операции –  $t_{оп}^{\phi}$ . В качестве исходных данных для моделирования были взяты:

- $\vec{\lambda}$  – вектор, интенсивностей отказов  $k$ -го ЭЗ  $m$ -й составной части (СЧ)  $i$ -го вида ТлОб,  $\vec{\lambda} = [\lambda_{im1}, \lambda_{im2}, \dots, \lambda_{imk}, \dots, \lambda_{imK_m}]^T$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $k = \overline{1, K_m}$ ;
- $\vec{D}_{эз}$  – вектор, характеризующий количество ЗЧ  $k$ -го ЭЗ  $m$ -й СЧ  $i$ -го вида ТлОб,  $\vec{D}_{эз} = [d_{im1}, d_{im2}, \dots, d_{imk}, \dots, d_{imK_m}]^T$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $k = \overline{1, K_m}$ ;
- $\vec{Z}$  – вектор, периодов пополнения комплекта ЗИП  $k$ -го ЭЗ  $m$ -й СЧ  $i$ -го вида ТлОб,  $\vec{Z} = [z_{im1}, z_{im2}, \dots, z_{imk}, \dots, z_{imK_m}]^T$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $k = \overline{1, K_m}$ ;
- $L$  – множество, характеризующее параметры закона распределения времени доставки ЗЧ  $k$ -го ЭЗ  $m$ -й СЧ  $i$ -го вида ТлОб,  $L = \{t_{минimk}^{дос}, t_{максimk}^{дос}, \alpha_{досimk}, \beta_{досimk}\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $k = \overline{1, K_m}$ ;
- $\vec{X}$  – вектор, характеризующий возможные стратегии поддержания в готовности  $i$ -го вида ТлОб,  $\vec{X} = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_I]^T$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $x_i = [1, 0, 0]^T$  – жесткая,  $x_i = [0, 1, 0]^T$  – гибкая,  $x_i = [0, 0, 1]^T$  – смешанная;

- $R$  – множество параметров закона распределения времени устранения неисправности БР  $i$ -вида ТлОб, характеризующего его уровень обученности,  
 $R = \{t_{\min i}^{\text{устр}}, t_{\max i}^{\text{устр}}, \alpha_{\text{устр}i}, \beta_{\text{устр}i}\}, i = \overline{1, I}$ .

На *шаге 2* происходит построение гистограммы времени выполнения ТехОп с целью получения его эмпирической функции распределения и определения вида плотности вероятности.

На *шаге 3* находится эмпирическая функция распределения времени завершения ТехОп.

На *шаге 4* по виду гистограммы времени завершения ТехОп выдвигается гипотеза о сходимости эмпирического закона распределения к одному из теоретических.

На *шаге 5* проводится проверка гипотезы о сходимости эмпирического закона распределения  $t_{\text{оп}}^{\phi}$  к известному теоретическому по критерию согласия Пирсона ( $\chi$ -квадрат) [1]. Если гипотеза подтверждается, то на *шаге 6* определяются параметры закона распределения времени завершения ТехОп. В противном случае выдвигается новая гипотеза.

В результате многократного моделирования различных технологических операций ТГ подготовки РКН было выявлено, что вне зависимости от типа операций, используемого в них ТлОб, выборки времен выполнения этих ТехОп всегда сходятся к четырехпараметрическому закону бета-распределения с параметрами:  $t_{\text{оп}}^{\min}, t_{\text{оп}}^{\max}, \alpha_{\text{оп}}, \beta_{\text{оп}}$ , плотность вероятности которого определяется следующим выражением [1]:

$$H(t) = H(t, t_{\text{оп}}^{\min}, t_{\text{оп}}^{\max}, \alpha_{\text{оп}}, \beta_{\text{оп}}) = \frac{(t - t_{\text{оп}}^{\min})^{\alpha_{\text{оп}} - 1} (t_{\text{оп}}^{\max} - t)^{\beta_{\text{оп}} - 1}}{J(\alpha_{\text{оп}}, \beta_{\text{оп}}) (t_{\text{оп}}^{\max} - t_{\text{оп}}^{\min})^{\alpha_{\text{оп}} + \beta_{\text{оп}} + 1}}, \quad (1)$$

где  $J(\alpha_{\text{оп}}, \beta_{\text{оп}})$  – бета-функция (интеграл Эйлера 2-го порядка),

$$J(\alpha_{\text{оп}}, \beta_{\text{оп}}) = \int_0^1 b^{\alpha_{\text{оп}} - 1} (1 - b)^{\beta_{\text{оп}} - 1} db; \quad (2)$$

$t_{\text{оп}}^{\min}, t_{\text{оп}}^{\max}, \alpha_{\text{оп}}, \beta_{\text{оп}}$  – параметры закона распределения.

На *шаге 7*, в результате проведения многофакторного регрессионного анализа получаем аналитическое выражение зависимости  $P_{\text{то}}$  от указанных выше параметров, характеризующих СЭ ТлОб РКК. Это дает возможность более просто и с меньшими временными затратами прогнозировать эту вероятность и оценивать влияние на нее каждого параметра. Общий вид выражения представлен формулой (3).

$$P_{\text{то}} = 1 - \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_M} a_{0imk} (1 - r_{imk}(d_{imk})) t_{\text{дос}imk}^{\text{ож}} - \sum_{i=1}^I a_{5i} t_{\text{устр}i}^{\text{ож}} - \sum_{i=1}^I a_{6i} \tau_i, \quad (3)$$

- где  $d_{imk}$  – количество ЗЧ  $k$ -го ЭЗ  $m$ -й СЧ  $i$ -вида ТлОб, участвующего в проведении ТехОп;  
 $t_{\text{дос}imk}^{\text{ож}}$  – среднее время доставки ЗЧ  $k$ -го ЭЗ  $m$ -й СЧ  $i$ -вида ТлОб, участвующего в проведении ТехОп;  
 $t_{\text{устр}i}^{\text{ож}}$  – среднее время устранения неисправности БР;  
 $\tau_i$  – период контроля ТС  $i$ -го вида ТлОб;  
 $r_{imk}(d_{imk})$  – вероятность того, что число отказов  $k$ -го ЭЗ  $m$ -й СЧ  $i$ -вида ТлОб за период пополнения комплекта ЗИП не превысит число имеющихся в наличии ЗЧ этого типа.

При этом для расчета  $r_{imk}(d_{imk})$  удобно пользоваться выражением (4):

$$r_{imk}(d_{imk}) = a_{1imk} + a_{2imk} d_{imk} - a_{3imk} d_{imk}^2 + a_{4imk} d_{imk}^3. \quad (4)$$

В выражении (3) перед временем доставки  $t_{досимк}^{ож}$  стоит выражение  $r_{имк}(d_{имк})$ , что указывает на то, что время доставки начинает оказывать влияние на  $P_{то}$  только в том случае, когда в комплекте ЗИП нет ЗЧ.

Для вычисления  $t_{досимк}^{ож}$  и  $t_{устри}^{ож}$  были использованы выражения (5, 6) [4]:

$$t_{досимк}^{ож} = t_{досимк}^{мин} + (t_{досимк}^{макс} - t_{досимк}^{мин}) \frac{\alpha_{досимк}}{\alpha_{досимк} + \beta_{досимк}}; \quad (5)$$

$$t_{устри}^{ож} = t_{устри}^{мин} + (t_{устри}^{макс} - t_{устри}^{мин}) \frac{\alpha_{устри}}{\alpha_{устри} + \beta_{устри}}. \quad (6)$$

Адекватность полученной регрессионной модели (3) проверена с помощью критерия, основанного на коэффициенте детерминированности  $R^2$ . Полученное значение  $R^2 = 0,94$  говорит об адекватности подобранного уравнения регрессии.

Для примера оценим влияние параметров, характеризующих подсистемы СЭ ТлОб РКК, на вероятность выполнения ТехОп «Заправка расходного хранилища продуктом «099» из ж\д заправщика». Данная ТехОп входит в ТГ подготовки ракеты-носителя «Союз-2.1а» и является наиболее простой из всех операций. Она задействует только один вид технологического оборудования, в котором наиболее критичными являются два ЭЗ: предохранительная прокладка и редуктор высокого давления.

В результате имитационного моделирования этой операции была получена выборка времени ее завершения, гистограмма которых приведена на рис. 2.



Рис. 2. Гистограмма времени выполнения ТехОп

Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

№ ТлОп	Значения параметров						
	$\bar{A} \cdot 10^{-6}$	$\bar{D}_{эз}$	$\bar{Z}$	$L$	$\bar{X}$	$R$	$T_{оп}$
1	$[244,111]^T$	$[2,1]^T$	$[8760,8760]^T$	$\{\{2,24,1.5,4\}, \dots\}$	$[1,0,0]^T$	$\{1,5,2.5,4.5\}$	7,5

Используя шаги 3, 4, 5, 6 алгоритма (рис. 1) было выявлено, что выборка времени выполнения ТехОп подчиняется четырехпараметрическому закону бета-распределения с параметрами:  $t_{оп}^{мин} = 6.5$  ч,  $t_{оп}^{макс} = 16.64$  ч,  $\alpha_{оп} = 1$ ,  $\beta_{оп} = 21$ .

На шаге 7 (рис. 1) с помощью многофакторного регрессионного анализа получено аналитическое выражение зависимости  $P_{то}$  параметров СЭ ТлОб РКК, вид которого представлен выражением (6):

$$P_{то} = 1 - 0,0499(1 - r_{111})t_{дос111}^{ож} - 0,0362(1 - r_{112})t_{дос112}^{ож} - 0,0143t_{устр1} - 0,000004\tau_1; \quad (6)$$

$$r_{111} = 0,5488 + 0,4713d_{111} - 0,164d_{111}^2 + 0,0186d_{111}^3; \quad (7)$$

$$r_{112} = 0,7189 + 0,3557d_{112} - 0,1373d_{112}^2 + 0,0165d_{112}^3. \quad (8)$$

Использование выражения (6) позволяет оценить влияние на  $P_{то}$  каждого параметра СЭ ТлОб РКК.

На рис. 3–7 представлены зависимости  $P_{то}$  от количества запасных частей 1-го ЭЗ ( $d_{111}$ ) при различных значениях других параметров.

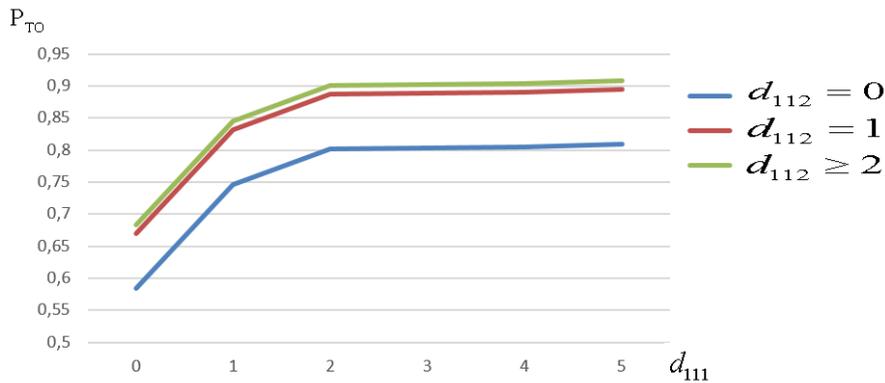


Рис. 3. Зависимость  $P_{то}$  от количества запасных частей 1-го ЭЗ ( $d_{111}$ ) при различном количестве ЗЧ 2-го ЭЗ ( $d_{112}$ )

$$\text{и } t_{дос111}^{ож} = t_{дос112}^{ож} = 10 \text{ ч, } t_{устр1}^{ож} = 5 \text{ ч, } \tau_1 = 4380 \text{ ч}$$

Из рис. 3 видно, что  $P_{то}$  наиболее чувствительна к изменению количества ЗЧ 1-го ЭЗ в интервале от 0 до 2. При значениях  $d_{111} > 2$  изменение количества ЗЧ 1-го ЭЗ практически не приводит к изменению  $P_{то}$ . При этом чувствительность  $P_{то}$  к изменению  $d_{112}$  также различна. К наибольшему изменению  $P_{то}$  приводит изменение  $d_{112}$  в интервале [0;1].

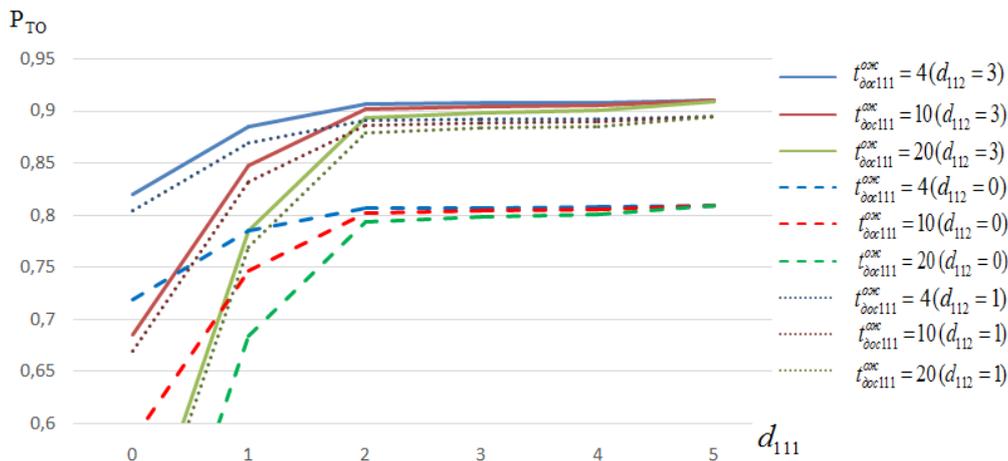


Рис. 4. Зависимость  $P_{то}$  от количества запасных частей 1-го ЭЗ ( $d_{111}$ ) при различном времени доставки ЗЧ 1-го ЭЗ ( $t_{дос111}^{ож}$ ) и количестве ЗЧ 2-го ЭЗ ( $d_{112}$ ),  $t_{дос112}^{ож} = 10$  ч,  $t_{устр1}^{ож} = 5$  ч,  $\tau_1 = 4380$  ч

$$\text{ЗЧ 2-го ЭЗ } (d_{112}), t_{дос112}^{ож} = 10 \text{ ч, } t_{устр1}^{ож} = 5 \text{ ч, } \tau_1 = 4380 \text{ ч}$$

Представленные зависимости показывают, что изменение  $d_{111}$  в интервале от 0 до 2 при различных  $t_{дос111}^{ож}$  приводит к неодинаковому изменению  $P_{то}$ . При  $d_{111} > 2$  время доставки ЗЧ 1-го ЭЗ оказывает незначительное влияние на  $P_{то}$ .

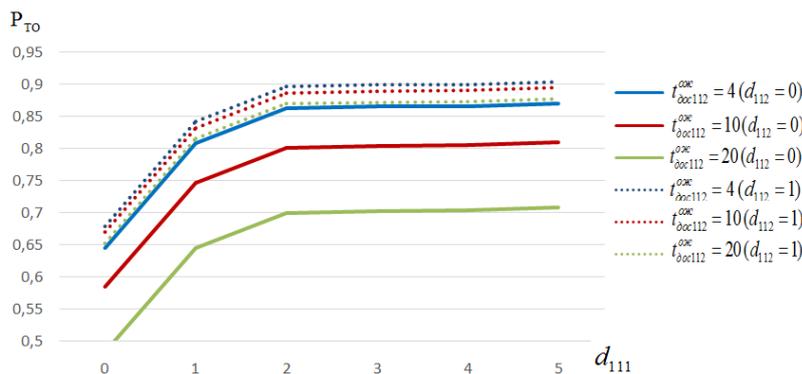


Рис. 5. Зависимость  $P_{то}$  от количества запасных частей 1-го ЭЗ ( $d_{111}$ ) при различных временах доставки ЗЧ 2-го ЭЗ ( $t_{доc112}^{ож}$ ) и количестве ЗЧ 2-го ЭЗ ( $d_{112}$ ),  $t_{доc111}^{ож} = 10$  ч,  $t_{устр1}^{ож} = 5$  ч,  $\tau_1 = 4380$  ч

Из рис. 5 видно, что время доставки ЗЧ 2-го ЭЗ ( $t_{доc112}^{ож}$ ) оказывает наибольшее влияние на  $P_{то}$  только при нулевом комплекте ЗИП 2-го ЭЗ.

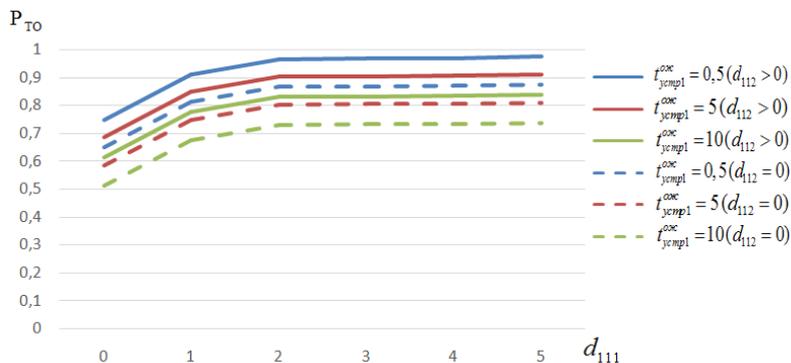


Рис. 6. Зависимость  $P_{то}$  от количества запасных частей 1-го ЭЗ ( $d_{111}$ ) при различном времени устранения неисправности ( $t_{устр1}^{ож}$ ) и количестве ЗЧ 2-го ЭЗ ( $d_{112}$ ),  $t_{доc111}^{ож} = t_{доc112}^{ож} = 10$  ч,  $\tau_1 = 4380$  ч

Рис. 6 позволяет оценить чувствительность  $P_{то}$  к изменению  $d_{111}$  при различном времени устранения неисправности и количестве ЗЧ 2-го ЭЗ.

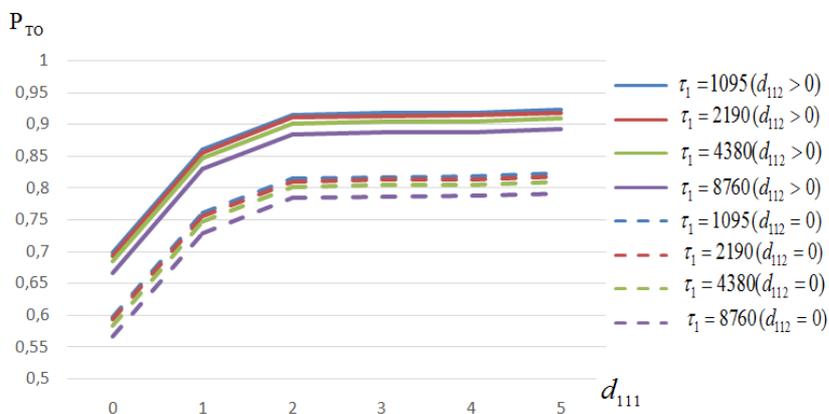


Рис. 7. Зависимость  $P_{то}$  от количества запасных частей 1-го ЭЗ ( $d_{111}$ ) при различном количестве ЗЧ 2-го ЭЗ ( $d_{112}$ ) и периоде контроля ТС ( $\tau_1$ ),  $t_{доc111}^{ож} = t_{доc112}^{ож} = 10$  ч,  $t_{устр1}^{ож} = 5$  ч

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что период контроля ТС практически не оказывает влияния на характер изменения  $P_{то}$  от  $d_{111}$ .

Аналогичные зависимости были получены и для количества ЗЧ 2-го ЭЗ ( $d_{112}$ ). При этом стоит отметить, что  $P_{то}$  в одном и том же случае в большей степени зависит от количества ЗЧ 1-го ЭЗ ( $d_{111}$ ). Это объясняется тем, что интенсивность отказа 1-го ЭЗ больше интенсивности отказа 2-го ЭЗ.

Рассмотрим какое влияние оказывает на  $P_{то}$  время устранения неисправности –  $t_{устр1}^{ож}$ . На рис. 8–11 представлены зависимости  $P_{то}$  от времени устранения неисправности при различных значениях других параметров.

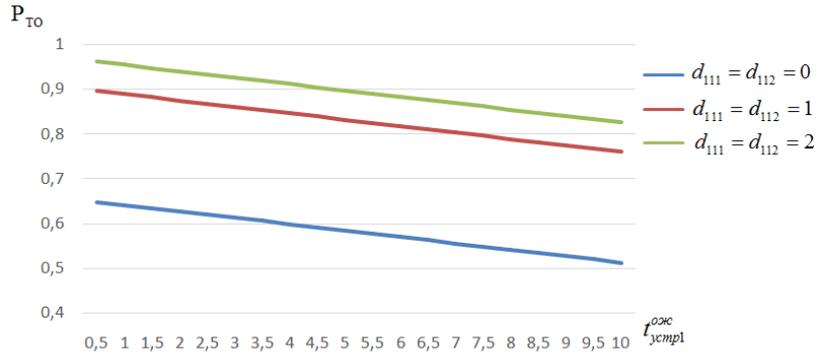


Рис. 8. Зависимость  $P_{то}$  от времени устранения неисправности ( $t_{устр1}^{ож}$ ) при различных количествах ЗЧ 1-го и 2-го ЭЗ,  $t_{дос111}^{ож} = t_{дос112}^{ож} = 10$  ч,  $\tau_1 = 4380$  ч

Рис. 8 демонстрирует линейный характер зависимости  $P_{то}$  от  $t_{устр1}^{ож}$ , но начальное значение  $P_{то}$  зависит от количества ЗЧ 1-го и 2-го ЭЗ.

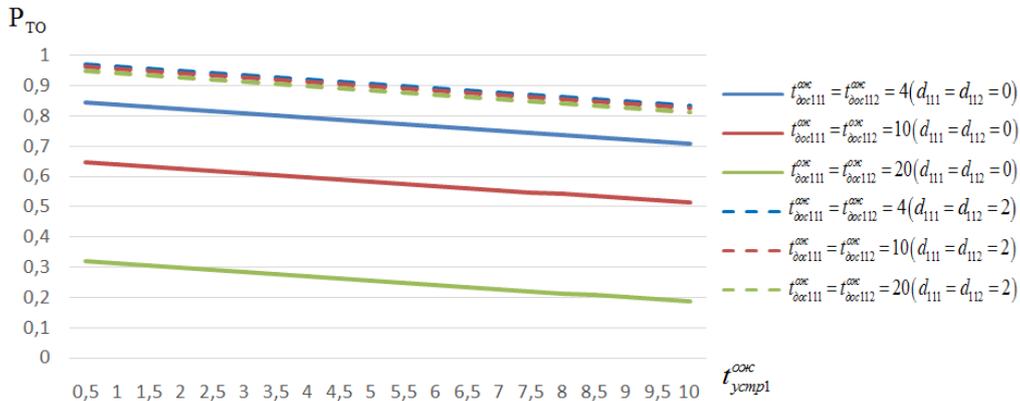


Рис. 9. Зависимость  $P_{то}$  от времени устранения неисправности ( $t_{устр1}^{ож}$ ) при различных количествах ЗЧ 1-го и 2-го ЭЗ, временах доставки ЗЧ ЭЗ и  $\tau_1 = 4380$  ч

Представленные зависимости говорят о том, что начальное значение  $P_{то}$  зависит от времен доставки 1-го и 2-го ЭЗ только в случае нулевого комплекта ЗИП обоих ЭЗ. При этом характер зависимости  $P_{то}$  от  $t_{устр1}^{ож}$  не изменяется.

Из рис. 10 видно, что период контроля ТС оказывает незначительное влияние как на начальное значение  $P_{то}$ , так и на характер изменения ее от времени устранения неисправности.

При увеличении интенсивности отказов ЭЗ возрастает влияние времени устранения неисправности на  $P_{\text{ТО}}$ .

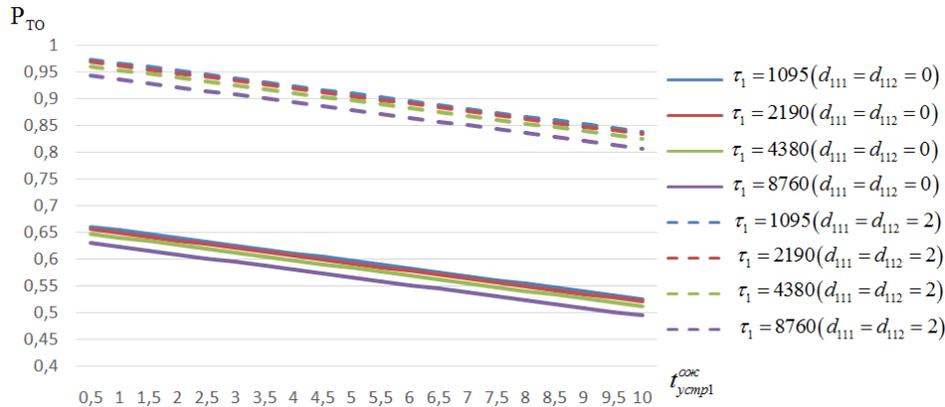


Рис. 10. Зависимость  $P_{\text{ТО}}$  от времени устранения неисправности ( $t_{\text{устр1}}^{\text{ож}}$ ) при различных количествах ЗЧ 1-го и 2-го ЭЗ, периоде контроля ТС и  $t_{\text{дос111}}^{\text{ож}} = t_{\text{дос112}}^{\text{ож}} = 10$  ч

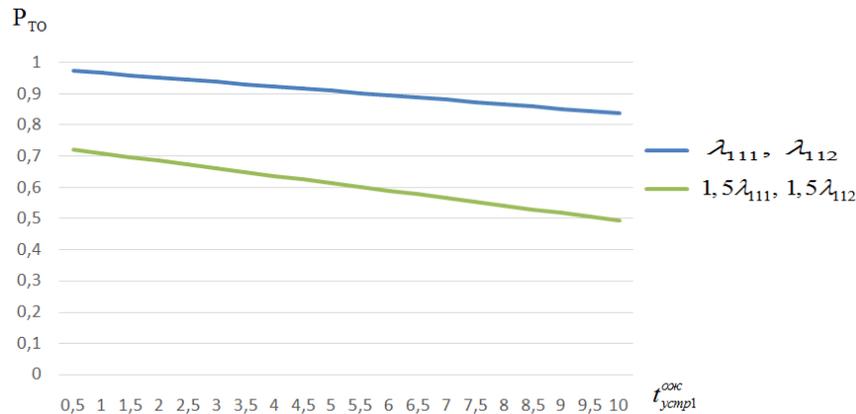


Рис. 11. Зависимость  $P_{\text{ТО}}$  от времени устранения неисправности ( $t_{\text{устр1}}^{\text{ож}}$ ) при различных интенсивностях отказов 1-го и 2-го ЭЗ,  $d_{111} = d_{112} = 2, t_{\text{дос111}}^{\text{ож}} = t_{\text{дос112}}^{\text{ож}} = 10$  ч,  $t_{\text{устр1}}^{\text{ож}} = 5$  ч,  $\tau_1 = 4380$  ч

Следующим параметром, влияющим на вероятность выполнения технологической операции за заданное время, является период контроля ТС. На рис. 12 показана зависимость  $P_{\text{ТО}}$  от периода контроля ТС –  $\tau_i$  в 4 различных случаях.

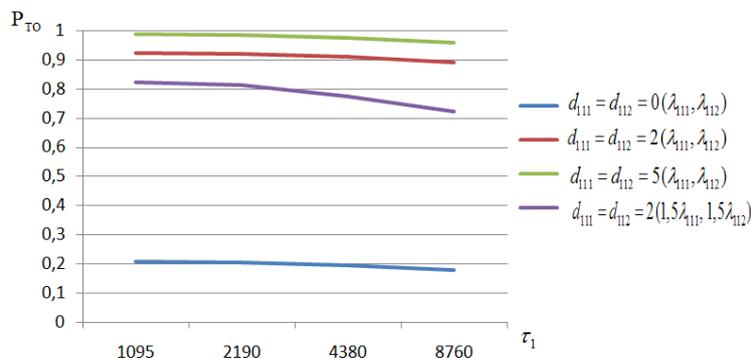


Рис. 12. Зависимость  $P_{\text{ТО}}$  от периода контроля ТС ( $\tau_i$ ) при различных количествах ЗЧ 1-го и 2-го ЭЗ, интенсивностях отказов ЭЗ и  $t_{\text{дос111}}^{\text{ож}} = t_{\text{дос112}}^{\text{ож}} = 10$  ч,  $t_{\text{устр1}}^{\text{ож}} = 5$  ч

Зависимости, представленные на рис. 12, показывают, что  $P_{ТО}$  в незначительной степени зависит от периода контроля ТС, но при увеличении интенсивности отказов ЭЗ его влияние значительно возрастает.

Рассмотрим влияние на вероятность выполнения операции за заданное время времени доставки запасных частей. На рис. 13–15 представлены зависимости  $P_{ТО}$  от времени доставки ЗЧ 1-го ЭЗ –  $t_{дос111}^{ож}$ .

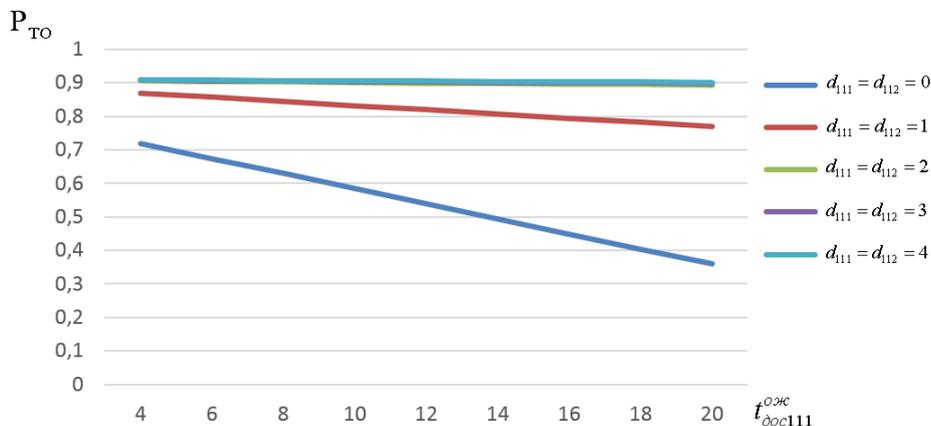


Рис. 13. Зависимость  $P_{ТО}$  от времени доставки ЗЧ 1-го ЭЗ ( $t_{дос111}^{ож}$ ) при различных количествах ЗЧ 1-го и 2-го ЭЗ,

$$t_{дос112}^{ож} = 10 \text{ ч}, t_{устр1}^{ож} = 5 \text{ ч}, \tau_1 = 4380 \text{ ч}$$

Из полученных выше зависимостей видно, что наибольшее влияние на  $P_{ТО}$  время доставки ЗЧ оказывает при малом количестве ЗЧ в комплекте ЗИП, а при большом (от 2 и более) практически сводится к минимуму.

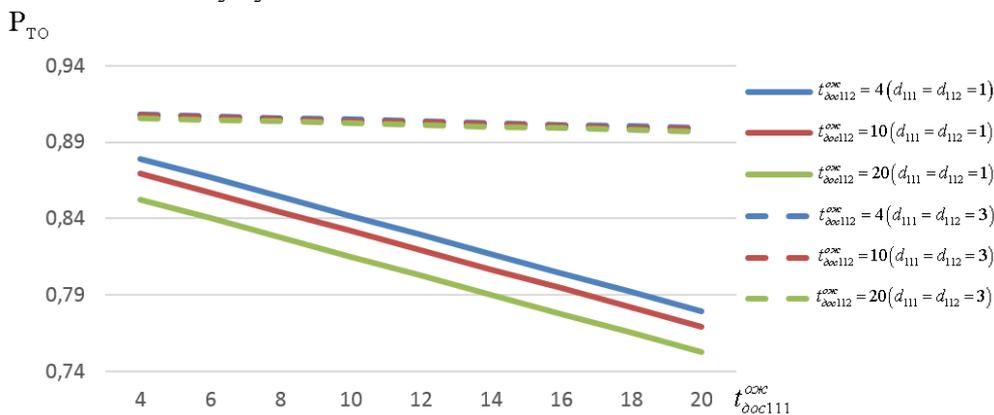


Рис. 14. Зависимость  $P_{ТО}$  от времени доставки ЗЧ 1-го ЭЗ ( $t_{дос111}^{ож}$ ) при различных количествах ЗЧ 1-го и 2-го ЭЗ,

времени доставки ЗЧ 2-го ЭЗ ( $t_{дос112}^{ож}$ ),  $t_{устр1}^{ож} = 5 \text{ ч}, \tau_1 = 4380 \text{ ч}$

Из рис. 14 видно, что начальное значение  $P_{ТО}$  зависит от времени доставки 2-го ЭЗ только при малых значениях комплекта ЗИП.

Рис. 15 показывает, что на начальное значение  $P_{ТО}$  и скорость ее изменения от времени доставки ЗЧ 1-го ЭЗ оказывает влияние количество ЗЧ в комплекте ЗИП. Кроме того, на начальное значение  $P_{ТО}$  оказывает влияние и время устранения неисправности.

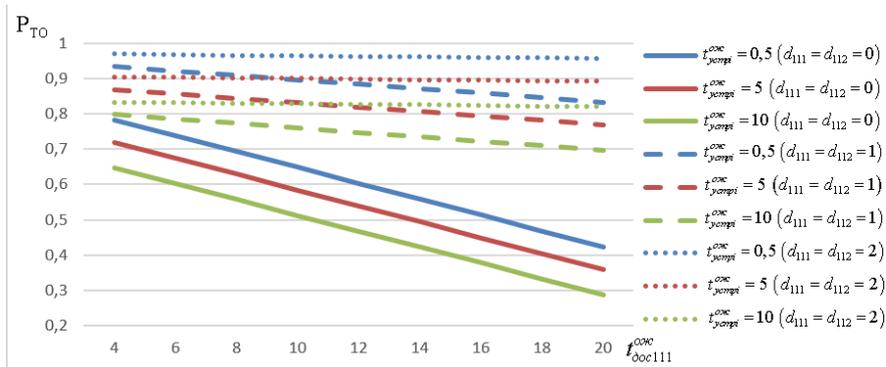


Рис. 15. Зависимость  $P_{то}$  от времени доставки ЗЧ 1-го ЭЗ ( $t_{дос111}^{оэк}$ ) при различных количествах ЗЧ 1-го и 2-го ЭЗ, временах устранения неисправности ( $t_{устр1}^{оэк}$ ),  $t_{дос112}^{оэк} = 10$  ч,  $\tau_1 = 4380$  ч

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный в статье научно-методический аппарат позволяет оценить влияние на вероятность выполнения ТехОП за заданное время наиболее значимых параметров СЭ ТлОб РКК. В качестве таких параметров были обозначенные следующие:

- количество запасных частей ЭЗ ТлОб;
- времена доставки ЗЧ ЭЗ;
- уровень обученности личного состава БР, характеризующийся временем устранения неисправности  $t_{устр}$ .
- период контроля технического состояния (ТС) ТлОб.

Была проведена оценка влияния этих параметров на  $P_{то}$  на примере ТехОп «Заправка расходного хранилища продуктом “099” из ж\д заправщика» ТГ подготовки РН «Союз-2.1а». В результате было установлено, что наибольшее влияние на  $P_{то}$  при большом количестве ЗЧ в комплекте ЗИП (от 2 и более) оказывает уровень обученности личного состава БР, выражающийся во времени устранения неисправности. При этом стоит отметить, что при малом количестве ЗЧ в комплекте ЗИП существенное значение приобретает также время доставки ЗЧ.

Кроме того, приведенный научно-методический аппарат позволяет на основе оценки влияния параметров СЭ ТлОб РКК на вероятность выполнения ТехОп за заданное время обосновать требования к необходимым значениям этих параметров.

## Список используемых источников

1. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1969. – 552 с.
2. *Вивчарь Р.М., Герасименко С.Ю., Решетников Д.В.* Анализ подходов к обеспечению требуемой вероятности подготовки и пуска РКН за заданное время // Сб. тр. XXXVII Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». – Серпухов, филиал ВА РВСН, 2018. – С. 55–59.
3. *Голенко Д.И.* Статистические методы сетевого планирования и управления. – М.: Наука, 1968. – 245 с.
4. *Сыроеждин И.М.* Математика сетевых планов. – М.: Экономика, 1967. – 321 с.
5. Технические отчеты о результатах подготовки к пуску, пуска и полета ракеты-носителя серии «Союз-2» с 1 ГИК МО РФ.

В.О. Головчинский;  
В.В. Козлов,  
*доктор технических наук, профессор;*  
А.В. Лагун,  
*кандидат технических наук, доцент*

## **КООРДИНАЦИЯ РЕСУРСОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Представлены результаты исследования по координации ресурсораспределения в структуре ракетно-космического комплекса при условии улучшения качества его жизненного цикла. Определены показатели ресурсораспределения и разработан алгоритм его расчета. В итоге представленной процедуры координации работы системы ресурсораспределения с использованием принципа оценки взаимодействия позволили показать снижение затрат на функционирование ракетно-космического комплекса.

Ключевые слова: ракетно-космические комплексы, структурный элемент, ресурсораспределение, жизненный цикл, иерархические системы, показатель, координирующие процессы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Существующие ракетно-космические комплексы (РКК) определенно представляют собой иерархические системы [1]. При этом для РКК в целом можно выделить глобальную цель, а для структурных элементов РКК существуют локальные цели. Структурный элемент РКК самостоятелен в той степени, в какой условия его функционирования не зависят от того, что происходит с другими элементами иерархической системы. Для РКК роль переменных, отражающих степень самостоятельности, играют взаимодействия между нижестоящими структурными элементами – стартовым и техническим комплексами (СК и ТК) и другими составляющими РКК. Выполнение процесса функционирования для РКК затрагивает взаимодействие между такими элементами. Здесь рассматривается один из значимых видов взаимодействия комплекса и его структурных элементов – распределение между ними располагаемыми ресурсами. В этой связи появляется задача координации взаимодействия структурных элементов РКК, находящихся на разных уровнях иерархии. Решение этой задачи целесообразно построить на принципах координации [2]. Эти принципы по существу определяют стратегии, которыми следует воспользоваться при функционировании РКК, чтобы компенсировать то обстоятельство, что подкомплексы (СК и ТК) функционируют так, как если бы они были «самостоятельными» объектами. Координируемость действий РКК относительно заданной глобальной задачи означает, что вышестоящий орган управления и в самом деле может влиять на нижестоящие структурные элементы (СК и ТК) так, чтобы их результирующее воздействие на процесс подготовки и пуска в целом давало решение глобальной задачи, т. е. восполнение орбитальной группировки.

### **ОРГАНИЗАЦИЯ ОЦЕНОЧНОГО РЕСУРСОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ РКК**

Одной из наиболее важных особенностей иерархической структуры РКК является то, что она имеет цели нескольких типов: глобальные, решаемые вышестоящими управляющими органами и решаемые нижестоящими управляющими комплексами. Следовательно, к такой системе неприменимы методы оптимизации, оперирующие одной целевой функцией. Для задачи по поиску рационального решения в таких системах необходимо дополнительное свойство – совместимость этих целей. Поскольку только нижестоящие элементы иерархической системы

РКК находятся в непосредственном контакте со всем процессом эксплуатации РКК, то решения руководителей СК и ТК должны быть координированы относительно глобальной цели.

Поскольку вышестоящие органы управления имеют свои цели, то задачи, решаемые на нижестоящем уровне, должны иметь возможность координации по отношению к задачам, решаемым вышестоящими органами управления. Ни один из подкомплексов внутри иерархии не настроен специально решать глобальную задачу и тем самым преследовать глобальную цель, хотя задача определена в терминах всего процесса.

Глобальная задача оптимизации, обозначенная здесь через  $D$ , отражает глобальную цель многоуровневой системы РКК и, как всякая задача оптимизации, определяется парой  $(g, M)$ , где  $g$  – заданная целевая функция на некотором множестве управляющих воздействий (перераспределения ресурсов). Можно принять, что  $g$  определена с помощью выходной функции процесса эксплуатации  $P$  в целом и глобальной функцией качества  $G: M \times Y \rightarrow V$ , где  $Y$  – результаты процесса  $P$ ,  $V$  – множество величин, которые могут быть связаны с характеристиками качества работы комплекса, тогда

$$g(m) = G(m, P(m)).$$

Решением глобальной задачи  $D$  в этом случае является управляющее воздействие по распределению необходимых ресурсов  $\hat{m} \in M$ ,  $m \in M$ , такое, что

$$g(\hat{m}) = \min_M g(m).$$

На любом этапе процесса координации в распределении ресурсов, иерархическая система РКК координируется так, чтобы было получено улучшение глобальных характеристик. При этом управление, имевшее место на предыдущем этапе, выступает как эталонное управление для последующего этапа либо предопределяет его. Процедура последовательной координации может быть использована в качестве итерационного метода, позволяющего повысить затратные характеристики функционирования РКК до нужного уровня в пределах его возможностей и даже достигнуть оптимума, когда внешнее возмущение (неопределенности внешних возмущений) отсутствует, и понятие оптимальности имеет смысл.

Такой подход особенно важен при формировании облика новых РКК. На этом этапе жизненного цикла РКК его руководитель должен найти решение для улучшения эталонного управления, т. е. решить задачу вышестоящего руководителя иерархии. Эта задача состоит в том, чтобы найти управление (решение по перераспределению ресурсов) более предпочтительное, чем эталонное управление. Эта задача может быть сформулирована следующим образом. Обозначим через  $\tilde{m}_i$  и  $\hat{m}_i$  эталонное управление и управление, выбранное на  $i$ -м этапе координации. Пусть  $[\tilde{m}^i, \hat{m}^i]$  – отрезок в  $M$ , содержащий две точки:

$$[\tilde{m}^i, \hat{m}^i] = \{m : m = \lambda \tilde{m}^i + (1 - \lambda) \hat{m}^i \text{ для некоторого } \lambda, 0 \leq \lambda \leq 1\}.$$

Тогда на  $i$ -м этапе координации вспомогательная задача состоит в следующем: найти действительное число  $\lambda$  из интервала  $[0, 1]$  и соответствующее управление  $m^i = \lambda \tilde{m}^i + (1 - \lambda) \hat{m}^i$ , такие, чтобы выполнялось условие

$$G(m^i, P(m^i)) = \min_{[\tilde{m}^i, \hat{m}^i]} G(m, P(m)).$$

Для решения задачи допустимо также более жесткое условие

$$G(m^i, P(m^i)) < G(\tilde{m}^i, P(\tilde{m}^i)).$$

Независимо от выбранного условия этой задачи общая процедура ее решения состоит в следующем. На очередном этапе координации руководитель РКК направляет нижележащему уровню (СК и ТК) эталонное управление  $\tilde{m}_i$  и координирующий сигнал  $\gamma$ , который определяет оценочные диапазоны для взаимодействий.

Далее каждый элемент нижележащего уровня (СК и ТК) предлагает управление (решение), которое улучшило бы значение его локальных функций качества по сравнению с эта-

лонным управлением  $\tilde{m}_i$ , при этом текущие оценочные диапазоны задаются посредством  $\gamma$ . Если координирующий сигнал  $\gamma$  (новации, вводимые в решение) является  $\tilde{m}^i$ -достаточным, то в этом случае такое управление, скажем,  $\tilde{m}^i$ , существует.

Затем руководитель РКК получает от элемента низлежащего уровня (СК и ТК) найденные ими решения  $\tilde{m}^i$ , решает свою вспомогательную задачу и выбирает таким образом управляющее воздействие  $m_i$  (по перераспределению ресурсов). Затем руководитель РКК принимает в качестве эталонного управления, которое будет использовано в следующий момент координации, управление  $\tilde{m}^{i+1} = m^i$ . Если в каждый момент времени координирования система координируема при эталонном управлении  $\tilde{m}^i$ , имеем  $m^i \succ \tilde{m}^i \succ \tilde{m}^i$ , и характеристики системы улучшаются монотонно. В рассматриваемом примере задачу координации многоуровневой иерархии РКК с достаточной общностью можно показать на двухуровневом фрагменте.

В качестве такого примера выбрана схема, показанная на рис. 1.

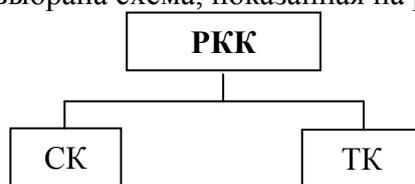


Рис. 1. Исследуемая структура РКК

Основные свойства процессов функционирования РКК и его элементов содержат группы целевых показателей, показателей ресурсопотребления, в том числе и временных показателей. Поскольку функционирование РКК и его элементов проводится в интересах достижения назначенных технических характеристик, то единственной группой показателей, которыми можно варьировать, является группа ресурсопотребления. Поэтому координацию иерархии рассматриваемой в примере РКК следует выполнять в интересах экономии этих ресурсов. Предположим, что значения показателей функционирования РКК имеют зависимость от ресурсных параметров. Исходя из этого нужно определить процессы расходования ресурсов для двух рассматриваемых подкомплексов СК и ТК как  $P_1$  и  $P_2$ .

Для рассматриваемого примера схема взаимодействия координируемых процессов показана на рис. 2.

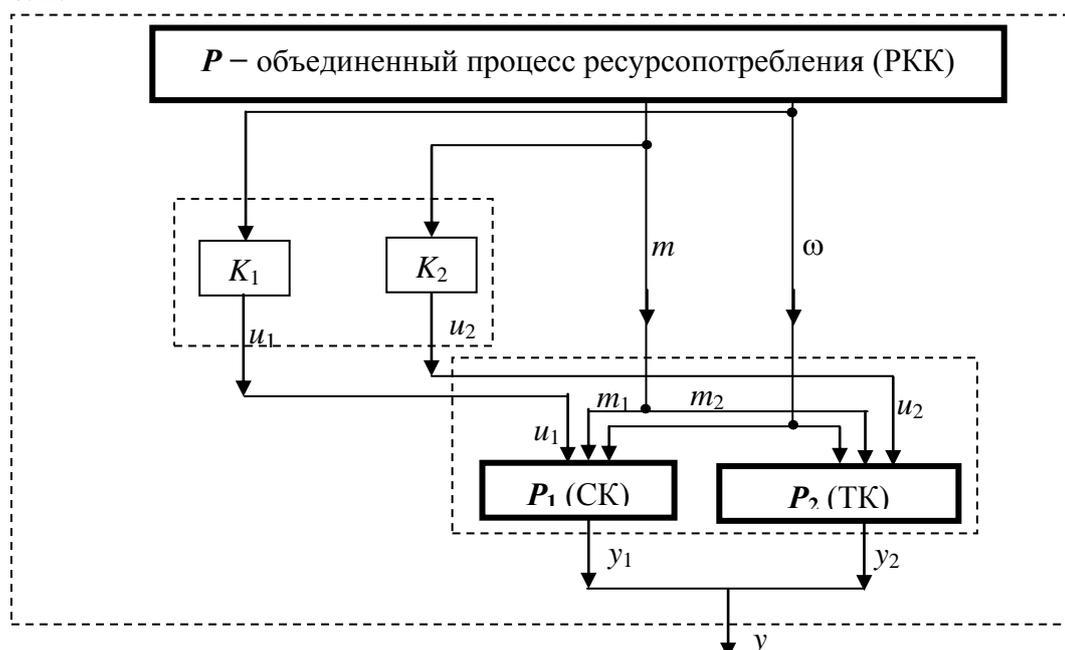


Рис. 2. Схема взаимодействия координируемых процессов

Здесь использованы следующие обозначения:  $K_i$  – функции взаимодействия процессов подготовки и пуска на  $i$ -м подкомплексе;  $\omega$  – сигналы внешнего возмущения;  $y$  – выходные сигналы или результаты процессов подготовки и пуска.

Соединение процессов подготовки и пуска ( $P_1$  и  $P_2$ ) можно представить через уравнения, связывающие входы ( $u_i$ ), а именно:

$$u_1 = m_2 + \omega \equiv K_1(m_1, m_2, \omega), \quad u_2 = m_1 + \omega \equiv K_2(m_1, m_2, \omega) \quad (1)$$

где  $\omega$  – действительные числа.

Для постановки и решения задачи координации в рамках стратегии ресурсосбережения следует определить необходимые (специфические) функции описания и оценивания процессов функционирования РКК.

Понимая под производственной функцией [3] (функцией процесса подготовки и пуска  $P$ ) зависимость между результатом работы комплексов и количествами затраченных на подготовку и проведение пусков ресурсов  $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ , можно принять  $P = P(m_1, m_2, \dots, m_n)$ , здесь и далее используются величины ресурсов в безразмерном виде. Функция  $P$  есть статистически устойчивая связь между затратами ресурсов и реализацией программы пусков. При этом следует заметить, что при определении производственной функции  $P$  физические процессы подготовки и пуска не рассматриваются. Производственная функция – это модель, которая выражает технологическую зависимость между результатами деятельности технического объекта и ресурсными затратами РКК. Параметры производственной функции могут быть определены статистически по методу наименьших квадратов для конкретного объекта.

Для рассматриваемой двухуровневой иерархической системы в качестве примера производственных функций можно принять квадратичные функции. На основании чего допустимо положить, что для процесса функционирования можно ограничиться двумя видами ресурсов ( $m_1, m_2$ ), например стоимостными и временными ресурсами. Тогда можно положить, что для СК  $P_1 = P_1(m_1, m_2) = m_1^2 + m_2$ , а для процесса функционирования ТК  $P_2 = P_2(m_1, m_2) = m_1 m_2$ , где  $m_1, m_2$  – виды ресурсов для обоих процессов. Такие функции могут быть вполне правдоподобными для иерархических систем, хотя для решения конкретной задачи следовало бы привлечь статистические данные о реальных процессах.

Далее следует ввести функцию полезности  $G$  [4] как зависимость  $G = G(m_1, m_2)$ , т. е. полезность набора используемых ресурсов. Поскольку полезность является субъективным понятием, то для функции полезности первоначально не определены: «точка отсчета», т. е. нулевой уровень полезности; «шкала», т. е. единица измерения удовлетворенности. Следовательно, любая возрастающая функция  $G$  также может выражать полезность (выгоду).

Кривая полезности  $G(m_i)$  – зависимость полезности от объема потребления ресурсов (например, стоимостных)  $m_i$  при фиксированных объемах потребления других ресурсов (например, временных).

В случае придания функции полезности необходимых свойств [4] появляется существенная проблема, которая заключается в том, что для конкретного лица, принимающего решение, функция полезности неизвестна. Единственный смысл формирования полезности состоит в том, что с его помощью ранжируются ресурсные наборы.

Значение, принимаемое функцией полезности, важно только с точки зрения ранжирования различных потребляемых наборов ресурсов; величина разности полезности двух любых потребляемых наборов ресурсов несущественна. Геометрически функция полезности представляет собой способ обозначения кривых безразличия (рис. 3).

Поскольку каждый набор, находящийся на какой-либо кривой безразличия, должен иметь одинаковую полезность, функция полезности есть такой способ приписывания различным кривым безразличия неких численных значений, при котором более высоким кривым безразличия приписываются бóльшие численные значения.

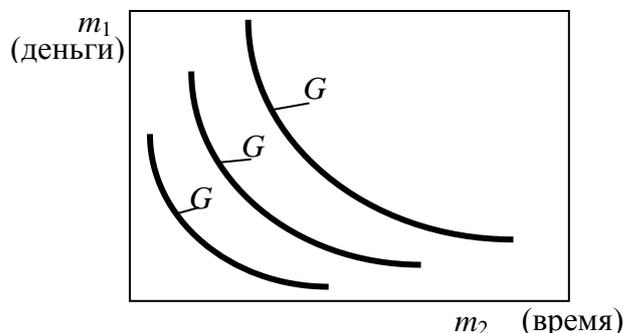


Рис. 3. Кривые безразличия

Используя кривые безразличия ( $G=\text{const}$  для наборов  $(m_1, m_2)$ ), можно построить функцию полезности путем последовательного роста значений  $G_i(m_1, m_2)$  от 1 до  $n$  при переходе от одной кривой безразличия к другой.

Если обозначить результат функционирования подкомплексов (их полезный выход) в виде  $y = P(m)$ , а  $\tilde{y}$  – как эталонный выход, то для рассматриваемой задачи  $y_1 = P_1(m_1, m_2) = m_1^2 + m_2$  и  $y_2 = P_2(m_1, m_2) = m_1 m_2$ , тогда функция полезности вполне может иметь вид

$$G(m, y) = m^T m + (y_1 - \tilde{y}_1) + (y_2 - \tilde{y}_2) \text{ или } G(m, y) = m_1^2 + m_2^2 + (m_1^2 + m_2 - \tilde{y}_1) + (m_2 m_1 - \tilde{y}_2).$$

Тогда при условиях  $\tilde{y}_1 = \tilde{y}_2 = 1$  функция полезности дает кривые безразличия, показанные на рис. 4, что соответствует случаю, когда чем больше одного ресурса, тем больше в нем потребность.

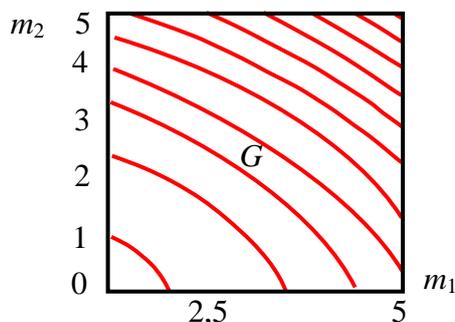


Рис. 4. Кривые безразличия для функции полезности  $\tilde{y}_1 = \tilde{y}_2 = 1$

Функция  $G = G(m_1, m_2)$ , ранее обозначенная как функция полезности, в задачах оптимизации иерархических систем имеет название оценочной функции или функции качества. Вместе с тем функция процесса  $P = P(m_1, m_2)$  в задачах оптимизации двухуровневых иерархических систем называется выходной функцией или моделью управляемого процесса. Глобальная задача оптимизации может быть определена парой  $(G, P)$  через функцию  $g(m) = G(m, P(m))$ , которая называется целевой функцией (глобальной функцией затрат ресурсов).

Тогда решением глобальной задачи оптимизации является такое управляющее воздействие (изменение значений  $m$ )  $m \in M$ , при котором выполняется условие  $g(m) = \min_M g(m)$ .

Для принятых ранее функций  $G$  и  $P$  глобальная функция затрат ресурсов может быть записана в виде

$$g(m) = G(m, P(m)) = m_1^2 + m_2^2 + (m_1^2 + m_2 - \tilde{y}_1) + (m_2 m_1 - \tilde{y}_2), \quad (2)$$

с ее использованием можно определить функции для оценки локальных функций качества двух рассматриваемых подкомплексов (СК и ТК):

$$G_{1B}(m_1, y_1, u_1, \beta_1) = m_1^2 + (y_1 - \tilde{y}_1) + \beta_1(m_1 + u_1),$$

$$G_{2B}(m_2, y_2, u_2, \beta_2) = m_2^2 + (y_2 - \tilde{y}_2) + \beta_2 m_2.$$

Здесь  $u_1 = m_2 \equiv K_1(m_1, m_2)$  и  $u_2 = m_1 \equiv K_2(m_1, m_2)$  связующие выходы иерархической структуры РКК, выраженные через функции взаимодействия подпроцессов  $K_1(m_1, m_2)$  и  $K_2(m_1, m_2)$ ;  $\beta_1, \beta_2$  – координирующие сигналы (сомножители к первоначальным значениям используемых ресурсов  $m_1$  и  $m_2$ );  $B$  – множество возможных значений  $\beta$ .

При этом частные функции затрат  $g_{iB}, i=1,2$  считаются сбалансированными с глобальной функцией затрат ресурсов  $g$  в процессе координации, если существуют два отображения [2]

$$\eta_i: M \rightarrow B_i \text{ и } h_i: M \rightarrow R,$$

такие, что

$$G_{1B}(m_i, K_i(m), \eta_i(m)) + h_i(m) = g, \quad (3)$$

где  $h_i$  – функция, указывающая затраты ресурсов, которые вынужден провести  $i$ -й руководитель  $i$ -м процессом подготовки и пуска при подаче локального управляющего воздействия  $m_i$  и фактически реализующимся на связующем входе  $u_i = K_i(m)$ .

Для аддитивной функции затрат, при сбалансированных модификациях

$$g(m) = \sum_{i=1}^n g_{iB}(m_i, K_i(m), \beta_i),$$

где  $\beta_i = \eta_i(m)$ ,  $\eta_i$  – линейризации полных операторов оценки косвенного эффекта управляющих воздействий, которые могут повлечь за собой изменения глобальных затрат через переменные, функционально связанные с рассматриваемыми локальными переменными, но относящиеся к другому подпроцессу.

Равенство (3) выполняется при условии  $h_i = \sum_{j \neq i} g_{jB}(m_j, K_j(m), \beta_j)$ .

Для рассматриваемого случая

$$G_{1B}(m_1, y_1, u_1, \beta_1) = m_1^2 + (y_1 - \tilde{y}_1) + \beta_1(m_1 + u_1) = g(m). \quad (4)$$

Равенство (4) справедливо при условиях  $\eta_1 = \beta_1 = m_2$  и  $h_1(m_1, m_2) = -\tilde{y}_2$ .

Из равенства

$$G_{2B}(m_2, y_2, u_2, \beta_2) = m_2^2 + (y_2 - \tilde{y}_2) + \beta_2 m_2 = g(m) \quad (5)$$

следует, что  $\eta_2 = \beta_1 = 1$  и  $h_2(m_1, m_2) = 2m_1^2 - \tilde{y}_1$ .

При использовании процедур последовательной координации для координирования иерархической двухуровневой системы РКК с целью монотонного улучшения глобальной функции затрат необходимо задать эталонное управление  $\tilde{m} = (\tilde{m}_1, \tilde{m}_2)$ .

Затем руководитель РКК должен установить оценочные диапазоны множества (входных) сигналов  $u_i$  и множества возможных значений  $\beta$  для руководителей СК и ТК с целью улучшения  $\tilde{m}$ . В начале этих процедур можно положить  $\tilde{y}_1 = \tilde{y}_2 = 1$ .

При исключении из соотношений (4) и (5)  $u_1$  и  $u_2$  локальные функции затрат ресурсов примут вид:

$$g_{1B}(m_1, u_1, \beta_1) = m_1^2 + (m_1^2 + u_1 - 1) + \beta_1(m_1 + u_1);$$

$$g_{2B}(m_2, u_2, \beta_2) = m_2^2 + (m_2 u_2 - 1) + \beta_2 m_2.$$

Далее руководители СК и ТК должны подобрать новые управляющие воздействия так, чтобы уменьшить в пределах оценочного диапазона свои затраты по сравнению с затратами при эталонном управлении. Для этого они должны найти такие значение  $m_i$ , которые удовлетворяли бы неравенствам:

$$g_{1B}(m_1, u_1, \beta_1) - g_{1B}(\tilde{m}_1, u_1, \beta_1) \leq 0; \tag{6}$$

$$g_{2B}(m_2, u_2, \beta_2) - g_{2B}(\tilde{m}_2, u_2, \beta_2) \leq 0. \tag{7}$$

Согласно принятым ранее условиям для руководителя СК неравенство (6) имеет вид

$$2(m_1^2 - \tilde{m}_1^2) + \beta_1(m_1 - \tilde{m}_1) \leq 0.$$

Поскольку для рассматриваемого примера  $\eta_2 = \beta_1 = 1$ , для руководителя ТК неравенство (7) принимает вид  $(m_2^2 - \tilde{m}_2^2) + (u_2 + 1)(m_2 - \tilde{m}_2) \leq 0$ .

Таким образом, в рассматриваемой задаче следует определить лишь  $\beta_1$  и  $u_2$ .

При управлении, первоначально приложенном к глобальному процессу в виде  $\tilde{m} = (0, 0)$ , значение глобальной функции затрат  $g(m_1, m_2) = m_1^2 + m_2^2 + (m_1^2 + m_2 - 1) + (m_2 m_1 - 1) = -2$ .

Для координации действий руководителей СК и ТК руководитель РКК должен назначить оценочные диапазоны, которые формируются на основе неравенств, позволяющих найти такие значения  $m_i$ , которые приведут к снижению затрат процесса подготовки и пуска в целом.

Для первого неравенства

$$2(m_1^2 - \tilde{m}_1^2) + \beta_1(m_1 - \tilde{m}_1) \leq 0$$

при начальном условии  $\tilde{m}_1 = 0$  оценочный диапазон для  $\beta_1$  должен составить

$$B_1^y = \{\beta_1 : |\beta_1 - \eta_1(\tilde{m})| \leq 1\};$$

при ранее установленном соотношении  $\eta_1(\tilde{m}) = \tilde{m}_2 = 0$  выполняется условие (рис. 5)

$$s1 = 2(m_1^2 - 0) + \beta_1(m_1 - 0) \leq 0.$$

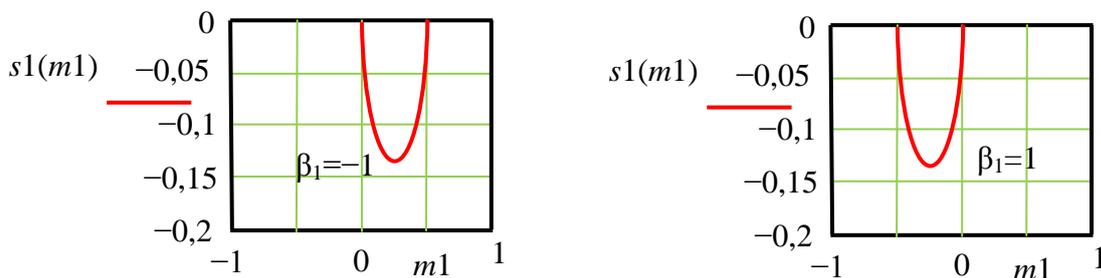


Рис. 5. Графические зависимости оценочных диапазонов первой итерации

Для второго неравенства  $(m_2^2 - \tilde{m}_2^2) + (u_2 + 1)(m_2 - \tilde{m}_2) \leq 0$  при начальном условии  $\tilde{m}_2 = 0$  оценочный диапазон для  $u_2$  при  $K_2(\tilde{m}) = u_2 = m_1 = 0$

$$U_2^y = \{u_2 : |u_2 - K_2(\tilde{m})| \leq 1\}$$

не выполняется условие (рис. 6)

$$f_1 = (m_2^2 - 0) + (u_2 + 1)(m_2 - 0) \leq 0.$$

Тогда как диапазон  $|u_2| \leq \frac{1}{2}$  удовлетворяет заданное условие (рис. 7)

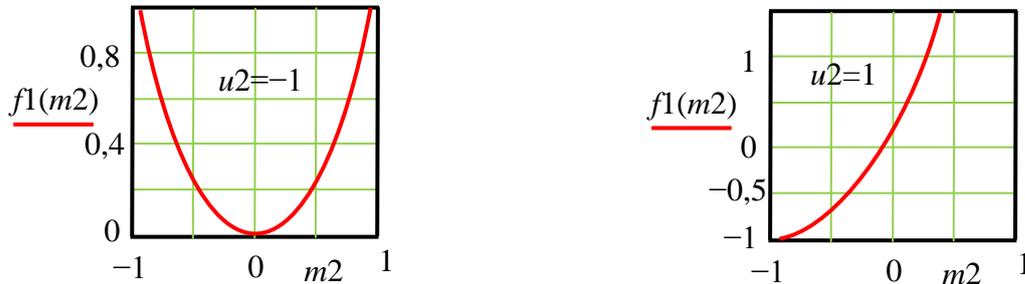


Рис. 6. Графические зависимости оценочных диапазонов для второй итерации

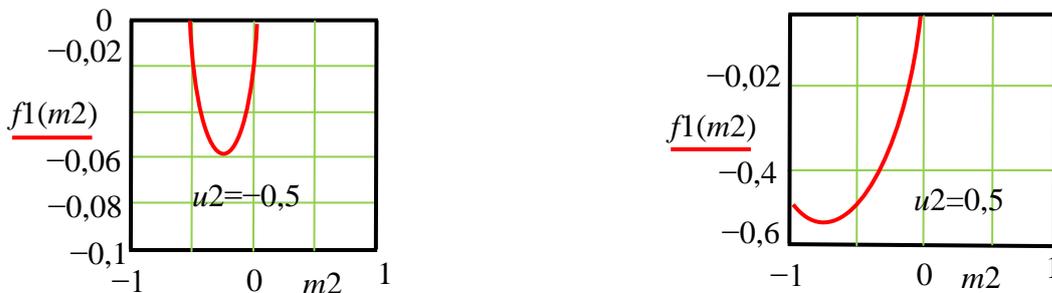


Рис. 7. Графические зависимости оценочных диапазонов для третьей итерации

Решение задачи по поиску минимума для глобальной функции затрат  $g(m_1, m_2)$ , выполненные в среде Mathcad с этими оценочными диапазонами приводит к тому, что  $\tilde{m}_1 = -1/4$ ;  $\tilde{m}_2 = -1/2$ . В результате  $g(\tilde{m}_1, \tilde{m}_2) = -2,156$ .

Дальнейшее уточнение оценочного диапазона для  $\beta_1$  приводит при условии  $\eta_1(\tilde{m}) = \tilde{m}_2 = -1/2$  к тому, что неравенство

$$s1 = 2(m_1^2 - \tilde{m}_1^2) + \beta_1(m_1 - \tilde{m}_1) \leq 0 \quad (8)$$

при задании  $V_1^y = \{\beta_1 : |\beta_1 - \eta_1(\tilde{m})| \leq 1\}$ , а также при условии  $V_1^y = \{\beta_1 : |\beta_1 - \eta_1(\tilde{m})| \leq 1/2\}$  не выполняется.

Лишь при сужении числа для оценочного диапазона  $\beta_1$  до уровня  $V_1^y = \{\beta_1 : |\beta_1 - \eta_1(\tilde{m})| \leq 1/4\} = \left[-\frac{3}{4}; -\frac{1}{4}\right]$  неравенство (8) выполняется.

Соотношение  $(m_2^2 - \tilde{m}_2^2) + (u_2 + 1)(m_2 - \tilde{m}_2) \leq 0$  при  $\tilde{m}_2 = -1/2$  позволяет сохранить ранее выбранный диапазон для  $u_2$ , т. е.

$$U_2^y = \left\{ u_2 : |u_2 - K_2(\tilde{m})| \leq \frac{1}{2} \right\}.$$

Повторное решение задачи по поиску минимума для глобальной функции затрат  $g(m_1, m_2)$  с новыми оценочными диапазонами приводит к тому, что  $\tilde{m}_1 = 1/8$ ;  $\tilde{m}_2 = -1/2$ , а функция  $g(\tilde{m}_1, \tilde{m}_2) = -2,281$  (рис. 8).

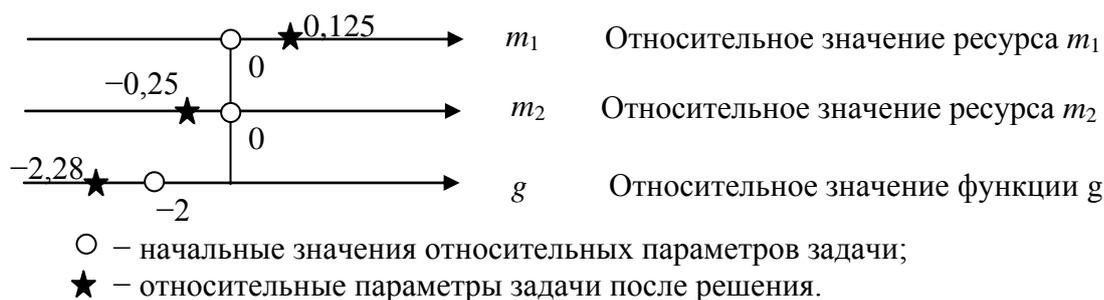


Рис. 8. Схема решения задачи по поиску минимума для глобальной функции затрат

При этом координирующие сигналы имеют следующие значения:  $\beta_1 = -0,25$ ;  $\beta_2 = 1$ . Дальнейшие итерации не приводят к изменению значения минимума глобальной функции затрат  $g(\tilde{m}_1, \tilde{m}_2)$ .

**Вывод.** Таким образом, процедуры последовательной координации работы двухуровневой иерархической системы с использованием принципа оценки взаимодействия позволяют для рассматриваемого примера снизить глобальные затраты на 14,05%.

#### Список используемых источников

1. Козлов В.В., Аверкиев Н.Ф., Мокан Д.О. Иерархическая структура показателей сложной технической системы в интересах обеспечения национальной безопасности // Материалы Междунар. научно-исслед. конф. «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах». – СПб., 2012. – Т. 5: Стратегия будущего. – С. 251–254.
2. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 311 с.
3. Гераськин М.И.. Математическая экономика. Теория производства и потребительского выбора: учеб. пособие. – Самара: СГАУ им. академика С.П. Королёва, 2004. – 102 с.
4. Гришанов Г.М., Гераськин М.И. Математические основы экономической теории производства: учеб. пособие. – Самара: СГАУ им. академика С.П. Королёва, 2001. – 124 с.

П.С. Гончаров,

*кандидат техн. наук, доцент;*

Ю.В. Кулешов,

*доктор техн. наук, профессор;*

В.В. Мартынов;

О.Ю. Цыбин,

*доктор физико-математических наук, профессор*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

Н.А. Шуневич,

*кандидат техн. наук*

## ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведен анализ вакуумных процессов и режимов, технических средств и технологий, а также способов преодоления некоторых ограничений в достижении требуемых параметров вакуумной установки для огневых испытаний электрических ракетных двигателей.

Ключевые слова: вакуумная система, испытания, электрический ракетный двигатель.

Современные электрические ракетные двигатели (ЭРД) являются вакуумными приборами, достоинства которых доказаны при их работе в космических условиях. Кроме хорошей экономичности и высоких энергетических показателей, такие ЭРД обладают ресурсом работы в течение тысяч и десятков тысяч часов. Технология ЭРД прошла несколько этапов развития, и в последние десятилетия ее востребованность быстро нарастает. Используемая современная технология ЭРД принадлежит к четвертому поколению, и требуется переход к новому, пятому поколению. Предполагается, что в 2020 году около половины запускаемых спутников будет оснащено ЭРД.

Принципиальные возможности для эффективной реализации ЭРД обеспечиваются после выхода аппарата в космический вакуум. При достижении достаточной высоты над Землей действие гравитации и аэродинамического сопротивления движению космического аппарата становятся пренебрежимо малыми, что позволяет раскрыть панели солнечных батарей и получить достаточную скорость полета при малой тяге, производимой ЭРД. Вакуумные условия в двигателе обеспечиваются за счет его открытости в космическое пространство. Длина пробега ионов между столкновениями с остаточными газами в двигателе в космическом вакууме становится достаточно велика, что позволяет осуществить его включение в рабочий цикл с ускорением ионов.

Типичные ЭРД представляют собой электронно-механические устройства с преимущественным электрическим взаимодействием с ионизованным рабочим телом (РТ), в результате чего электромагнитная энергия преобразуется в механическую. Для создания механического импульса реактивного движения в ЭРД используют преобразованное в ионизованную парогазовую фазу ускоренное электрической энергией РТ, выбрасываемое в нейтрализованном виде в космическое пространство.

Основным способом достижения приемлемой реактивной тяги является увеличение массы вещества, ускоренного в реактивный факел, истекающий из двигателя. В известных реактивных ЭРД осуществляют ионизацию и ускоренное движение заряженных частиц, получаемых из сжатых газов ( $N_2$ , Ar, Xe, Kr и т. д.). В основном используется ксенон. При использовании Xe достигнута скорость малых аппаратов до 70 м/с. Кроме того, в качестве РТ в ЭРД, преимущественно в лабораторных «предполетных» моделях, используют жидкие металлы: цезий, ртуть, висмут, цинк, магний, галлий, а также коллоидные растворы органических веществ. Считается, что значительные перспективы в качестве запасаемого расходного мате-

риала могут иметь испаряемые твердые вещества, например, йод. Широкий перечень материалов РТ относится в основном к апробациям в лабораторных установках. Задача замены ксенона и выбора альтернативного РТ для практического использования остается актуальной. Выбор альтернативного РТ требует разработки соответствующей конструкции ЭРД, для чего требуется большой объем экспериментальных исследований. Наземные огневые испытания приборов в процессе их разработки осуществляются в вакуумных установках большого объема с высокой скоростью откачки.

К классу таких установок относятся вакуумные установки ВУ-М и ВУ-Б, входящие в вакуумную систему ВС-1 в ВКА имени А.Ф. Можайского.

В состав вакуумной системы ВС-1 входят:

- вакуумная установка ВУ-М (объем входящей в установку вакуумной камеры ВК-М  $2,4 \text{ м}^3$ );
- вакуумная установка ВУ-Б (объем входящей в установку вакуумной камеры ВК-Б  $22 \text{ м}^3$ );
- централизованная форвакуумная система (ЦФС), состоящая из механических насосов, системы трубопроводов с запорными вентилями и затворами и манометрических преобразователей контроля вакуума;
- контрольно-измерительная аппаратура.

Тактико-технические характеристики вакуумной установки ВУ-М:

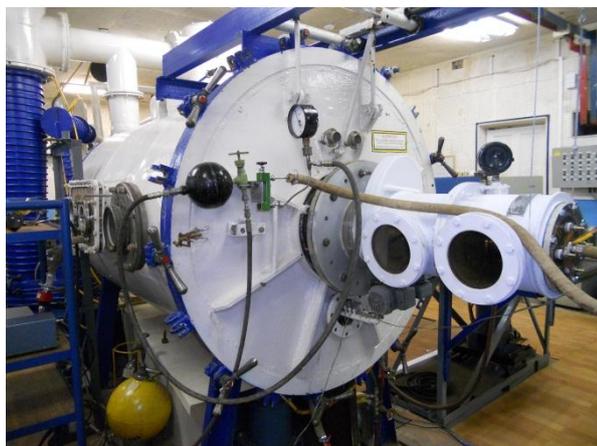
- рабочее давление в вакуумной камере ВК-М без напуска рабочего тела:  $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$  ( $10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ );
- рабочее давление в вакуумной камере ВК-М при напуске рабочего тела:  $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  ( $10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ );
- время обеспечения давления ниже  $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  ( $10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ ): не более 4 ч.

В состав вакуумной установки ВУ-М входят:

- вакуумная камера ВК-М;
- два паромасляных бустерных насоса НВБМ-5;
- паромасляный диффузионный насос НВДМ-400;
- турбомолекулярный насос ТМН-500;
- система трубопроводов с запорными вентилями и затворами;
- манометрические преобразователи контроля вакуума.

Высоковакуумные насосы подключены к вакуумной камере ВК-М параллельно.

Внешний вид вакуумной камеры ВК-М и централизованной форвакуумной системы представлены на рис. 1. На рис. 2 показана схема вакуумной установки ВУ-М.



а)



б)

Рис. 1. Основные элементы вакуумной системы ВС-1:

а – вакуумная камера ВК-М;

б – централизованная форвакуумная

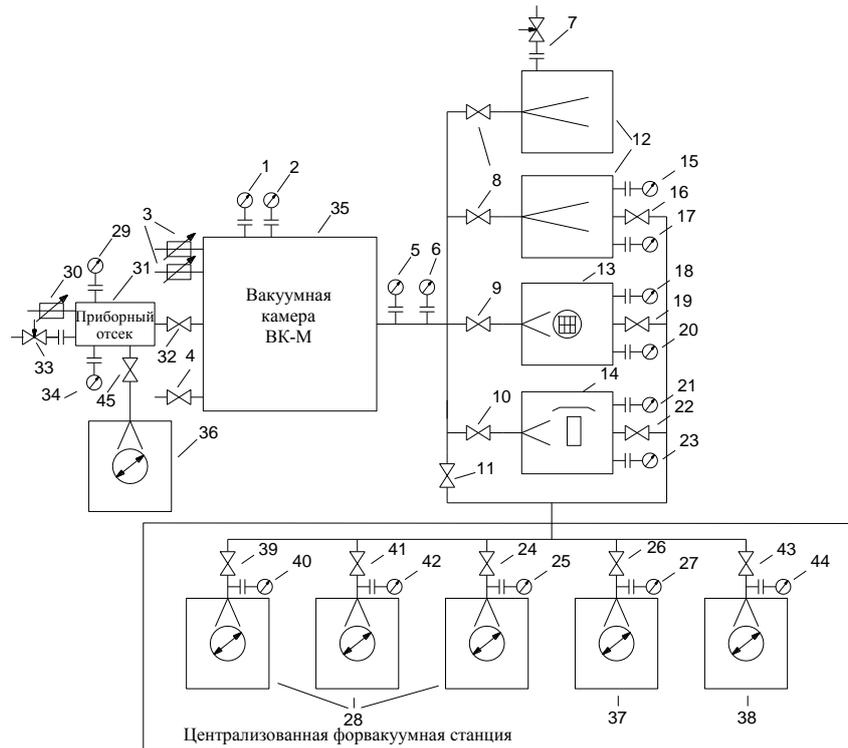


Рис. 2. Схема вакуумной установки ВУ-М:

1, 5, 15, 18, 21, 25, 27, 29, 40, 42, 44 – терморные манометрические преобразователи (типа ПМТ-2); 2, 6, 17, 20, 23, 34 – ионизационные манометрические преобразователи (типа ПМИ-2); 3, 30 – электрические вводы; 7, 33 – натекатели; 4, 8, 9, 10, 11, 16, 19, 22, 24, 26, 32, 39, 41, 43, 45 – клапаны; 12 – высоковакуумные паромасляные бустерные насосы НВБМ-5; 13 – высоковакуумный турбомолекулярный насос ТМН-500; 14 – высоковакуумный паромасляный диффузионный насос НВДМ-400; 28 – форвакуумные насосы с масляным уплотнением ВН-6Г; 31 – приборный отсек; 35 – вакуумная камера ВК-М; 36 – форвакуумный насос с масляным уплотнением ВН-461М; 37 – форвакуумный насос с масляным уплотнением ВН-6Гм; 38 – форвакуумный насос с масляным уплотнением ВН-7

Проведение экспериментов с использованием вакуумной установки ВУ-М, в состав которой входит вакуумная камера ВК-М объемом 2,4 м<sup>3</sup>, требует больших затрат, связанных со значительным потреблением материальных, энергетических ресурсов и рабочего времени эксплуатирующего персонала. Достижение соответствующего уровня вакуума в камере ВК-М обеспечивается многочасовой работой высоковакуумных насосов и ЦФС.

При этом каждый эксперимент, связанный со сменой размещенного в камере объекта испытаний, или проведение каких-либо замеров, регулировок, обычно требует разгерметизации вакуумной камеры. Очередной эксперимент вновь потребует выполнения ресурсоемкого подготовительного этапа.

Для сокращения затрат на проведение испытаний вакуумная камера ВК-М оснащена приборным отсеком, отделяемым на время доступа к размещенному в нем испытуемому объекту вакуумным затвором. Такое техническое решение позволяет осуществлять доступ к объекту при разгерметизации только приборного отсека. При этом в вакуумной камере ВК-М сохраняется разрежение, и продолжается дальнейшая ее откачка. Кроме того, камера может находиться в таком состоянии и использоваться в последующие рабочие дни. Общий вид приборного отсека представлен на рис. 3.

Приборный отсек представляет собой прочную металлическую конструкцию в форме цилиндра с герметичным внутренним объемом около 30-ти литров. К вакуумной камере он крепится с помощью алюминиевого фланца. Между фланцем и цилиндрическим корпусом

установлен вакуумный затвор. Внутри корпуса имеется консоль для крепления объектов испытаний и измерительных датчиков. Для визуального контроля протекающих при испытаниях процессов приборный отсек оснащен двумя боковыми иллюминаторами, выполненными из прозрачного материала. Тылный иллюминатор используется для крепления образцов ЭРД, установки клемм электропитания и штуцера подачи рабочего тела.

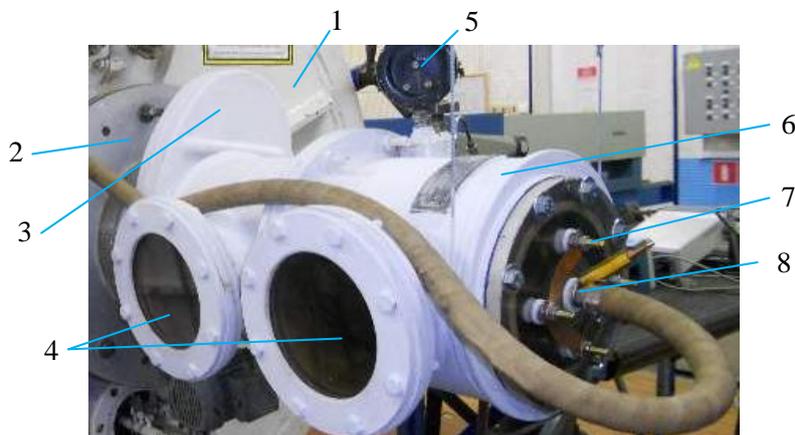


Рис. 3. Приборный отсек вакуумной камеры ВК-М:

- 1 – вакуумная камера ВК-М; 2 – алюминиевый фланец; 3 – вакуумный затвор;  
4 – иллюминаторы; 5 – вакуумметр; 6 – цилиндрический корпус;  
7 – клемма электропитания; 8 – штуцер подачи рабочего газа

Напротив первого иллюминатора в приборном отсеке установлена оснастка для оценивания силы тяги двигателя. Измерение силы тяги осуществляется по принципу баллистического маятника.

Вакуумная установка при испытаниях должна обеспечить требуемое остаточное давление в вакуумной камере при подаче рабочего тела в ЭРД.

Требование по остаточному давлению формируют из условия, чтобы средний свободный пробег частиц в остаточном газе ( $L$ ) значительно превышал расстояние между электродами ЭРД ( $L_{эл}$ ). Это сводит к минимизации соударений ионов с атомами остаточного газа, ионизацию последних и попадание вновь образовавшихся вторичных ионов и электронов на детали ускорителя [1].

Будем считать, что средний свободный пробег частиц в остаточном газе ( $L$ ) значительно превышает расстояние между электродами ЭРД ( $L_{эл}$ ) при 25-кратном превышении, т. е.

$$\frac{L}{L_{эл}} > 25, \quad (1)$$

Средний свободный пробег определяется из следующего соотношения [2]:

$$L = \frac{kT^2}{\sqrt{2} p \pi d_M^2 (T + C)}, \quad (2)$$

где  $C$  – постоянная Сезерленда;

$d_M$  – диаметр молекулы;

$p$  – давление газа;

$T$  – температура газа;

$k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Для учета взаимодействия молекул газа между собой (взаимного притяжения) вводят понятие эффективного диаметра молекулы  $d_T$ :

$$d_T^2 = d_M^2 \left( 1 + \frac{C}{T} \right). \quad (3)$$

Для воздуха  $C = 112$  К, при  $T = 293$  К  $d_T = 3,68 \cdot 10^{-10}$  и при давлении 1 Па  $L_1 = 6,7 \cdot 10^{-3}$  м·Па.

При произвольном давлении

$$L = \frac{L_1}{p} = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{p} \quad (4)$$

где  $p$  – в Па,  $L$  – в м.

В соответствии с таблицей и соотношением (2) средние длины свободных пробегов для воздуха при разных остаточных давлениях в вакуумной камере представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Средние длины свободных пробегов для воздуха при разных остаточных давлениях**

Откачиваемый газ	Установившееся остаточное давление в ВК-М, $10^{-4}$ мм рт.ст.	Средняя длина свободного пробега, см
воздух	1	50,4
	2	25,2
	3	16,8

Результаты анализа табл. 1 с учетом условия (1) позволяют установить соотношение между требуемым остаточным давлением и расстоянием между электродами ЭРД:

$$p_{\text{раб}} < \frac{2,68 \cdot 10^{-4}}{L_{\text{эл}}}, \quad (5)$$

где  $p_{\text{раб}}$  – рабочее давление в вакуумной камере, Па;

$L_{\text{эл}}$  – межэлектродное расстояние, м.

Условие (1) можно выполнить при соответствии производительности вакуумных насосов количеству подаваемого в камеру рабочего тела. Входящие в состав вакуумной установки ВУ-М высоковакуумные насосы могут обеспечить общую производительность около 18 м<sup>3</sup>/с. Эффективная быстрота откачки вакуумной установки ВУ-М определяется из соотношения [3]

$$S_{\text{эф}} = \frac{S_{\text{н}}}{\nu}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{эф}}$  – эффективная быстрота откачки насоса;

$S_{\text{н}}$  – номинальная быстрота действия насоса;

$\nu$  – коэффициент использования насоса ( $\nu = 2$  для высоковакуумных насосов и  $\nu = 1,1-1,25$  для механических вакуумных насосов),

и составляет  $S_{\text{эф}} = 9$  м<sup>3</sup>/с.

При этом откачка вакуумной камеры ВК-М может осуществляться различным сочетанием работающих насосов. Основные характеристики насосов представлены в табл. 2. Характеристики насосов, входящих в ЦФС представлены в табл. 3.

Таблица 2

**Основные характеристики высоковакуумных насосов**

Характеристика	НВБМ-5	НВДМ-400	ТМН-500
Предельное остаточное давление, Па	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$6,65 \cdot 10^{-7}$
Наибольшее выпускное давление, Па	200	33,3	2,66
Быстрота действия, м <sup>3</sup> /с	6 (в диапазоне рабочих давлений от $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па до 1,33 Па)	5,9 (в диапазоне рабочих давлений от $6,6 \cdot 10^{-4}$ до $8,0 \cdot 10^{-1}$ Па)	0,5 (в диапазоне рабочих давлений от $1,33 \cdot 10^{-3}$ до $6,65 \cdot 10^{-6}$ Па)

Таблица 3

## Основные характеристики форвакуумных насосов ЦФС

Характеристика	ВН-6Г	ВН-6Гм	ВН-7
Предельное остаточное давление, Па	1,33	1,33	0,67
Наибольшее выпускное давление, Па	$10^5$	$10^5$	$10^5$
Быстрота действия, $\text{м}^3/\text{с}$	0,155	0,155	0,059

В общем случае газовый поток рабочего тела, который может быть откачан из вакуумной камеры для поддержания требуемого рабочего давления, определяется из уравнения [2]

$$Q_{\text{РТ}} = p_{\text{раб}} \cdot S_{\text{эф}} \quad (7)$$

С учетом (4) уравнение (5) преобразуется к следующему неравенству:

$$Q_{\text{РТ}} < 2,68 \cdot 10^{-4} \frac{S_{\text{эф}}}{L_{\text{эл}}}, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{РТ}}$  – в  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ ,  $S_{\text{эф}}$  – в  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $L_{\text{эл}}$  – в м.

Пересчет газового потока, выраженного в  $[\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}]$ , в массовый расход производится по формуле [3]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{Q_{\text{РТ}} \cdot M_{\text{РТ}}}{R \cdot T_{\text{РТ}}}, \quad (9)$$

где  $M_{\text{РТ}}$  – молярная масса рабочего тела, кг/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/К·моль<sup>-1</sup>;

$T_{\text{РТ}}$  – температура рабочего тела, К.

Измерение и регулирование массового расхода рабочего тела, подаваемого в вакуумную камеру ВК-М, осуществляется при помощи ротаметра с местными показаниями РС-3А.

Данный тип ротаметров предназначен для измерения объемного расхода плавноменяющихся однородных потоков воздуха и газов. Характеристики ротаметра приведены в табл. 4.

Таблица 4

## Технические характеристики ротаметра

Характеристика	Значение
Верхний предел измерения по воздуху, $\text{м}^3/\text{ч}$	0,06
Нижний предел измерения	не более 20% от верхнего фактического предела измерения
Диаметр условного прохода, мм	3
Погрешность измерения, %	$\pm 4,0$ от верхнего предела измерения

Поскольку ротаметр градуирован по воздуху, то при использовании ротаметра для измерения расходов газов производится пересчет градуировочной характеристики ротаметра по формуле:

$$Q_{\text{РТ}} = Q_{\text{в.гр}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{в.гр}}}{\rho_{\text{РТ}}}}, \quad (10)$$

где  $Q_{\text{в.гр}}$  – расход воздуха при градуировке,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$\rho_{\text{в.гр}}$  – плотность измеряемого воздуха при градуировке,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho_{\text{РТ}}$  – плотность измеряемого газа (рабочего тела) при напуске в вакуумную камеру,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Массовый расход рабочего тела определяется из соотношения

$$m_{\text{РТ}} = Q_{\text{РТ}} \rho_{\text{РТ}} = Q_{\text{в.гр}} \sqrt{\rho_{\text{в.гр}} \rho_{\text{РТ}}} \quad (11)$$

Для определения возможностей используемого типа ротаметра для подачи рабочего тела в вакуумную камеру ВК-М были проведены экспериментальные исследования. При этом исследования были выполнены для рабочих тел с малыми (4 г/моль), средними (25–40 г/моль) и большими молекулярными массами (120–160 г/моль).

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 5. В табл. 6 представлены типовые значения массовых расходов рабочего тела существующих и разрабатываемых ЭРД.

Таблица 5

#### Результаты экспериментальных исследований

Размер молекул рабочего тела	Массовый расход подаваемого в камеру РТ, мг/с
малый	1–9
средний	1–25
большой	3–30

Таблица 6

#### Типовые значения массовых расходов рабочего тела ЭРД

Мощность ЭРД	Первичный источник энергии системы электроснабжения	Массовый расход РТ, мг/с
До 500 Вт	Солнечные батареи	0,5–5 мг/с
500–5000 Вт	Солнечные батареи	5–15 мг/с
Свыше 5000 Вт	Солнечные батареи / ядерная энергетическая установка	15–110 мг/с

Соотношения (6) и (7) позволяют вычислить максимальные газовые потоки и максимальные массовые расходы рабочего тела подаваемого в вакуумную камеру в зависимости от рабочего тела и межэлектродного расстояния ЭРД для обеспечения выполнения условия (1). Результаты расчета для вакуумной установки ВУ-М представлены в табл. 7.

Следует отметить, что максимальный газовый поток, подаваемый в вакуумную камеру, не зависит от рабочего тела.

Анализ результатов теоретико-экспериментальных расчетов, представленных в табл. 5–7, показывает, что вакуумная установка ВК-М способна обеспечить проведение огневых испытаний ЭРД мощностью до 5кВт на основе рабочих тел со средними и большими молекулярными массами.

Таблица 7

#### Максимальные газовые потоки и массовые расходы

Размер молекул рабочего тела	Межэлектродное расстояние, м	Макс. газовый поток $Q_{\text{РТ}}$ , м <sup>3</sup> ·Па/с	Температура РТ, К	Макс. массовый расход, мг/с
малый	0,005	0,482	293	0,79
				0,4
				0,26
средний	0,01	0,241	293	6,54
	0,015	0,161		3,27
				2,18
большой				25,95
				12,98
				8,65

Помимо теоретико-экспериментальных расчетов авторским коллективом Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого на вакуумной установке ВУ-М были успешно выполнены экспериментальные исследования по отработке новой технологии ионизации рабочего тела для ЭРД нового поколения. Результаты успешных испытаний подтверждены актом испытаний от 13.12.2018 года. Акт подписан представителями ВКА имени А.Ф. Можайского, СПбПУ Петра Великого и ФГУП «КБ «Факел». На рис. 4 показан процесс ионизации воздуха по новой технологии.



*Рис. 4. Процесс ионизации воздуха на вакуумной установке ВУ-М по новой технологии*

Таким образом, выполненные теоретико-экспериментальные расчеты и экспериментальные исследования показали, что вакуумная установка ВУ-М позволяет обеспечить требуемое остаточное давление для выполнения огневых испытаний ЭРД на рабочих телах со средними и большими молярными массами при массовых расходах рабочих тел в диапазоне 1–30 мг/с, что соответствует задачам испытаний двигателей нового поколения.

#### **Список используемых источников**

1. Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янтовский Е.И. Основы теории космических электро-реактивных двигательных установок. – М.: Высш. школа, 1978. – 384 с.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высш. школа, 1990. – 320 с.
3. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. – М.: Энергия, 1979. – 504 с.

П.С. Гончаров,

*кандидат техн. наук, доцент;*

В.В. Мартынов;

М.М. Пеньков,

*доктор техн. наук, профессор;*

В.М. Скутницкий,

*кандидат техн. наук, доцент;*

О.Ю. Цыбин,

*доктор физико-математических наук, профессор*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

Н.А. Шуневич,

*кандидат техн. наук*

## ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для экспериментальных испытаний и разработки перспективного электрического ракетного двигателя потребовалось создание специализированного высоковольтного источника питания. На основе анализа предъявляемых требований и существующих аналогичных технических решений разработана принципиальная электрическая схема, определена элементная база и реализован импульсный источник питания. С помощью созданного источника проведены испытания устройства для ионизации рабочего тела по новой технологии. Эксперименты показали правильность принятого схемного решения и надежную работу импульсного источника питания.

Ключевые слова: эксперимент, ионный электрический ракетный двигатель, источник питания, высоковольтные импульсы, ионизация, электрическая схема, задающий генератор.

В настоящее время одним из перспективных направлений развития ракетно-космической техники является разработка электрических ракетных двигателей (ЭРД). Кроме хорошей экономичности и высоких энергетических показателей, ЭРД обладают ресурсом работы в течение тысяч и десятков тысяч часов. Технология ЭРД прошла несколько этапов развития и в последние десятилетия ее востребованность быстро нарастает.

Электрические ракетные двигатели в составе космического аппарата (КА) позволяют обеспечить решение следующих задач:

- освоения дальнего космоса;
- доставки грузов к Луне;
- изменения и корректировки орбит космических аппаратов (КА);
- высокоточного управления КА на орбите.

Наибольшее применение благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам нашли ионные и «холловские» ЭРД, работающие на ксеноне. Данные устройства обладают рядом существенных недостатков:

- ксенон – это дорогой редкий ресурс, определяющий высокую стоимость наземной подготовки и полетной эксплуатации, ограничивающий требуемое увеличение количества космических аппаратов;
- потребность нейтрализаторов ионов, в том числе термоэмиссионных катодов с подогревателями и дополнительных блоков питания, снижает надежность и время жизни аппарата, увеличивает массу и габариты, что повышает стоимость запуска.

Перспективными направлениями развития и совершенствования ЭРД в настоящее время являются:

- замена дорогостоящего ксенона на более дешевые и эффективные рабочие тела;
- применение новых способов ионизации, которые позволят отказаться от части сложного оборудования, повысить надежность и снизить массово-габаритные характеристики;

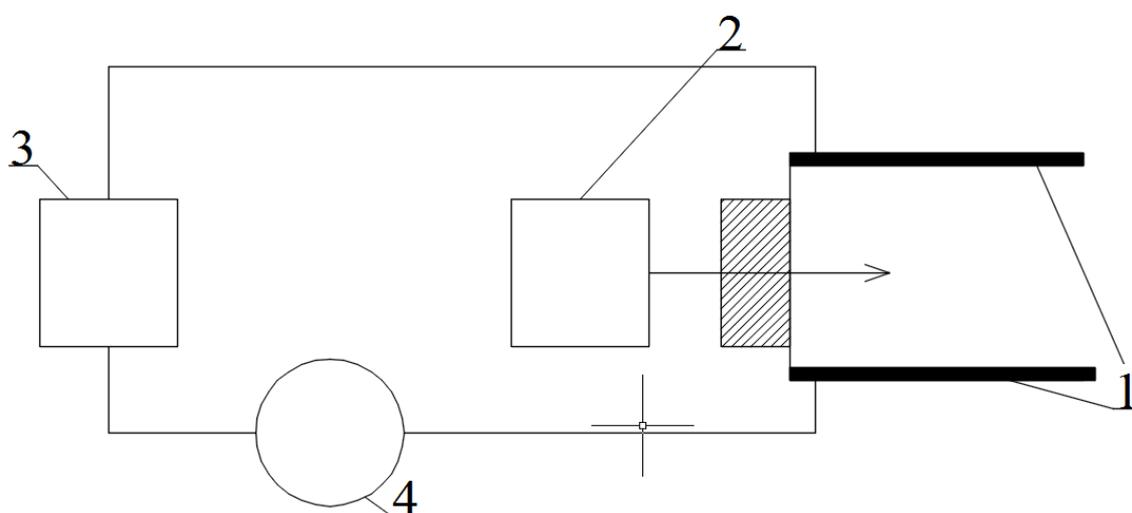
– разработка импульсных ЭРД.

Импульсные ЭРД обладают рядом важных преимуществ, к которым относятся:

- быстрая подготовка к работе;
- предельно малая инерционность;
- практически полное отсутствие импульса последействия ( $\sim 10^{-5}$  с);
- возможность точной дозировки импульса;
- линейный ход тяговой регулировочной характеристики.

Все эти преимущества привлекают к импульсным двигателям внимание исследователей и конструкторов [1].

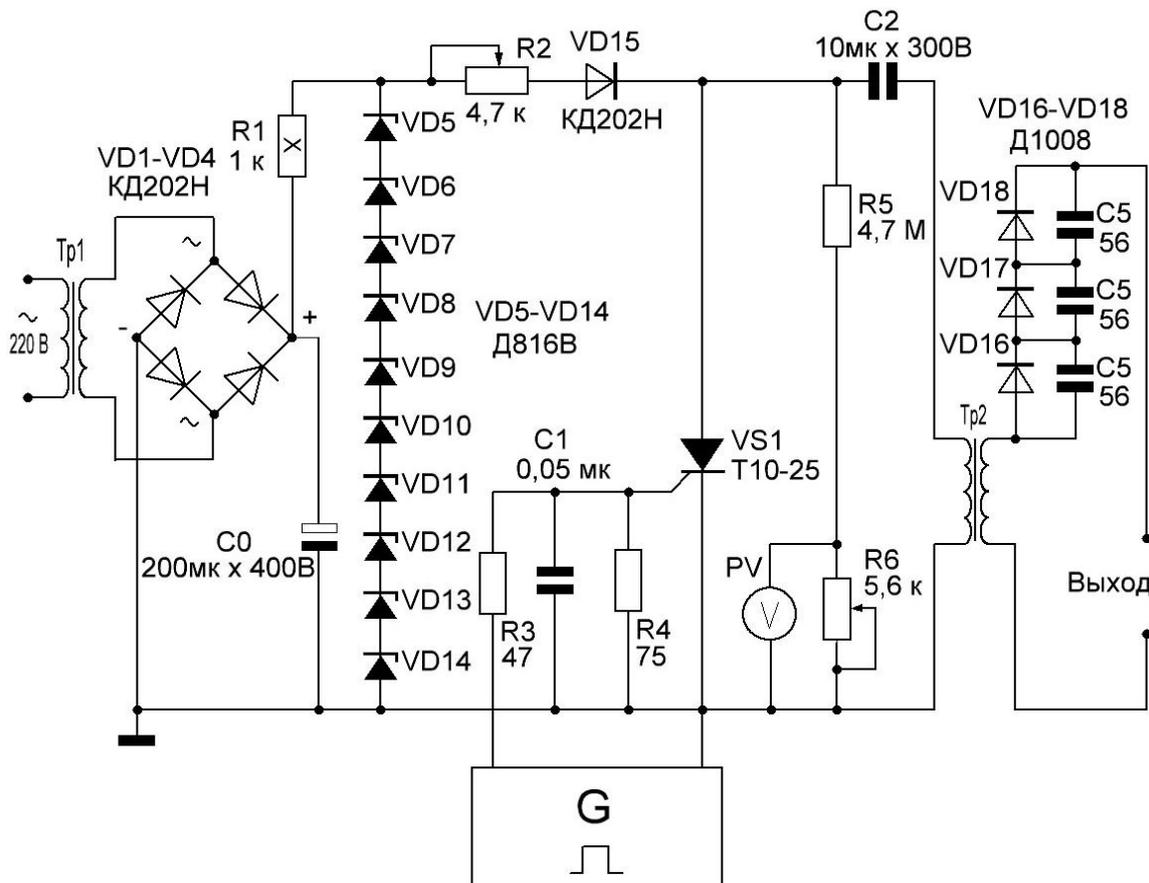
Основными элементами любого импульсного ЭРД являются накопитель электромагнитной энергии, блок коммутации или система инициирования разряда, система хранения и подачи рабочего тела и электроды. Принципиальная схема импульсного ЭРД представлена на рис. 1.



*Рис. 1. Принципиальная схема импульсного ускорителя плазмы:  
1 – ускоряющие электроды; 2 – система подачи рабочего вещества;  
3 – накопитель энергии; 4 – система инициирования разряда*

В импульсном режиме в ускоритель ЭРД можно вложить большую энергию, не вызывая разрушения его конструкции. Разрядные токи в импульсных ускорителях могут достигать значений от  $10^5$  до  $10^6$  А, а пиковые мощности составлять от  $10^2$  до  $10^4$  Вт. В то же время средняя потребляемая от источника мощность может быть совсем небольшой. Это позволяет получать ионно-плазменные потоки, параметры которых можно варьировать в широком диапазоне. Продолжительность рабочего цикла в импульсном ускорителе также меняется в широких пределах – от нескольких микросекунд до миллисекунд. Выбор рабочих веществ в импульсных ускорителях практически неограничен – это любые газы, металлы, твердые и жидкие диэлектрики. Наряду с этим возможность работы при относительно невысоких значениях потребляемой средней мощности резко ослабляет все требования к конструкционным материалам и испытательному оборудованию. Поэтому проведение экспериментов с импульсными ускорителями во многих случаях требует наименьших затрат [1].

Для обеспечения проведения экспериментов с импульсными ЭРД коллективом авторов ВКА имени А.Ф. Можайского и СПбПУ Петра Великого разработан импульсный источник электрической энергии (ИИЭЭ), принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 2.



Генератор импульсов АКИП-33021

Рис. 2. Принципиальная электрическая схема ИИЭЭ

Источник подключен к электрической сети общего назначения с частотой 50 Гц и напряжением 220 В. Силовой трансформатор  $Tr1$  совместно с мостовым выпрямителем на диодах  $VD1-VD4$  и электролитическим конденсатором  $C0$  формируют постоянное опорное напряжение, которое стабилизируется цепочкой последовательно соединенных стабилитронов  $VD5-VD14$  и служит для зарядки накопительного конденсатора  $C2$  до 300 В. С помощью делителя напряжения на резисторах  $R5$ ,  $R6$  и измерительного прибора  $PV$  осуществляется контроль уровня напряжения. При подаче импульса с внешнего генератора срабатывает тиристор  $VS$  и происходит разряд конденсатора  $C2$  на первичную обмотку импульсного трансформатора  $Tr2$ . Во вторичной обмотке трансформатора  $Tr2$  формируется импульс, который через высоковольтные выпрямительные столбы поступает на выход устройства. При подаче на управляющий электрод тиристора  $VS$  серии последовательных импульсов на выходе устройства будет сформирована аналогичная серия высоковольтных импульсов. Таким образом, задав с помощью генератора сигнал импульсов определенной частоты и скважности, на выходе получим усиленный сигнал аналогичной формы.

Трансформатор  $Tr1$ , помимо основной задачи, выполняет функцию гальванической развязки с питающей сетью. Диод  $VD15$  служит для защиты цепей, формирующих опорное напряжение, при разряде конденсатора  $C2$ . Стабилитроны  $VD5-VD14$  применены в виде последовательно соединенной цепочки, так как напряжение стабилизации каждого из них составляет около 30 В, а в сумме они дадут требуемое. В качестве управляемого ключа можно применить биполярный или полевой транзистор, однако надежность их работы в таком режиме ниже, чем у тиристора. Пониженная чувствительность  $T10-25$  к управляющему сигналу компенсируется высокими характеристиками задающего генератора, обеспечивающего уровень сигнала до 10 В [3].

Выходная мощность блока питания определяется высоковольтной частью и ограничивается параметрами используемых элементов, в том числе допустимым током выпрямительных столбов. Выбор между Д1006 (100 мА, 6 кВ), Д1007 (75 мА, 8 кВ) и Д1008 (50 мА, 10 кВ) с учетом необходимого запаса по величине напряжения был сделан в пользу последнего.

Режим работы ИИЭЭ при различных параметрах задающего генератора импульсов определяется его низковольтной частью, а именно скоростью заряда конденсатора С2. Зависимость изменения напряжения на конденсаторе имеет вид

$$U_{C2}(t) = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (1)$$

где  $U_{C2}$  – напряжение на конденсаторе;

$U_0$  – напряжение питающей сети;

$\tau$  – постоянная времени конденсатора;

$t$  – время.

Постоянная времени зависит от сопротивления цепи источника питания и емкости конденсатора:

$$\tau = RC, \quad (2)$$

где  $R$  – сопротивление источника;

$C$  – емкость конденсатора.

При этом было решено не снижать емкость конденсатора, так как он должен обладать требуемым запасом энергии, которая оценивается следующим образом:

$$W = \frac{CU_0^2}{2}. \quad (3)$$

Принятое при разработке решение по установке резистора переменного сопротивления R2 позволяет варьировать выходные характеристики источника, при этом ограничивая ток внутри источника и, тем самым, повышая надежность его элементов.

Для определения характеристик разработанного ИИЭЭ были выполнены экспериментальные исследования и получены зависимости выходного напряжения ИИЭЭ от частоты и длительности импульсов. Результаты представлены на рис. 3.

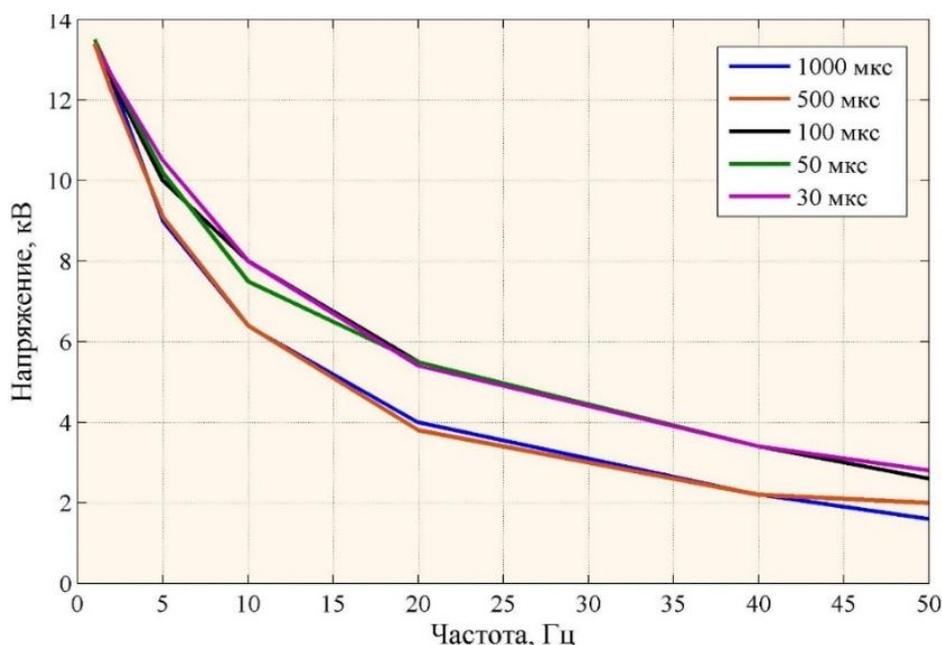
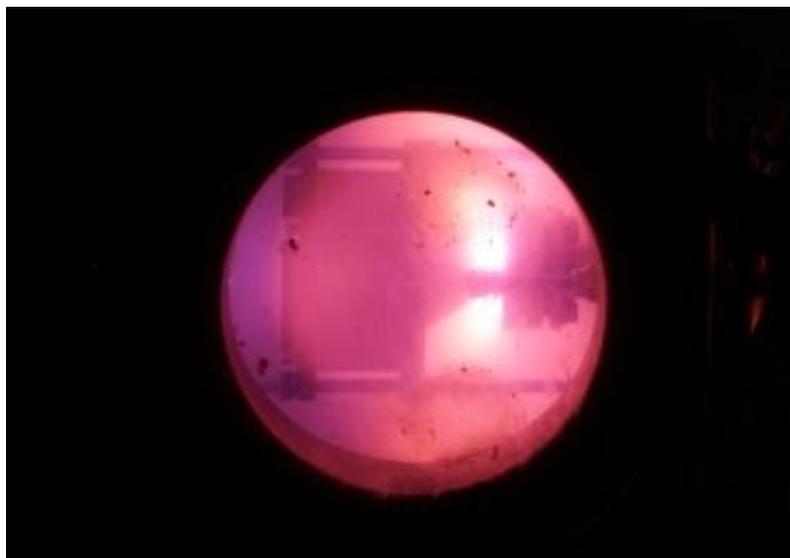


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения источника питания от частоты импульсов при различной их длительности

Помимо экспериментальных исследований авторским коллективом Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого на вакуумной установке ВУ-М были успешно выполнены испытания по отработке новой технологии ионизации рабочего тела для импульсного ЭРД нового поколения. На рис. 4 показана фотография потока ионизованного воздуха, полученного по новой технологии в импульсном режиме.



*Рис. 4. Процесс ионизации воздуха в импульсном режиме с использованием разработанного ИИЭЭ*

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования показали:

- разработанный ИИЭЭ позволяет обеспечить ионизацию рабочего тела в импульсном режиме, что соответствует задачам испытаний при разработке двигателей нового поколения;
- существует возможность регулирования в широком диапазоне выходных характеристик разработанного ИИЭЭ в зависимости от решаемых задач за счет изменения настроек элементов.

#### **Список используемых источников**

1. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Электрические ракетные двигатели. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
2. Федосеева Е.О., Федосеева Г.П. Основы электроники и микроэлектроники. – М.: Искусство, 1990. – 240 с.
3. Фолкенберри Л.М. Справочное пособие по ремонту электрических и электронных систем / пер. с англ.; под ред. Н.В. Пароля. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
4. Генераторы импульсов АК ИП-3301/АК ИП-3302/АК ИП-3303/АК ИП-3304/АК ИП-3305: руководство по эксплуатации. – М.: АК ИП, 2010. – 22 с.

В.И. Горбулин,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
Д.Л. Каргу,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
С.А. Поляков,  
*кандидат техн. наук;*  
Н.В. Радионов,  
*доктор экономических наук, доцент*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭТАПОВ ГЕНЕРИРОВАНИЯ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ БОРТОВЫМИ СИСТЕМАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ: СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД**

Рассмотрены вопросы разработки программно-математического обеспечения увеличения энергопроизводительности системы электроснабжения (СЭС), необходимого для поддержания высокого уровня энергоотдачи солнечных батарей на протяжении всего срока активного существования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). Сформулированы основные понятия и определения. Выполнена математическая постановка задачи планирования учета сгенерированной и потребленной электроэнергии бортовыми системами КА ДЗЗ с солнечной энергоустановкой, в которой учтены особенности конструкции и формализованное описание электрических соединений солнечных батарей.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая система электроснабжения, сценарный подход, энергопроизводительность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Космическая деятельность в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) имеет большое значение для решения не только фундаментальных проблем изучения Земли и околоземного космического пространства, но и проблем информационного обеспечения устойчивого развития социально-экономической сферы РФ и ее безопасности.

В соответствии с «Концепцией развития российской системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года», главной целью создания российской орбитальной группировки космических средств ДЗЗ является «максимальное удовлетворение потребностей национальной экономики и обеспечение конкурентоспособности РФ в области ДЗЗ» [1].

В связи с этим приобретают большую актуальность вопросы разработки программно-математического обеспечения увеличения энергопроизводительности системы электроснабжения (СЭС), необходимого для поддержания высокого уровня энергоотдачи солнечных батарей (СБ) на протяжении всего срока активного существования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). Это во многом определяет их функциональные возможности.

### **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Для решения данной задачи необходимо разработать математическую модель, адекватно описывающую функционирование КА ДЗЗ в периоды проведения сеансов наблюдения заданной совокупности объектов, осуществления обмена информацией с наземными или орбитальными комплексами и реализации программ управления угловой ориентацией. В рамках концептуального исследования модели целесообразно ввести понятие программы этапов применения КА.

**Определение 1.** Программа этапов применения КА (далее – программа П) – это упорядоченная во времени на моделируемом периоде орбитального полета совокупность этапов применения (в том числе целевого), связанных логической связью между собой и с режимами функционирования бортовых систем КА и присущими этим этапам в каждый момент времени значениями углов ориентации корпуса КА.

Данное понятие математически можно представить в виде совокупности следующих параметров:

– количество этапов  $K_{\text{этап}}$  применения КА на исследуемом интервале времени

$$T_{\text{исслед}} = [t_0, t_{K_{\text{этап}}}] ;$$

– вектор  $G_{\text{этап}(K_{\text{этап}}+1)}$  моментов смены этапов применения КА,  $G_{\text{этап}} = [t_0, t_1, t_2, \dots, t_{K_{\text{этап}}}]^T$  ;

–  $J_{\text{ЦО}}$  – количество объектов наблюдения;

– матрица  $A_{\text{ЦО}} = \begin{bmatrix} \varphi_{1\text{ЦО}} & \lambda_{1\text{ЦО}} \\ \dots & \dots \\ \varphi_{J_{\text{ЦО}}} & \lambda_{J_{\text{ЦО}}} \end{bmatrix}$  размерности  $[J_{\text{ЦО}} \times 2]$ , содержащая координаты (географическую широту и долготу)  $J_{\text{ЦО}}$  объектов наблюдения, включенных в программу работы бортовой специальной аппаратуры;

–  $J_{\text{ОКИК}}$  – количество отдельных командно-измерительных комплексов (ОКИК);

– матрица  $A_{\text{ОКИК}} = \begin{bmatrix} \varphi_{1\text{ОКИК}} & \lambda_{1\text{ОКИК}} \\ \dots & \dots \\ \varphi_{J_{\text{ОКИК}}} & \lambda_{J_{\text{ОКИК}}} \end{bmatrix}$  размерности  $[J_{\text{ОКИК}} \times 2]$ , содержащая географические координаты  $J_{\text{ОКИК}}$  отдельных командно-измерительных комплексов;

–  $J_{\text{ППИ}}$  – количество пунктов приема информации (ППИ);

– матрица  $A_{\text{ППИ}} = \begin{bmatrix} \varphi_{1\text{ППИ}} & \lambda_{1\text{ППИ}} \\ \dots & \dots \\ \varphi_{J_{\text{ППИ}}} & \lambda_{J_{\text{ППИ}}} \end{bmatrix}$  размерности  $[J_{\text{ППИ}} \times 2]$ , содержащая географические координаты  $J_{\text{ППИ}}$  пунктов приема информации;

– вектор  $P_{\text{этап}(K_{\text{этап}})}$  признаков этапов функционирования  $P_{\text{этап}} = [\pi_1, \dots, \pi_{K_{\text{этап}}}]^T$ ,

$\pi_{k_{\text{этап}}} \in \overline{1, \dots, K_{\text{призн}}}$  ( $K_{\text{призн}}$  – количество признаков).

При чем  $K_{\text{призн}} = K_{\text{этап}} = K$  – общее количество признаков (этапов). В работе значение признака принимается в соответствии с табл. 1.

– совокупность трех векторов:

$$A_{\langle H+1 \rangle} = [\alpha(t_0), \alpha(t_0 + \tau), \alpha(t_0 + 2 \cdot \tau), \dots, \alpha(t_0 + h \cdot \tau), \dots, \alpha(t_0 + H \cdot \tau)]^T ;$$

$$D_{\langle H+1 \rangle} = [\delta(t_0), \delta(t_0 + \tau), \dots, \delta(t_0 + H \cdot \tau)]^T ;$$

$$Gm_{\langle H+1 \rangle} = [\gamma(t_0), \gamma(t_0 + \tau), \dots, \gamma(t_0 + H \cdot \tau)]^T ,$$

размерности  $H + 1$ , содержащие значения углов ориентации  $\alpha(t)$ ,  $\delta(t)$ ,  $\gamma(t)$  корпуса КА в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат  $O_3 X_{\text{АГЭСК}} Y_{\text{АГЭСК}} Z_{\text{АГЭСК}}$  в моменты времени  $t_h = t_0 + h \cdot \tau$ ,  $h = 0, \dots, H$ . Здесь обозначено:  $t_h$  –  $h$ -й момент времени,  $\tau = (t_{K_{\text{этап}}} - t_0) / H$  – заданный промежуток времени (шаг прогнозирования),  $H$  – количество

промежутков времени прогнозирования, содержащихся в исследуемом интервале времени  $T_{\text{исслед}} = [t_0, t_{K_{\text{этап}}}]$ ; углы  $\alpha, \delta, \gamma$  задают положение осей базовой (связанной) системы координат  $O_{KA} X_B Y_B Z_B$ , начало которой расположено в центре масс КА, ось  $O_{KA} X_B$  совпадает с продольной осью КА и с осью телескопа (оптико-электронного комплекса), ось  $O_{KA} Y_B$  направлена вдоль оси симметрии первой панели солнечных батарей, ось  $O_{KA} Z_B$  дополняет тройку векторов (ортов осей системы) до правой [2].

Таблица 1

## Режимы функционирования КА ДЗЗ

Наименование этапа	Значение признака этапа
Целевое применение КА	1
Перенацеливание	2
Сеанс связи (информационный обмен) с наземными отдельными командно-измерительными комплексами	3
Сеанс связи с наземными комплексами приема информации (НКПИ)	4
Сеанс связи (информационный обмен) с КА-ретранслятором	5
Ориентация на Солнце	6
Дежурный полет на теневом участке орбиты в отсутствие сеансов связи	7

Таким образом, в формализованном виде программа  $\Pi$  этапов применения и энергопотребления КА может быть представлена в виде множества (массива данных) вышеперечисленных параметров:

$$\Pi = \left\{ \begin{array}{l} K_{\text{этап}}, G_{\text{этап} \langle K_{\text{этап}+1} \rangle}, P_{\text{этап} \langle K_{\text{этап}} \rangle}, J_{\text{ЦО}}, \\ A_{\text{ЦО}}, J_{\text{ОКИК}}, A_{\text{ОКИК}}, J_{\text{ППИ}}, \\ A_{\text{ППИ}}, A_{\langle H+1 \rangle}, D_{\langle H+1 \rangle}, Gm_{\langle H+1 \rangle} \end{array} \right\}. \quad (1)$$

Для планирования сгенерированной и потребленной электроэнергии бортовыми системами КА ДЗЗ необходимо на основе сформированного массива данных (1) произвести расчет параметров освещенности, затенения и нагрева панелей СБ. В рамках концептуального подхода к решению данной задачи необходимо ввести понятие «Сценарий применения КА ДЗЗ». Сформулируем его определение.

**Определение 2.** Сценарий применения КА ДЗЗ (далее для простоты – сценарий  $S$ ) – это совокупность этапов целевого применения КА, упорядоченная по времени моделируемого орбитального полета, которая обладает следующими свойствами (особенностями):

– наличие логической связи между целевым применением и режимами функционирования всех бортовых систем КА, характеризующихся соответствующим уровнем энергопотребления;

– наличие расчетных значений углов ориентации корпуса КА, углов рассогласования между направлением на Солнце и нормалью к поверхности каждого фотоэлектрического преобразователя (ФЭП), позволяющих определить температуру нагрева ФЭП и величину энергопритока в каждый момент времени целевого применения КА;

– наличие расчетных значений суммарной выходной электрической мощности панелей солнечных батарей (ПСБ) при заданной структуре системы генерирования электроэнергии (СГЭЭ).

Введенное понятие сценарий  $S$  в математической форме представляет собой множество, в основе которого лежат все компоненты программы  $\Pi$  с дополнительным включением следующих параметров:

–  $P_{\text{эл. потр БС}} [k_{\text{БС}}, H+1]$  – матрицы задействия и электропотребления бортовых систем. Данная матрица имеет размерность  $[K_{\text{БС}} \times (H+1)]$ . Если некоторый элемент матрицы не равен нулю  $P_{\text{потр БС}} [k_{\text{БС}}, h] = P_{H_{\text{КС}}}$ , то это означает, что потребляемая мощность  $k_{\text{БС}}$ -й бортовой системы в  $h$ -й момент времени применения КА равна величине  $P_{H_{\text{КС}}}$ . В частности, если элемент матрицы равен нулю  $P_{\text{потр БС}} [k_{\text{БС}}, h] = 0$ , то данная система выключена. Здесь использованы следующие переменные:

$k_{\text{БС}}$  – номер бортовой системы;

$k_{\text{БС}} = 1, \dots, K_{\text{БС}}, K_{\text{БС}}$  – количество бортовых систем КА;

$h$  – номер дискретного момента времени применения,  $h = 0, \dots, H$ ;

–  $B_{[N, H+1]} = \begin{bmatrix} \beta_{10} & \dots & \beta_{1H} \\ \dots & \dots & \dots \\ \beta_{N0} & \dots & \beta_{NH} \end{bmatrix}$  – матрицы размерности  $[N, H+1]$ , содержащей углы рассогласования между направлением на Солнце и нормалью к поверхности каждого ФЭП в дискретные моменты времени  $t_h = t_0 + h \cdot \tau, h = 0, \dots, H$ ;

–  $Tmp_{[N, H+1]} = \begin{bmatrix} T_{10} & \dots & T_{1H} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{N0} & \dots & T_{NH} \end{bmatrix}$  – матрицы размерности  $[N, H+1]$ , содержащей значения

температуры каждого ФЭП в дискретные моменты времени [3], т.е.  $T_{n0} = T_n(t_0)$ ,  $T_{n\tau} = T(t_0 + \tau), \dots, T_{nH} = T(t_0 + H \cdot \tau) \forall n = 1, \dots, N$ , где  $n$  – номер ФЭП,  $N$  – их количество.

Таким образом, в формализованном виде сценарий  $S$  применения КА может быть представлена в виде следующего множества параметров:

$$S = \left\{ \begin{array}{l} K_{\text{этап}}, G_{\text{этап}(K_{\text{этап}+1}), P_{\text{этап}(K_{\text{этап}})}, \\ J_{\text{ЦО}}, A_{\text{ЦО}}, J_{\text{ОКИК}}, A_{\text{ОКИК}}, J_{\text{ППИ}}, A_{\text{ППИ}}, \\ P_{\text{эл. потр БС}} [k_{\text{БС}}, K_{\text{этап}}], A_{(H+1)}, D_{(H+1)}, Gm_{(H+1)}, B_{[N, H+1]}, \\ Tmp_{[N, H+1]}, P_{\text{эл. СГЭЭ}(H+1)} \end{array} \right\} \quad (2)$$

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СГЕНЕРИРОВАННОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ И ПОТРЕБЛЕННОЙ БОРТОВЫМИ СИСТЕМАМИ КА ДЗЗ

Введенные понятия «Программа  $\Pi$ » и «Сценарий  $S$ » позволяют математически представить задачу планирования учета электроэнергии сгенерированной ПСБ и потребленной бортовыми системами КА ДЗЗ в следующем виде. Пусть заданы:

1) даты момента начала и окончания исследуемого временного интервала  $T_{\text{исслед.}} = [t_0, t_{K_{\text{этап}}}]$ , начальное положение  $X_0$  КА в момент  $t_0$ :  $X_0 = X(t_0)$ , а также известны вектор  $M_{\text{Солн.}} = [B_L, B_{\lambda}, B_e, B_{\Omega}, B_e, B_{\lambda}]^T$  параметров модели видимого движения Солнца (здесь

обозначено  $B_L, B_{\lambda}, B_e, B_{\Omega}, B_{\varepsilon}, B_{\lambda}$  – вектора коэффициентов аппроксимирующих полиномов для расчета соответственно средней долготы Солнца, средней долготы солнечного перигея, эксцентриситета орбиты Земли, средней долготы восходящего узла орбиты на эклиптике, среднего наклона эклиптики к экватору Земли, долготы Солнца как функций времени);

2) границы тневых  $[t_n^{[l]}_{\text{ТУО}}, t_k^{[l]}_{\text{ТУО}}]$  и освещенных  $[t_n^{[l]}_{\text{ОУО}}, t_k^{[l]}_{\text{ОУО}}]$  участков орбиты (ТУО и ОУО соответственно);

3) программа П этапов применения космического аппарата на исследуемом временном интервале, включающая в себя последовательность связанных между собой логическими условиями операций (1);

4)  $K_{\text{БС}}$  – количество бортовых систем КА, которые разделяются на две группы: первая из них – это системы (их количество равно  $K_{\text{БС}}^{\text{I}}$ ) с бинарной логикой работы и двумя уровнями энергопотребления  $P_{\text{эл.потр. lav min } k_{\text{БС}}}$ ,  $P_{\text{эл.потр. lav max } k_{\text{БС}}}$  и моментами начала и окончания, совпадающими с началом и окончанием этапов применения КА. Логика работы определяется матрицей  $\text{Work}_{\text{I}} [K_{\text{БС}}^{\text{I}} \times K_{\text{призн}}]$  размерности  $[K_{\text{БС}}^{\text{I}} \times K_{\text{призн}}]$ , каждый элемент  $\text{Work}_{\text{I } k_{\text{БС}}, k_{\text{призн}}}$  которой в  $k_{\text{БС}}$ -й строке и  $k_{\text{призн}}$ -м столбце имеет одно из значений  $P_{\text{эл.потр. lav min } k_{\text{БС}}}$  или  $P_{\text{эл.потр. lav max } k_{\text{БС}}}$ , которое соответствует уровню потребляемой энергии при  $k_{\text{призн}}$ -м признаке этапа применения. Вторая группа – это системы (их количество равно  $K_{\text{БС}}^{\text{II}}$ ) со сложной логикой работы и несколькими уровнями энергопотребления  $P_{\text{эл.потр. lav min } k_{\text{БС}}}$ ,  $P_{\text{эл.потр. lav 1 } k_{\text{БС}}}$ ,  $P_{\text{эл.потр. lav 2 } k_{\text{БС}}}, \dots, P_{\text{эл.потр. lav max } k_{\text{БС}}}$ , причем моменты смены режимов работы и соответствующих им уровней энергопотребления лежат внутри этапов применения КА. Логика смены режимов задается матрицей  $\text{Work}_{\text{II}} [K_{\text{БС}}^{\text{II}} \times K_{\text{призн}}]$  размерности  $K_{\text{БС}}^{\text{II}} \times K_{\text{призн}}$ , каждый элемент  $\text{Work}_{\text{II } k_{\text{БС}}, k_{\text{призн}}}$  которой в  $k_{\text{БС}}$ -й строке и  $k_{\text{призн}}$ -м столбце имеет одно из значений  $P_{\text{эл.потр. lav 2 } k_{\text{БС}}}$ ,  $\text{lav} = 1, \dots, \text{lav}_{k_{\text{БС}}}$  или  $P_{\text{эл.потр. lav max } k_{\text{БС}}}$ , которое соответствует уровню потребляемой энергии при  $k_{\text{призн}}$ -м признаке этапа применения (здесь обозначено:  $\text{lav}$  – номер уровня электропотребления,  $\text{lav}_{k_{\text{БС}}}$  – количество уровней электропотребления для  $k_{\text{БС}}$ -й бортовой системы). Если элемент матрицы принимает отрицательное значение  $\text{Work}_{\text{I } k_{\text{БС}}, k_{\text{призн}}} < 0$ , то это означает, что уровень потребления данной бортовой системы при  $k_{\text{призн}}$ -м признаке этапа применения является не постоянной величиной, а кусочно-постоянной (ступенчатой) функцией. В этом случае значения этой функции рассчитываются в одной из процедур с номером  $n_F = |\text{Work}_{\text{I } k_{\text{БС}}, k_{\text{призн}}}| = -\text{Work}_{\text{I } k_{\text{БС}}, k_{\text{призн}}}$ . Параметры этих процедур при моделировании определяются в соответствии с паспортными данными изделия в части, касающейся соответствующей бортовой системы, и логикой ее функционирования на данном этапе применения КА и могут быть как детерминированными, так случайными величинами;

5) геометрические параметры КА ДЗЗ  $G = \{R_{\text{СБ}}, R_{\text{КА}}, H\}$ , где  $R_{\text{СБ}}$  – размеры ПСБ;  $R_{\text{КА}}$  – размеры элемента конструкции, расположенного над рабочей стороной ПСБ;  $H$  – совокупность геометрических параметров положения ПСБ относительно элемента конструкции, расположенного над рабочей стороной ПСБ.

6) множество ФЭП ПСБ  $M = [1, \dots, k]$ , где  $k$  – конечное число ФЭП на ПСБ.

7) карта коэффициентов переизлучения ФЭП  $Mt = \{kt(N)\}$ , где  $kt$  – температурный коэффициент.

Таким образом, с учетом заданных выше начальных условий, а также программы П, требуется сформировать сценарий  $S$  применения КА ДЗЗ на заданный интервал времени  $T_{\text{исслед.}}$ , включающий последовательность логически связанных между собой операций (2).

В рамках решения поставленной задачи необходимо также представить математическое описание электрической схемы соединений солнечных батарей из состава электроэнергетической установки КА.

Математическое представление схемы ПСБ проведем с учетом сегментирования рабочей плоскости панелей на участки, по своим геометрическим размерам совпадающие с отдельными ФЭП.

Эквивалентную модель структуры (схемы) солнечной батареи можно представить в виде  $M_{\text{панел}}$  одинаковых панелей, каждая из которых представляет собой множество из  $\tilde{K}$  створок. В свою очередь, створка состоит из  $R$  элементарных генераторов (ЭГ), каждый из которых представляет собой совокупность электрически соединенных  $n_s$  фотоэлектрических преобразователей. При этом общее количество  $N$  ФЭП в батарее определится произведением  $N = M_{\text{панел}} \cdot \tilde{K} \cdot R \cdot n_s$ , а количество  $G_{\tilde{k}}$  элементарных генераторов в каждой створке – выражением  $G_{\tilde{k}} = R \forall \tilde{k} = 1, \dots, \tilde{K}$ , где  $\tilde{k}$  – номер створки. Поэтому общее количество элементарных генераторов  $G_{\text{СБ}}$  определяется как произведение количества створок на количество  $G_{\tilde{k}}$  элементарных генераторов в каждой створке:

$$G_{\text{СБ}} = K_{\text{створок}} \cdot G_{\tilde{k}} = M_{\text{панел}} \cdot \tilde{K} \cdot G_{\tilde{k}}. \quad (3)$$

В соответствии с конструкцией и электрической схемой СБ множество  $M_{N \text{ ФЭП}} = \overline{1, \dots, N}$  номеров ФЭП разбито на  $G_{\text{СБ}}$  непересекающихся подмножеств  $M_{g \text{ ФЭП}}$

$$\bigcup_{g=1}^{G_{\text{СБ}}} M_{g \text{ ФЭП}} = M_{N \text{ ФЭП}}, \quad (4)$$

содержащих номера ФЭП, образующих  $g$ -й элементарный генератор. Кроме того, множество  $M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}} = \overline{1, \dots, G_{\text{СБ}}}$  номеров элементарных генераторов разбито на  $K_{\text{створок}}$  непересекающихся подмножеств  $M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}$  по количеству створок:

$$\bigcup_{\tilde{k}=1}^{K_{\text{створок}}} M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}} = M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}. \quad (5)$$

В процессе угловой переориентации КА ближняя к корпусу объекта часть створок может оказываться затененной [4–5]. Поэтому, исходя из требования равномерности освещенности всех ФЭП, объединенных в единую точку суммирования мощностей одного экстремального регулятора, целесообразно рассматривать возможность разбиения множества  $M_{G_{\tilde{k}}}$  из  $G_{\tilde{k}}$  элементарных генераторов  $\tilde{k}$ -й створки на две части (два подмножества  $M_{G_{\tilde{k} \text{ А}}}$  и  $M_{G_{\tilde{k} \text{ Б}}}$ ) по  $G_{\tilde{k} \text{ А}}$  и  $G_{\tilde{k} \text{ Б}}$ ,  $G_{\tilde{k}} = G_{\tilde{k} \text{ А}} + G_{\tilde{k} \text{ Б}}$  в каждой (можно отметить, что множество  $G_{\text{СБ}}$  всех генераторов СБ определяется объединением  $G_{\tilde{k}}$  для всех створок). В качестве решающего правила для данного разбиения может быть принято выполнение условия достаточной освещенности (или затененности) соответствующей части створки или отдельного генератора. Формально это можно выполнить следующим образом.

Пусть для каждого ФЭП с номером  $n$ ,  $n = 1, \dots, N$  на всех освещенных участках орбиты (ОУО)  $T_{\text{ОУО}}$  известны зависимости температуры от времени  $T_{\text{ФЭП}_n}(t)$  и признака его освещенности (или затенения)  $z_{\text{освещ } n}(t)$ :

$$z_{\text{освещ } n}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если центр ФЭП освещен;} \\ 0, & \text{если центр ФЭП неосвещен.} \end{cases}$$

Тогда величина

$$z_{\text{ср } g} = \frac{1}{n_s} \cdot \sum_{n \in M_g \text{ ФЭП}} \frac{1}{\|T_{\text{ОУО}}\|} \int_{T_{\text{ОУО}}} z_{\text{освещ } n}(t) dt \quad (6)$$

характеризует среднюю освещенность  $g$ -го элементарного генератора на освещенных участках орбиты (здесь  $\|T_{\text{ОУО}}\|$  – суммарная длительность всех ОУО:

$$T_{\text{ОУО}} = T_{\text{исслед}} / T_{\text{ТУО}}. \quad (7)$$

Данный показатель  $z_{\text{ср } g}$  изменяется в пределах от 0 до 1 и по заданному критериальному значению  $z_{\text{ср. зад}}$  позволяет выделить хорошо освещенные и критически слабо освещенные элементарные генераторы с номерами из подмножеств  $M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}$  и  $M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}^{\text{теньев}}$  в соответствии с условиями:

$$M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}(z_{\text{ср. зад}}) = \{g \in M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}} \mid z_{\text{ср } g} \geq z_{\text{ср. зад}}\} \quad (8)$$

$$M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}^{\text{теньев}}(z_{\text{ср. зад}}) = \{g \in M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}} \mid z_{\text{ср } g} < z_{\text{ср. зад}}\}, \quad (9)$$

$$M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}} \cup M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}^{\text{теньев}} = M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}. \quad (10)$$

Аналогичные выражения можно записать для каждой створки

$$M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}(z_{\text{ср. зад}}) = \{g \in M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}} \mid z_{\text{ср } g} \geq z_{\text{ср. зад}}\},$$

$$M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{теньев}}(z_{\text{ср. зад}}) = \{g \in M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}} \mid z_{\text{ср } g} < z_{\text{ср. зад}}\}, \quad (11)$$

$$M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}} \cup M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{теньев}} = M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}.$$

Объединение всех частных множеств номеров ЭГ по всем створкам дает полное множество освещенных или затененных генераторов соответственно:

$$\bigcup_{\tilde{k}=1}^{K_{\text{створок}}} M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}} = M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}},$$

$$\bigcup_{\tilde{k}=1}^{K_{\text{створок}}} M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{теньев}} = M_{G_{\text{СБ}} \text{ ЭГ}}^{\text{теньев}}.$$

Если принять порядок нумерации с первой из таких створок, то множество створок, которые могут быть разделены на освещенную и затененную части, можно представить в виде

$$M_{K_{\text{створок}}}^{\text{теньев}} = \{1, 2, \dots, K_{\text{створок}}^{\text{теньев}}\}, \quad (12)$$

где  $K_{\text{створок}}^{\text{теньев}}$  – количество створок, попадающих в область затенения на достаточно продолжительном интервале времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе сформулированных определений и математического описания этапов генерирования и потребления электроэнергии бортовыми системами космического аппарата, а также математического описания электрической схемы соединений солнечных батарей, предлагается использовать сценарный подход при моделировании планирования комплексного применения КА ДЗЗ. Данный подход по сравнению с существующим позволяет более эффективно применять все бортовые системы КА на протяжении всего срока активного существования. В частности, применение математических моделей ПСБ, учитывающих конструктивные и электротехнические особенности ее построения, дает возможность разработать новые образцы бортовых систем электроснабжения, позволяющих еще на этапе разработки повысить рациональное использование накапливаемой электроэнергии. Реализация данного подхода обеспечит повышение эффективности использования энергопритока от солнечных батарей электроэнергетической установки КА в среднем до 10–12 %, в частности за счет учета особенностей изменения частичного затенения ПСБ на этапах выполнения целевых разворотов КА ДЗЗ относительно его центра масс.

## Список используемых источников

1. *Ахметов Р.Н.* Методы и модели автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вест. Самарского университета им. академика С.П. Королёва. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – Самара: СГАУ им. академика С.П. Королёва, 2008. – № 2 – С. 192–210.
2. *Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А.* Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие. – Самара: СГАУ им. академика С.П. Королёва, 2006. – 296 с.
3. Математическое моделирование динамики температуры солнечных батарей в различных условиях орбитального полета космического аппарата / Н.Н. Астахов, В.И. Горбулин, Д.Л. Каргу, Г.Б. Стеганов, Д.А. Шубин // Вест. Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – Вып. 6 (111). – С. 4–21.
4. Модель энергопритока от солнечных батарей БСЭС КА стабилизированного вращением / Ю.А. Чудновский, Д.Л. Каргу, Н.В. Радионов, Г.Б. Стеганов, Д.А. Шубин // Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, – СПб.: им. А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. 659. – С. 164–171.
5. *Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А.* Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергобаланса: учеб. пособие. – Самара: СГАУ им. академика С.П. Королёва, 2007. – 160 с.

В.И. Горбулин,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
В.И. Крыжановский,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
И.А. Трофимов,  
*кандидат техн. наук*

## **АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ПЕРЕНАЦЕЛИВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА**

Разработан итерационный алгоритм расчета траектории оптимального по быстродействию разворота космического аппарата (КА) для наведения аппаратуры наблюдения на одиночный объект, расположенный на земной поверхности. По окончании разворота угол и угловая скорость линии визирования аппаратуры наблюдения должны равняться углу и угловой скорости линии направления на цель для предотвращения смаза изображения. На основе анализа математической модели движения линии направления на объект предложен упрощенный способ решения задачи.

Ключевые слова: оптимальный по быстродействию разворот, космический аппарат, итерационный алгоритм, наведение на цель.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Объектом исследования является жесткий КА, на котором размещена аппаратура наблюдения за земной поверхностью.

Системы ориентации современных КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют осуществлять пространственные повороты корпуса аппарата, что значительно повышает показатели эффективности их целевого применения. Сдерживающим фактором является несовершенство алгоритмического и программного обеспечения бортовых систем управления, обусловленное многообразием ситуаций, возникающих при этом математических оптимизационных задач и сложностью их решения, отягощенного необходимостью учета различного рода ограничений. Алгоритмическую базу программного обеспечения управления ориентацией объекта можно разделить на две большие группы [1]:

– алгоритмы, предназначенные для реализации программ управления. В свою очередь здесь можно выделить подгруппу алгоритмов, реализующие принципы автоматического регулирования, и подгруппу алгоритмов терминального управления, ориентированных на полномасштабное использование возможностей вычислительных средств («интеллектуальные» алгоритмы);

– алгоритмы, используемые при планировании применения отдельных КА ДЗЗ и их орбитальных группировок. На этом этапе возникает необходимость анализа различных схем и режимов управления ориентацией спутника с целью выбора оптимальных (рациональных) трасс центральной линии маршрутов зондирования объектов различного типа. К их числу можно отнести одиночные или групповые объекты, а также площадные и протяженные или ленточные (например, русла рек, береговые линии, газопроводы, дороги и т.п.). В результате данного анализа определяются: моменты начала и окончания зондирования, признак маршрута съемки (вращательное движение КА на этом интервале должно осуществляться по инерции или при помощи управляющего момента исполнительных органов системы управления ориентацией) и программы изменения углов ориентации КА. Для смены маршрутов требуется так называемый этап перенацеливания, содержащий, как правило, два активных участка управления ориентацией корпуса. В интересах формирования оптимального (рацио-

нального) плана применения КА ДЗЗ требуется с заданной методической точностью оценить реализуемость и расход ресурсов (временных и энергетических), необходимых для осуществления перенацеливания. Для получения этой информации необходимо решить оптимизационную задачу управления ориентацией объекта (возможно, со скользящим правым концом) за минимальное время или с минимальным расходом ресурса (как правило, электроэнергии). Анализ условий построения возможных маршрутов сканирования в областях повышенной концентрации объектов показывает, что для съемки наибольшего количества целей требуется более интенсивно изменять угол тангажа ориентации оси аппаратуры наблюдения. Поэтому в пределах данной статьи основное внимание уделено обоснованию программ изменения угла тангажа.

Известно решение задачи оптимального по быстродействию разворота жесткого КА при условии, что начальная и конечная точки разворота заданы. Вследствие движения КА по орбите угол и угловая скорость линии направления на объект наблюдения (в дальнейшем – цель) изменяются, поэтому вычислить заранее конечную точку невозможно. Вопросы расчета оптимальной траектории для этих условий решались в работе [2] путем сведения задачи к решению алгебраических уравнений четвертого порядка. Применение предложенного метода связано с трудностями выбора найденных корней и необходимостью использования предварительно подготовленных таблиц. Поэтому разработка более простого в применении алгоритма является актуальной и практически важной задачей.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо определить оптимальную по быстродействию траекторию разворота по углу тангажа КА наблюдения за одиночными объектами на земной поверхности на интервале времени  $t \in [0, t_k]$ . Предполагается, что поворот линии визирования аппаратуры наблюдения осуществляется путем разворота корпуса КА. Как объект управления КА представляет собой жесткое тело, известны момент инерции  $J$ , максимально возможный управляющий момент  $M_m$ , максимально допустимая угловая скорость разворота  $\dot{\vartheta}_m$ . Известны угол  $\vartheta_0 = \vartheta(0)$  и угловая скорость  $\dot{\vartheta}_0 = \dot{\vartheta}(0)$  линии визирования в момент начала разворота, а также в общем случае известен закон изменения угла  $\vartheta_{ц}(t)$  и угловой скорости  $\dot{\vartheta}_{ц}(t)$  направления линии визирования на цель и их значения в момент начала разворота [3, 4].

Наибольший интерес представляет частный случай, изображенный на рис. 1, который и будет рассматриваться в дальнейшем. КА движется по орбите на постоянной высоте от поверхности Земли  $h$  с постоянной линейной скоростью  $V$ . Известно расстояние  $l$  от проекции КА на поверхность Земли в момент времени  $t = 0$  до цели, кривизна поверхности Земли и орбиты не учитывается [5, 6].

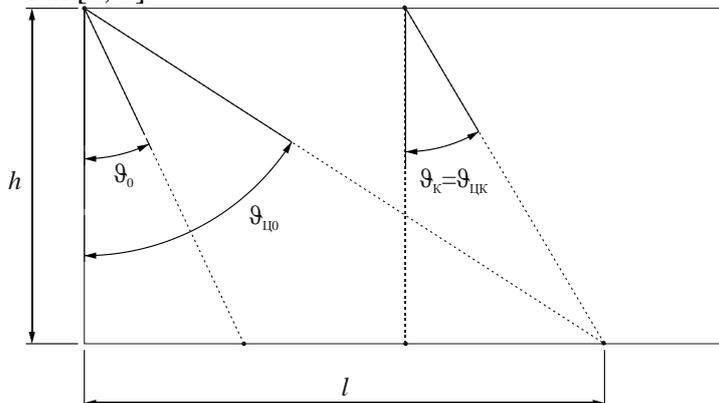


Рис. 1. Направления линии визирования на цель и в моменты начала и конца разворота

Необходимо осуществить разворот КА за минимальное время таким образом, чтобы в момент времени  $t_k$  обеспечить выполнение граничных условий:

$$\vartheta(t_k) = \vartheta_{ц}(t_k), \dot{\vartheta}(t_k) = \dot{\vartheta}_{ц}(t_k) \quad (1)$$

а также минимизировать время  $t_k$ .

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ЦЕЛИ

Вращательное движение жесткого КА описывается дифференциальным уравнением [7]

$$J\ddot{\vartheta} = M, \quad (2)$$

где  $J$  – момент инерции КА;  $M$  – управляющий момент.

Если в процессе разворота используется только максимальное значение момента  $M_m$ , то вышеприведенное дифференциальное уравнение может быть записано в виде

$$\ddot{\vartheta} = \pm \varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 = \frac{M_m}{J}. \quad (3)$$

В этом случае вращательное движение КА описывается уравнениями:

– во временной области

$$\vartheta(t) = \vartheta(t_0) + \dot{\vartheta}(t_0)(t - t_0) \pm 0,5\varepsilon_0(t - t_0)^2, \quad (4)$$

$$\dot{\vartheta}(t) = \dot{\vartheta}(t_0) \pm \varepsilon_0(t - t_0), \quad (5)$$

– на фазовой плоскости

$$0,5\dot{\vartheta}^2 \mp \varepsilon_0\vartheta = C_1, \quad (6)$$

где  $C_1$  – постоянная величина, зависящая от начальных условий.

Фазовые траектории представляют собой параболы, симметричные относительно оси абсцисс. Если управляющий момент равен нулю, то фазовая траектория – прямая линия, параллельная оси абсцисс, а ее уравнение имеет вид

$$\dot{\vartheta} = C_2 \quad (7)$$

Уравнения движения цели получаем путем простых тригонометрических преобразований:

$$\vartheta_{ц}(t) = \arctg \frac{l - Vt}{h}, \quad \dot{\vartheta}_{ц}(t) = \frac{-Vh}{h^2 + (l - Vt)^2}. \quad (8)$$

По соотношению (8) находим граничные условия для цели:

$$\vartheta_{ц0} = \arctg \frac{l}{h}; \quad \dot{\vartheta}_{ц0} = -\frac{Vh}{h^2 + l^2}, \quad (9)$$

$$\vartheta_{цк}(t) = \arctg \frac{l - Vt_k}{h}; \quad \dot{\vartheta}_{цк}(t) = \frac{-Vh}{h^2 + (l - Vt_k)^2}.$$

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Для оптимального по быстродействию разворота жесткого КА в соответствии с принципом максимума Понтрягина должны выполняться два условия [2]:

– управляющий момент и, следовательно, угловое ускорение должны быть все время максимальными;

– управление должно содержать не более двух интервалов.

Соответствующее управление приведено на рис. 2, где  $t_{01}$  – время разгона в нужном направлении,  $t_{12}$  – время торможения,  $t_k$  – момент времени выключения.

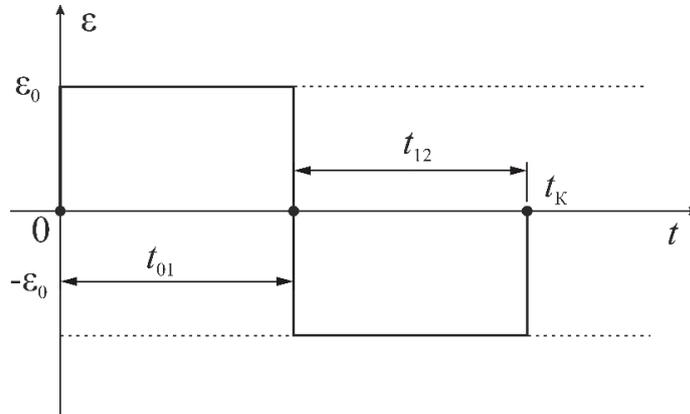


Рис. 2. Оптимальное по быстродействию управление

Фазовая траектория движения КА под действием приведенного на рис. 2 управления и фазовая траектория линии направления на цель приведены на рис. 3.

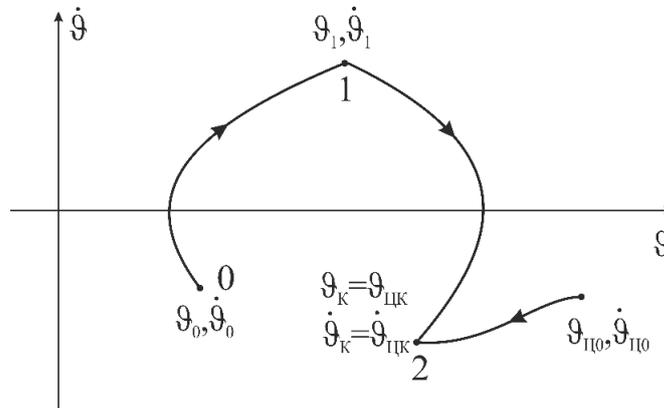


Рис. 3. Фазовые траектории

На рис. 3 точка 0 соответствует началу разгона в момент времени  $t = 0$ , точка 1 – переключению с режима разгона в режим торможения в момент времени  $t = t_{01}$ , точка 2 – завершению разворота в момент времени  $t_k = t_{01} + t_{12}$ .

Уравнение фазовой траектории для участка разгона (рис.3) имеет вид:

$$0,5\dot{\vartheta}^2 - \varepsilon_0\vartheta = C. \quad (10)$$

Поскольку фазовая траектория начинается в точке с координатами  $(\vartheta_0, \dot{\vartheta}_0)$ , находим произвольную постоянную

$$C = 0,5\dot{\vartheta}_0^2 - \varepsilon_0\vartheta_0. \quad (11)$$

Учитываем тот факт, что траектория проходит через точку с координатами  $(\vartheta_1, \dot{\vartheta}_1)$ , получаем соотношение

$$0,5\dot{\vartheta}_1 - \varepsilon_0\vartheta_1 = 0,5\dot{\vartheta}_0 - \varepsilon_0\vartheta_0. \quad (12)$$

Аналогичное соотношение может быть получено и для участка торможения

$$0,5\dot{\vartheta}_1 + \varepsilon_0\vartheta_1 = 0,5\dot{\vartheta}_{\text{ЦК}} + \varepsilon_0\vartheta_{\text{ЦК}}. \quad (13)$$

Если сложить уравнения (12) и (13), то получится выражение для определения угловой скорости в точке переключения

$$\dot{\vartheta}_1 = \sqrt{0,5(\dot{\vartheta}_0^2 + \dot{\vartheta}_{\text{ЦК}}^2) + \varepsilon_0(\vartheta_{\text{ЦК}} - \vartheta_0)} \quad (14)$$

В соответствии с выражениями (4), (5) система уравнений, описывающая процесс перевода КА, имеет вид

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 + \dot{\vartheta}_0 t_{01} + 0,5\varepsilon_0 t_{01}^2; \quad (15)$$

$$\dot{\vartheta}_1 = \dot{\vartheta}_0 + \varepsilon_0 t_{01}; \quad (16)$$

$$\vartheta_k = \vartheta_1 + \dot{\vartheta}_1 t_{12} - 0,5\varepsilon_0 t_{12}^2; \quad (17)$$

$$\dot{\vartheta}_k = \dot{\vartheta}_1 - \varepsilon_0 t_{12}. \quad (18)$$

Итерационный алгоритм решения приведен ниже.

1. Зададим достаточно большую переменную  $a$ , например  $=1\ 000\ 000$ .

2. Задаемся предполагаемым значением времени выключения  $t_k$ . При отсутствии априорной информации можно начинать с нуля. Если может быть получено начальное приближение, можно им воспользоваться для задания  $t_k$ . Результаты моделирования показали, что лучшая сходимости обеспечивается при задании  $t_k$  на 10–15% больше начального приближения, т. е. при поиске «сверху».

3. По выражениям (8) находим предполагаемое направление на цель по углу  $\vartheta_{\text{цк}} = \vartheta_{\text{ц}}(t_k)$  и угловой скорости  $\dot{\vartheta}_{\text{цк}} = \dot{\vartheta}_{\text{ц}}(t_k)$  в момент выключения.

4. Определяем значение подкоренного выражения соотношения (14)

$$x = 0,5(\dot{\vartheta}_0^2 + \dot{\vartheta}_{\text{цк}}^2) + \varepsilon_0(\vartheta_{\text{цк}} - \vartheta_0)$$

5. Определяем скорость в момент переключения

$$\begin{cases} |\sqrt{x}|, x \geq 0; \\ -|\sqrt{-x}|, x < 0 \end{cases}$$

6. Используя выражение (5), находим время разгона и торможения

$$t_{01} = \frac{\dot{\vartheta}_1 - \dot{\vartheta}_0}{\varepsilon_0}, t_{12} = \frac{\dot{\vartheta}_1 - \dot{\vartheta}_{\text{цк}}}{\varepsilon_0}$$

7. По соотношениям (15–18) определяем фактическое значение угла  $\vartheta_2$  и угловой скорости  $\dot{\vartheta}_2$  линии визирования в момент выключения.

8. Определяем фактическое значение времени выключения

$$t_{k1} = t_{01} + t_{12}.$$

9. По выражениям (8), (9) находим фактическое направление на цель по углу  $\vartheta_{\text{цк1}} = \vartheta_{\text{ц}}(t_{k1})$  и угловой скорости  $\dot{\vartheta}_{\text{цк1}} = \dot{\vartheta}_{\text{ц}}(t_{k1})$  в момент выключения.

10. Определяем степень отклонения фактического значения направления линии визирования от направления на цель в момент времени  $t_{k1}$

$$c = k_1(\vartheta_2 - \vartheta_{\text{цк1}})^2 + k_2(\dot{\vartheta}_2 - \dot{\vartheta}_{\text{цк1}})^2 \quad (19)$$

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  вводятся для обеспечения приоритетности степени отклонения по углу и угловой скорости, а также для соблюдения размерности.

11. Проверяем выполнение условия

$$c < b, \quad (20)$$

где  $b$  – малая величина, определяемая требованиями по точности.

Если условие выполняется, решение найдено и происходит выход из расчета, в противном случае:

– проверяется условие

$$c < a.$$

Проверка этого условия устраняет опасность заикливания. Его выполнение означает, что на текущем шаге произошло улучшение решения и расчет продолжается. Если условие не выполняется, происходит выход из расчета с формированием сообщения об аварийном завершении для принятия решения.

– вычисляется новое значение  $t_k$ . Оно может быть найдено методами половинного деления, золотого сечения и др. Хорошо работает формула вычисления

$$t_k = t_k + k_{CX} (t_{k1} - t_k),$$

где  $k_{CX}$  – коэффициент сходимости, выбирается в диапазоне 0,01–0,5 в зависимости от требований по точности. Его уменьшение приводит к повышению точности расчета, уменьшает опасность заикливания, но увеличивает время решения.

– переменной  $a$  присваивается значение  $c$ .

– весь расчет повторяется с пункта 3.

Для получения начального приближения целесообразно использовать приближенный расчет [8, 9]. Из математики известно, что при малых углах справедливо соотношение

$$\operatorname{arctg}(\alpha) \approx \alpha.$$

С учетом этого выражения (8,9) могут быть представлены в виде

$$\vartheta_{Ц}(t) = \frac{l - Vt}{h}, \quad \dot{\vartheta}_{Ц}(t) = \frac{-V}{h}.$$

Результаты моделирования показали, что при углах разворота меньше  $30^\circ$  справедливо соотношение

$$\dot{\vartheta}(0) \approx \dot{\vartheta}_{Ц}(t_k),$$

следовательно, время разгона и время торможения примерно одинаково

$$\tau = t_{01} = t_{12} = \frac{t_k}{2}.$$

С учетом вышеизложенного уравнения (15) – (18) принимают вид

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 + \dot{\vartheta}_0 \tau + 0,5 \varepsilon_0 \tau^2 \quad (21)$$

$$\dot{\vartheta}_1 = \dot{\vartheta}_0 + \varepsilon_0 \tau \quad (22)$$

$$\vartheta_k = \vartheta_1 + \dot{\vartheta}_1 \tau - 0,5 \varepsilon_0 \tau^2 \quad (23)$$

$$\dot{\vartheta}_k = \dot{\vartheta}_1 - \varepsilon_0 \tau \quad (24)$$

После подстановки (21), (22) в (23) и выполнения математических преобразований получаем

$$\vartheta_2 = \varepsilon_0 \tau^2 + 2 \dot{\vartheta}_0 \tau + \vartheta_0.$$

С учетом граничных условий (1) находим

$$\varepsilon_0 \tau^2 + 2 \dot{\vartheta}_0 \tau + \vartheta_0 = \frac{(l - 2V\tau) \cdot 57,3}{h} \quad (25)$$

Приводим квадратное уравнение (25) к стандартному виду

$$A\tau^2 + B\tau + C = 0; \quad (26)$$

где

$$A = h\varepsilon_0;$$

$$B = 2h\dot{\vartheta}_0 + 2 \cdot 57,3V; \quad (27)$$

$$C = h\vartheta_0 - 57,3l.$$

Результаты моделирования показали, что из двух корней уравнения (26) следует выбирать первый

$$\tau = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (28)$$

Этот результат следует проверить, используя выражения (15) – (20). Зачастую он обеспечивает заданную точность перенацеливания, в противном случае его следует использовать в качестве начального приближения при итерационном методе расчета.

### ПРИМЕР 1

Начальное состояние КА: угол наклона линии визирования  $3,81^\circ$ , угловая скорость  $-1,39^\circ/\text{с}$ , высота орбиты  $h = 300$  км, линейная скорость движения по орбите  $V = 7,3$  км/с, максимально возможное угловое ускорение  $1^\circ/\text{с}^2$ , расстояние до цели  $-70$  км.

Воспользуемся приближенным способом решения, для этого по соотношениям (27) находим  $A = 300$ ,  $B = 2,58$ ,  $C = -2\,868$ , далее по формуле (28) определяем  $\tau = 3,087$  с.

Проверяем условия обеспечения точности:

$$\vartheta_{\text{ЦК}} - \vartheta_2 = 4,750 - 4,773 = -0,023 = -1,38 \text{ угл. мин};$$

$$\dot{\vartheta}_{\text{ЦК}} - \dot{\vartheta}_2 = -1,384 - (-1,388) = 0,004 = 0,24 \text{ угл. мин./с}.$$

Показатель  $c$  (19) равняется  $0,00056$ .

Если условия по точности не удовлетворяют заданным требованиям, применяем итерационный способ поиска решения, при этом выбираем  $0$  в качестве начального приближения и метод половинного деления для поиска. Результаты решения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты решения итерационным способом (к примеру 1)

Итерация	$t_K$	$t_{K1}$	$t_{01}$	$t_{12}$
1	0,000	10,289	3,388	3,579
2	5,144	6,902	3,388	0,136
3	6,023	6,274	3,193	3,135
4	6,148	6,175	3,089	3,085
5	6,161	6,164	3,084	3,080

Для поиска решения потребовалось пять итераций, результат  $-t_K = 6,164$  с,  $t_{01} = 3,084$  с,  $t_{12} = 3,080$  с.

Проверяем условия обеспечения точности:

$$\vartheta_{\text{ЦК}} - \vartheta_2 = 4,764 - 4,769 = -0,005 = -0,3 \text{ угл. мин};$$

$$\dot{\vartheta}_{\text{ЦК}} - \dot{\vartheta}_2 = -1,3845 - (-1,384) = -0,0005 = -0,03 \text{ угл. мин./с}.$$

Показатель  $c$  равняется  $0,00003$ .

Решение задачи при выборе в качестве начального приближения  $t_K = 6,174$  с, полученного в результате приближенного способа решения представлено в табл. 2.

Таблица 2

Результаты решения приближенным способом (к примеру 1)

Итерация	$t_K$	$t_{K1}$	$t_{01}$	$t_{12}$
1	6,174	6,154	3,079	3,075
2	6,164	6,162	3,083	3,079

Решение найдено на втором шаге, результаты:  $t_K = 6,162$  с,  $t_{01} = 3,083$  с,  $t_{12} = 3,08$  с,  $c = 0,0000072$ , точность повысилась.

Фазовые траектории и переходные процессы приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

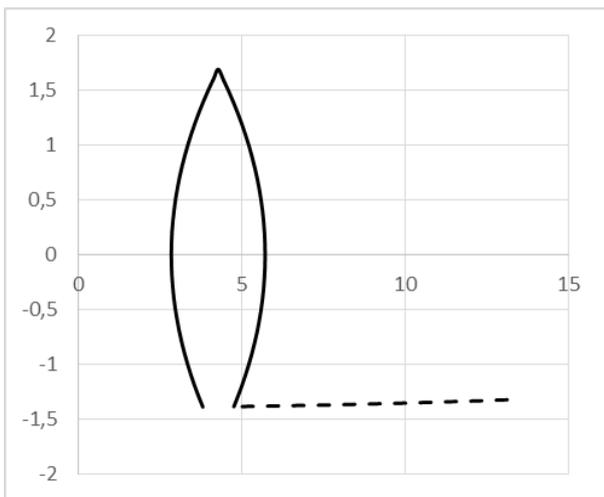


Рис. 4. Фазовые траектории для  $l=70$

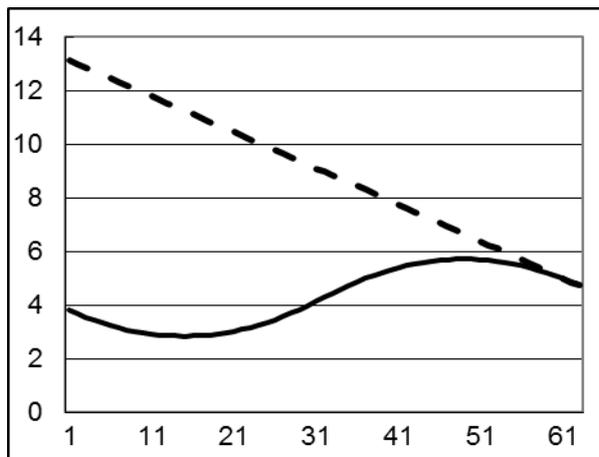


Рис. 5. Временные характеристики для  $l=70$

На рис. 4, 5 сплошной линией показано движение линии визирования, штриховой – линии направления на цель.

На рис. 6, 7 приведены другие возможные варианты фазовых траекторий при двухэтапном развороте в зависимости от начальных условий.

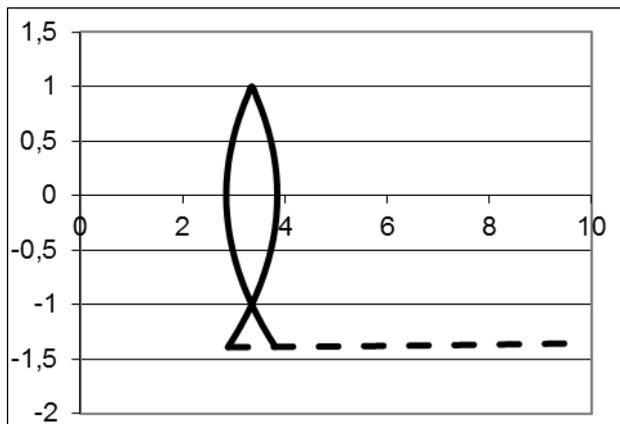


Рис. 6. Фазовые траектории для  $l=50$

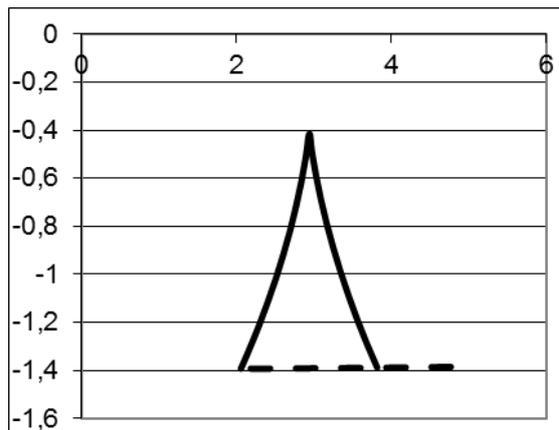


Рис. 7. Фазовые траектории для  $l=25$

Если в процессе расчета двухэтапного разворота угловая скорость линии визирования в момент переключения превышает максимально допустимую угловую скорость, то разворот следует производить в три этапа. Соответствующее управление во временной области приведено на рис. 8, на фазовой плоскости – на рис. 9.

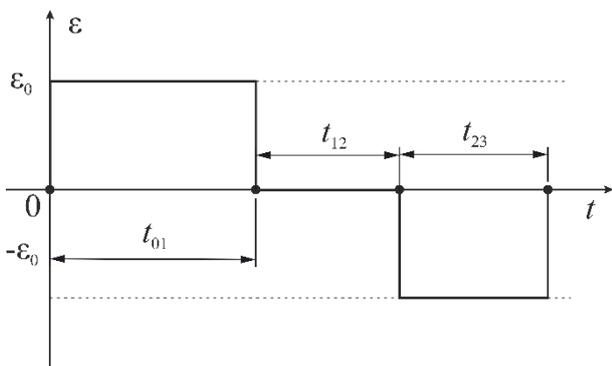


Рис. 8. Временные характеристики трехэтапного разворота

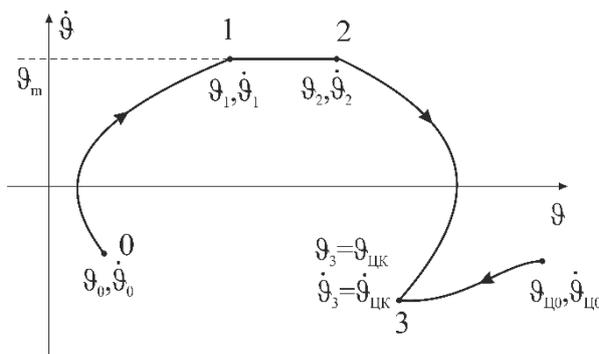


Рис. 9. Фазовые траектории трехэтапного разворота

При трехэтапном развороте в течение времени  $t_{01}$  происходит разгон КА в нужном направлении с максимальным угловым ускорением, далее в течение времени  $t_{12}$  происходит его движение по инерции с максимально допустимой угловой скоростью, затем в течение времени  $t_{23}$  торможение с максимальным ускорением.

Система уравнений, описывающая процесс перевода КА имеет вид:

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 + \dot{\vartheta}_0 t_{01} + 0,5\varepsilon_0 t_{01}^2, \quad (29)$$

$$\dot{\vartheta}_1 = \dot{\vartheta}_0 + \varepsilon_0 t_{01}, \quad (30)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + \dot{\vartheta}_1 t_{12}, \quad (31)$$

$$\dot{\vartheta}_2 = \dot{\vartheta}_1, \quad (32)$$

$$\vartheta_3 = \vartheta_2 + \dot{\vartheta}_2 t_{23} - 0,5\varepsilon_0 t_{23}^2, \quad (33)$$

$$\dot{\vartheta}_3 = \dot{\vartheta}_2 - \varepsilon_0 t_{23}. \quad (34)$$

Поскольку  $\dot{\vartheta}_1 = \dot{\vartheta}_m$ , из выражения (30) находим время  $t_{01}$

$$t_{01} = \frac{\dot{\vartheta}_m - \dot{\vartheta}_0}{\varepsilon_0}. \quad (35)$$

Пункты 1–3, 9–11 итерационного решения трехэтапного разворота ничем не отличаются от решения двухэтапного разворота. Пункты 4–8 выглядят следующим образом:

4. По выражению (35) определяем время разгона  $t_{01}$ .

5. По выражению (30) определяем угол наклона линии визирования в момент достижения максимально допустимой угловой скорости  $\dot{\vartheta}_1$ .

6. Используя выражение (34), находим время торможения  $t_{23}$ .

$$t_{23} = \frac{\dot{\vartheta}_m - \dot{\vartheta}_{\text{цк}}}{\varepsilon_0}.$$

7. Используя соотношение (33) определяем угол наклона линии визирования в момент начала торможения

$$\vartheta_2 = \vartheta_{\text{цк}} + \dot{\vartheta}_m t_{23} + 0,5\varepsilon_0 t_{23}^2$$

и определяем время движения по инерции.

8. По соотношениям (33), (34) находим угол линии визирования  $\vartheta_3$ , ее угловую скорость  $\dot{\vartheta}_3$  в момент выключения и определяем фактическое значение времени выключения

$$t_{\text{к1}} = t_{01} + t_{12} + t_{23}.$$

Для получения формул приближенного расчета при трехэтапном развороте используем допущение  $\dot{\vartheta}_0 = \dot{\vartheta}_{\text{цк}}$ , тогда время разгона и время торможения можно считать примерно одинаковым

$$\tau = t_{01} = t_{02}, \quad \tau = \frac{\dot{\vartheta}_m - \dot{\vartheta}_0}{\varepsilon_0}. \quad (36)$$

Если подставить значение  $\tau$  в соотношения (29), (31), (33) и учесть граничные условия (1), после математических преобразований можно получить формулу для вычисления времени движения по инерции

$$t_{12} = \frac{53,7(l - 2V\tau) - h \left[ \vartheta_0 + \tau(\dot{\vartheta}_0 + \dot{\vartheta}_m) \right]}{\dot{\vartheta}_m h + 57,3V}. \quad (37)$$

Следует отметить, что необходимость выполнения трехэтапного разворота возникает при сравнительно большом начальном угле наклона линии направления на цель, поэтому пред-

положение о возможности замены тангенса его аргументом вносит погрешности, не позволяющие при расчете по формулам (36), (37) достичь заданной точности. Как правило, эти данные следует использовать в качестве начального приближения при итерационном методе расчета.

## ПРИМЕР 2

Начальное состояние КА: угол наклона линии визирования  $3,81^\circ$ , угловая скорость  $-1,39^\circ/\text{с}$ , высота орбиты  $h = 300$  км, линейная скорость движения по орбите  $V = 7,3$  км/с, максимально возможное угловое ускорение  $1^\circ/\text{с}^2$ , расстояние до следующего объекта наблюдения  $-200$  км.

Воспользуемся приближенным способом решения, для этого по формуле (36) находим

$$\tau = \frac{\dot{\vartheta}_m - \dot{\vartheta}_0}{\varepsilon_0} = 3,39 \text{ с}, \quad t_{01} = t_{23} = 3,39 \text{ с},$$

далее по формуле (37) определяем  $t_{12} = 6,737$  с.

Проверяем условия обеспечения точности:

$$\vartheta_{\text{ЦК}} - \vartheta_3 = 18,662 - 19,382 = -0,72 = -42,2 \text{ угл. мин};$$

$$\dot{\vartheta}_{\text{ЦК}} - \dot{\vartheta}_3 = -1,251 - (-1,388) = 0,136 = 8,16 \text{ угл. мин./с}.$$

Показатель  $c$  равняется 0,537.

Если условия по точности не удовлетворяют заданным требованиям, применяем итерационный способ поиска решения, при этом выбираем 0 в качестве начального приближения и метод половинного деления для поиска. Результаты решения представлены в табл. 3.

Таблица 3

### Результаты решения итерационным способом (к примеру 2)

Итерация	$t_K$	$t_{K1}$	$t_{01}$	$t_{12}$	$t_{23}$
1	0	20,006	3,388	13,653	2,965
2	10,003	14,965	3,388	8,395	3,182
3	12,484	13,547	3,388	6,927	3,232
4	13,015	13,234	3,388	6,604	3,242
5	13,125	13,170	3,388	6,538	3,244
6	13,147	13,156	3,388	6,524	3,245
7	13,152	13,154	3,388	6,521	3,245

Для поиска решения потребовалось семь итераций, результат  $-t_{01} = 3,388$  с,  $t_{12} = 6,521$  с,  $t_{23} = 3,245$  с,  $t_K = 13,154$  с. Система отработала без ошибки по углу и угловой скорости в пределах разрядности таблицы. Показатель  $c$  равняется 0,0000054.

Решение задачи при выборе в качестве начального приближения  $t_K = 14,0$  с, полученного в результате приближенного способа решения представлено в табл. 4.

Таблица 4

### Результаты решения приближенным способом (к примеру 2)

Итерация	$t_K$	$t_{K1}$	$t_{01}$	$t_{12}$	$t_{23}$
1	14,000	12,648	3,388	6,000	3,260
2	13,324	13,052	3,388	6,416	3,248
3	13,188	13,132	3,388	6,499	3,245
4	13,160	13,149	3,388	6,516	3,245
5	13,154	13,152	3,388	6,519	3,245

Решение найдено на пятом шаге, результаты практически те же.

Фазовые траектории и переходные процессы приведены на рис. 10 и 11 соответственно.

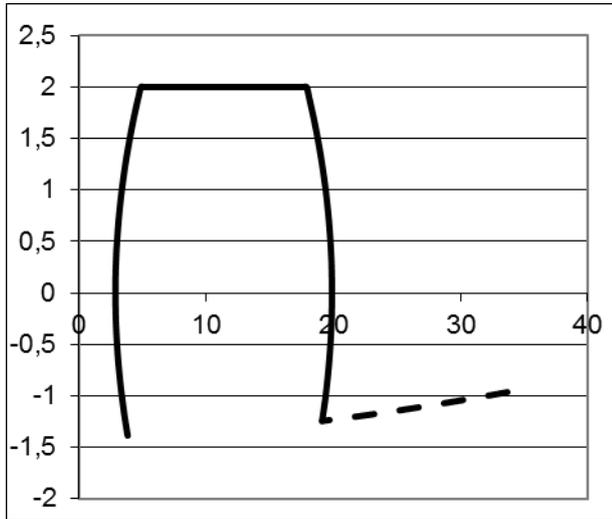


Рис. 10. Фазовые траектории для  $l=200$

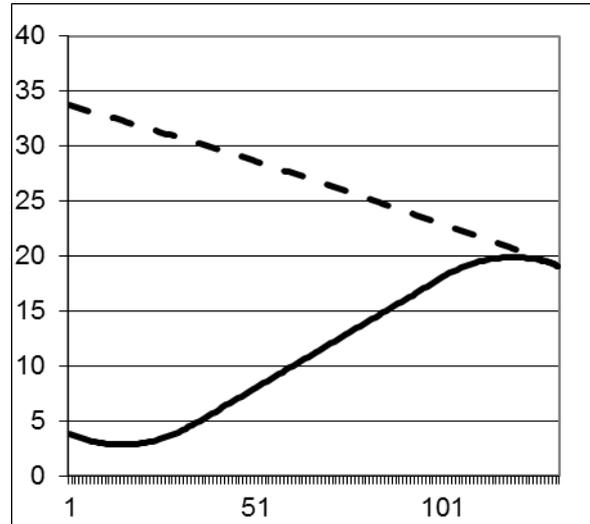


Рис. 11. Временные характеристики для  $l=200$

На рис. 10, 11 сплошной линией показано движение линии визирования, штриховой – линии направления на цель.

Рассмотренные ранее процессы возможны при выполнении условия

$$\vartheta_{ц0} > \vartheta_0.$$

Естественно, при выполнении условия

$$\vartheta_{ц0} = \vartheta_0$$

поворот не выполняется, поскольку линия визирования уже направлена на цель.

Условие

$$\vartheta_{ц0} < \vartheta_0$$

означает, что КА пролетел над целью и необходимо производить разворот вдогонку, соответствующее управление приведено на рис. 12, фазовые траектории на рис. 13.

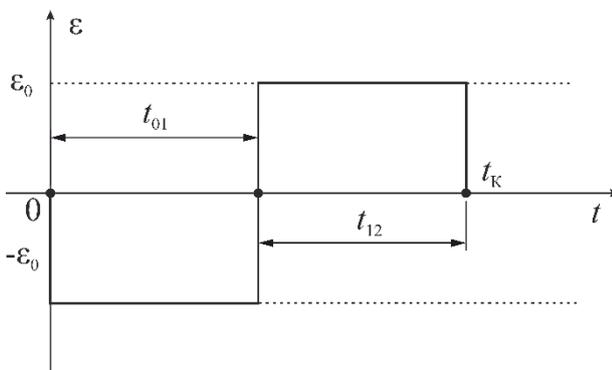


Рис. 12. Оптимальное по быстродействию двухэтапное управление вдогонку

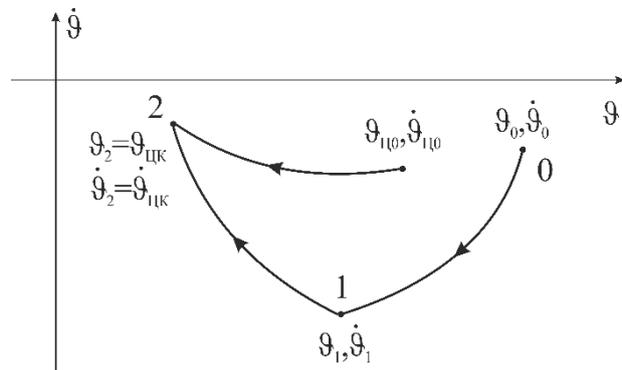


Рис. 13. Фазовые траектории двухэтапного разворота вдогонку

Двухэтапный разворот вдогонку возможен в очень узком диапазоне начальных углов в силу ограничения на максимальную угловую скорость, поэтому основным является трехэтапный разворот вдогонку.

Соответствующее управление приведено на рис. 14, фазовые траектории – на рис. 15.

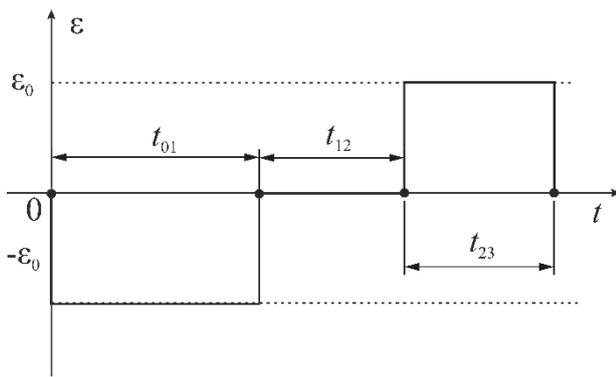


Рис. 14. Оптимальное по быстродействию трехэтапное управление вдогонку

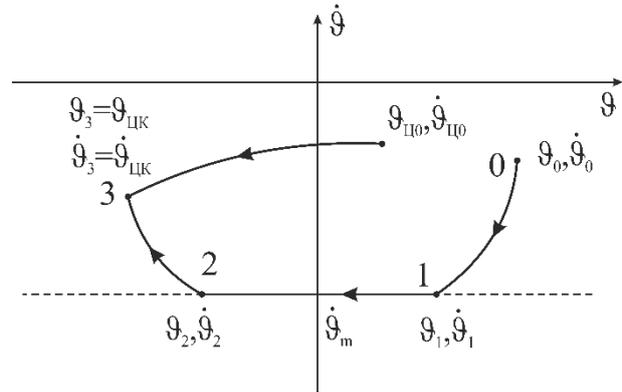


Рис. 15. Фазовые траектории трехэтапного разворота вдогонку

Соотношения для итерационного и упрощенного методов расчета разворотов вдогонку могут быть получены по аналогии с соответствующими вышеприведенными выкладками для встречных разворотов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы позволяют решить задачу определения траектории оптимального по быстродействию разворота КА наблюдения, обеспечивающую в конечной точке равенство углов и угловых скоростей линии визирования аппаратуры наблюдения и линии направления на цель. Для работы алгоритмов требуется выполнение элементарных математических и логических операций, поэтому необходимые расчеты просто реализовать стандартными бортовыми вычислительными устройствами. Моделирование показало, что разработанный упрощенный алгоритм зачастую позволяет получить решение, удовлетворяющее заданным условиям по точности, в противном случае целесообразно использовать полученное решение в качестве начального приближения для итерационного алгоритма. Результат расчетов позволяет сформировать управление по разомкнутой схеме. Особый интерес представляет разработка алгоритма и устройства для управления по замкнутой схеме, обеспечивающих разворот КА в условиях действия возмущений и отклонения фактических параметров КА от их расчетных значений. Однако это предмет отдельного исследования и выходит за рамки настоящей статьи.

## Список используемых источников

1. Власов В.А., Горбулин В.И., Зозуля Л.П. Расчет оптимального по быстродействию перенацеливания оптико-электронной аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. – 2009. – № 1. – С. 71–82.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
3. Управление космическими аппаратами зондирования Земли / Д.И. Козлов, Г.П. Аншаков, Я.А. Мостовой и др. – М.: Машиностроение, 1998 – 366 с.
4. Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. – М.: Наука, 1974. – 600 с.
5. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов – М.: Машиностроение, 1977. – 472 с.

6. *Бранец В.Н., Казначеев Ю.В., Черток М.Б.* Оптимальный разворот твердого тела с одной осью симметрии // *Космические исследования*. – М.: Наука, 1984. – Т. XXII, вып. 3. – С. 352–360.

7. *Мануйлов Ю.С.* Теория управления пространственным угловым маневрированием космических аппаратов с упругими элементами конструкции. – СПб.: МО РФ, 2001. – 497 с.

8. Управление угловым движением КА ДЗЗ / Г.П. Аншаков, А.И. Мантуров, Ю.М. Усталов и др. // *Полёт: общероссийский научно-технический журнал*. – 2006. – № 6. – С. 12–18.

9. *Галкина А.С.* Оценка возможности формирования программ управления угловым движением КА ДЗЗ для съёмки криволинейных маршрутов // *Полёт: общероссийский научно-технический журнал*. – 2010. – № 8. – С 48–53.

Н.В. Груздев,  
*кандидат военных наук, доцент;*  
К.А. Крупский,  
*кандидат техн. наук;*  
А.С. Шавин,  
*кандидат техн. наук*

## **МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ БАЗЫ ПОЛИГОНА (КОСМОДРОМА) В СООТВЕТСТВИИ С ПОТРЕБНОСТЯМИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Разработана методика обоснования рационального состава экспериментально-испытательной базы полигона (космодрома) на основе декомпозиции многомерной задачи формирования состава комплексов экспериментально-испытательной базы, участвующих в испытаниях космических средств.

Ключевые слова: экспериментально-испытательная база, космические средства, показатель качества, показатель эффективности, испытательный полигон (космодром).

### **ВВЕДЕНИЕ**

Обоснование и формирование планов развития системы вооружения Вооруженных Сил Российской Федерации осуществляется в рамках действующей системы программно-целевого планирования военно-технического обеспечения обороны и безопасности Российской Федерации. Основным этапом научно-методического обеспечения мероприятий технического оснащения Вооруженных Сил Российской Федерации является формирование по уточненным объемам финансирования рационального варианта развития системы вооружения Вооруженных Сил Российской Федерации [1].

Основным инструментом проведения испытаний образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) является экспериментально-испытательная база (ЭИБ), представляющая собой совокупность технических средств испытательного полигона (космодрома), предназначенная для решения задач испытаний разрабатываемых, серийно производимых и находящихся в эксплуатации образцов ВВСТ.

Космические средства (КСр) относятся к сложным образцам ВВСТ, их разработка и производство являются наукоемкими и трудоемкими процессами. Как любой образец ВВСТ, перед принятием на вооружение и серийным производством КСр проходят цикл испытаний, в том числе и летные испытания. Испытания КСр представляют собой сложную и многообразную систему мероприятий и являются основным источником информации для обоснования принимаемых решений при создании новых и модернизации существующих образцов КСр.

В связи с тем, что существует множество вариантов состава экспериментально-испытательной базы как сложной организационно-технической системы, возникает необходимость определения рационального варианта состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр. Рациональность состава ЭИБ понимается в определенном количестве элементов (комплексов) ЭИБ полигона (космодрома), при котором обеспечивается решение задач обеспечения испытаний КСр с качеством не ниже требуемого при ресурсных ограничениях на реализацию такого состава ЭИБ полигона (космодрома).

Существующие методические подходы к формированию состава ЭИБ испытательных полигонов (космодромов) в соответствии с потребностями обеспечения испытаний ВВСТ,

в общем случае, представляют собой совокупность взаимосвязанных методик и моделей, позволяющих на основе сформированных исходных данных реализовать многоэтапную процедуру формирования рационального состава ЭИБ испытательного полигона (космодрома) [2].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В формализованном виде задача определения рационального состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр может быть записана в виде

$$\begin{cases} F(\mathbf{x}) \rightarrow \max, & \mathbf{x} \in M_{\mathbf{x}}; \\ C(\mathbf{x}) \leq C_{\text{выд}}^{\text{ЭИБ}}, & \mathbf{x} \in M_{\mathbf{x}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор параметров (тактико-технических характеристик (ТТХ)) средств ЭИБ, участвующих в испытаниях КСр,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ ;

$M_{\mathbf{x}}$  – множество, определяемое технологическими возможностями предприятий промышленности, разрабатывающих средства ЭИБ;

$F(\mathbf{x})$  – показатель эффективности функционирования состава ЭИБ;

$C(\mathbf{x})$  – затраты на реализацию рационального состава ЭИБ;

$C_{\text{выд}}^{\text{ЭИБ}}$  – объем ассигнований, выделяемых на формирование состава ЭИБ.

Так как экспериментально-испытательная база является сложной организационно-технической системой, включающей в свой состав разнотипные системы, комплексы и средства, то попытка прямого решения задачи (1) не приведет к получению результата ввиду большой размерности вектора  $\mathbf{x}$  [1].

Одним из возможных подходов к решению многомерной задачи (1) является использование декомпозиции [3].

Для реализации такого подхода необходимо ввести частные показатели эффективности функционирования комплексов ЭИБ испытательных полигонов (космодромов) вида

$$u_i(\mathbf{x}), \quad i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

где  $I$  – количество комплексов ЭИБ испытательных полигонов (космодромов), участвующих в испытаниях КСр.

Предположим, что

$$F(\mathbf{x}) = F^*(\mathbf{u}), \quad (3)$$

где функция  $F^*(\mathbf{u})$  определена на множестве  $M_{\mathbf{u}} = \mathbf{u}(M_{\mathbf{x}})$  значений вектор-функции  $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = (u_1(\mathbf{x}), \dots, u_I(\mathbf{x}))$ .

Тогда, если  $O_{\mathbf{u}}$  – множество оптимальных векторов из  $M_{\mathbf{u}}$ , то  $O_{\mathbf{x}}$  – множество векторов  $\mathbf{x} \in M_{\mathbf{x}}$ , для которых  $\mathbf{u}(\mathbf{x}) \in O_{\mathbf{u}}$ . Следовательно задаче (1) возможно сопоставить задачу:

$$F(\mathbf{x}) \rightarrow \max, \quad \mathbf{x} \in O_{\mathbf{x}}. \quad (4)$$

Таким образом, декомпозиция задачи (1) осуществляется в два этапа:

– нахождение векторов  $\mathbf{x} \in O_{\mathbf{x}}$ ;

– решение задачи (4).

Первый этап не зависит от функции  $F(\mathbf{x})$  и связан с вычислениями значений  $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ .

На втором этапе, если  $F(\mathbf{x})$  представлена в виде (3), вместо (4) решается задача

$$F^*(\mathbf{u}) \rightarrow \max, \quad \mathbf{u} \in O_{\mathbf{u}}. \quad (5)$$

Каждое решение задачи (5) будет являться решением исходной задачи.

Таким образом, для формирования рационального состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр необходимо уточнить частные показатели эффективности  $u_i(\mathbf{x})$  за счет уточнения показателей качества средств из состава комплексов ЭИБ испытательных полигонов (космодромов).

## МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ БАЗЫ

Исходными данными для формирования рационального состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр являются:

- тактико-технические требования (ТТТ), предъявляемые к образцам КСр, испытания которых предстоят в планируемом программном периоде;
- условия проведения испытаний образцов КСр в планируемом программном периоде [4];
- военно-технические исходные данные об имеющихся на испытательных полигонах (космодромах) средствах ЭИБ, их дислокация и ТТХ [5];
- информация о мероприятиях развития испытательного комплекса Минобороны России, содержащихся в государственной программе вооружения (ГПВ).

На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема методики обоснования рационального состава ЭИБ полигона (космодрома).

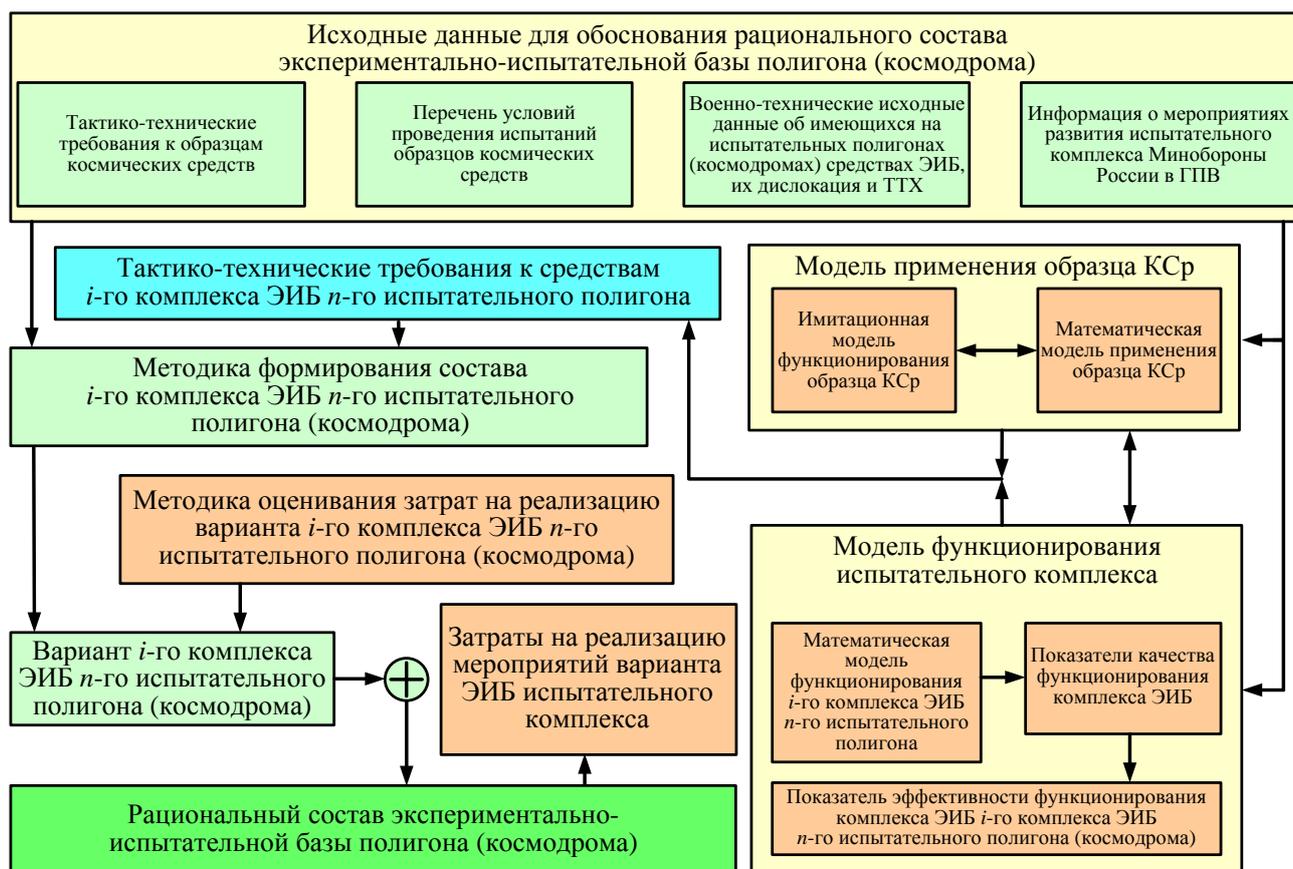


Рис. 1. Обобщенная структурная схема методики обоснования рационального состава экспериментально-испытательной базы полигона (космодрома)

Выбор определенных комплексов ЭИБ различных испытательных полигонов (космодромов) осуществляется исходя из решения задачи обеспечения в полном объеме испытания образцов КСр в программном периоде.

Для формирования требований к средствам ЭИБ испытательных полигонов (космодромов) используются данные о ТТТ, предъявляемых к образцам КСр, а также данные об условиях проведения испытаний таких образцов вооружения.

Данная информация используется в качестве входных данных для модели применения образца КСр, которая включает:

- имитационную модель функционирования образца КСр;
- математическую модель применения образца КСр.

Имитационная модель функционирования образца КСр должна включать в свой состав статистические модели из состава моделирующих комплексов испытательных полигонов (космодромов). Математические модели классифицируются в соответствии с требованиями [6].

Совместное использование моделей применения образца КСр с моделью функционирования испытательного комплекса ЭИБ позволяет на основе полученных показателей качества комплексов ЭИБ испытательного полигона (космодрома) сформировать показатели эффективности таких комплексов ЭИБ.

Тактико-технические требования к образцам КСр и рассчитанные с использованием приведенных выше моделей показатели эффективности комплексов ЭИБ испытательных полигонов (космодромов) являются основой для обоснования и формирования рационального состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр.

Таким образом, при решении частных задач в интересах формирования рационального состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр необходимо рассматривать  $N$  испытательных полигонов (космодромов), средства ЭИБ которых входят в состав комплексов, обеспечивающих испытания КСр.

Тогда для решения задачи формирования рационального состава ЭИБ необходимо использовать следующие исходные данные:

– общий объем ассигнований, выделяемых на формирование состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр ( $C_{\text{выд}}^{\text{ЭИБ}}$ ) в программном периоде;

–  $N$  – количество испытательных полигонов (космодромов), средства ЭИБ которых планируются к обеспечению испытаний  $K$  образцов КСр;

–  $I_n$  – количество комплексов ЭИБ  $n$ -го испытательного полигона (космодрома), средства которых планируются к обеспечению испытаний образцов КСр;

–  $P_{in}^k$  – признак участия  $i$ -го комплекса ЭИБ  $n$ -го испытательного полигона (космодрома) в обеспечении испытаний  $k$ -го образца КСр ( $P_{in}^k = 0$  или 1);

–  $L_{ji}^n$  – количество имеющихся средств  $j$ -го типа  $i$ -го комплекса ЭИБ на  $n$ -м испытательном полигоне (космодроме), планируемых к обеспечению испытаний образцов КСр;

–  $u_{ink}$  – значение показателя эффективности функционирования  $i$ -го комплекса ЭИБ  $n$ -го испытательного полигона (космодрома) для решения задачи обеспечения испытаний  $k$ -го образца КСр;

–  $u_{ink}^{\min}$  – значение минимально допустимого показателя эффективности функционирования  $i$ -го комплекса ЭИБ  $n$ -го испытательного полигона (космодрома) для решения задачи обеспечения испытаний  $k$ -го образца КСр;

–  $S_{ji}$  – количество средств  $j$ -го типа  $i$ -го комплекса ЭИБ, разрабатываемых в программном периоде;

–  $S_{ji}^*$  – количество средств  $j$ -го типа  $i$ -го комплекса ЭИБ, предлагаемых к разработке в планируемом программном периоде.

Затраты на реализацию рационального состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр рассчитываются по формуле

$$C_{\Sigma}^{\text{ЭИБ}} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (C_{ji}^{\text{ОКР}} + C_{ji}^{\text{сер}} + C_{ji}^{\text{рем}}), \quad (6)$$

где  $C_{ji}^{\text{ОКР}}$  – затраты на создание средства  $j$ -го типа  $i$ -го комплекса ЭИБ;

$C_{ji}^{\text{сер}}$  – затраты на серийное производство средства  $j$ -го типа  $i$ -го комплекса ЭИБ;

$C_{ji}^{\text{рем}}$  – затраты на ремонт и сервисное обслуживание средства  $j$ -го типа  $i$ -го комплекса ЭИБ.

Требуемое количество средств  $i$ -го комплекса ЭИБ  $n$ -го испытательного полигона (космодрома) для обеспечения испытаний  $k$ -го образца КСр рассчитывается с помощью выражения вида

$$M_{ki}^n = \sum_{j=1}^J (L_{ji}^n + S_{ji} + S_{ji}^*), \quad (7)$$

где  $J$  – количество типов средств комплекса ЭИБ.

Значения показателей эффективности  $u_{ink}$  и минимально допустимые  $u_{ink}^{\min}$  значения показателей эффективности функционирования комплексов ЭИБ рассчитываются по отдельным частным методикам для декомпозиции многомерной задачи (1).

Таким образом, алгоритм формирования рационального состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр включает следующие основные этапы:

1. На основе исходных данных определяются возможности существующей ЭИБ по обеспечению испытаний КСр.

2. При наличии дисбаланса между возможностями и потребностями определяются возможные пути и сроки его устранения (модернизация существующих средств ЭИБ, разработка новых средств ЭИБ).

3. Определяются требуемые объемы ремонта существующих либо поставок вновь произведенных средств ЭИБ.

4. С учетом результатов, полученных на втором шаге алгоритма, определяются сроки и объемы поставок вновь разработанных средств ЭИБ для замены существующих.

5. Проводится технико-экономическая оценка сформированных на шагах 2 – 4 мероприятий (определяются объемы финансирования каждого из программных мероприятий и рационального варианта в целом).

6. Проводится системная увязка мероприятий создания (модернизации), поставок и ремонта средств ЭИБ и формируется в окончательном виде рациональный состав ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр.

7. При отрицательном результате оценки (невозможности разработки средств ЭИБ с требуемыми ТТХ, в требуемые сроки, с заданной стоимостью разработки или серийного производства) процедура формирования варианта повторяется с шага 3.

Для выбора рационального состава ЭИБ полигона (космодрома) рассчитаны максимальные и определены минимально допустимые показатели эффективности функционирования комплексов ЭИБ для обеспечения испытаний образцов КСр.

Результаты расчета показателей эффективности функционирования комплексов ЭИБ при формировании рационального состава ЭИБ полигона (космодрома) в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Показатели эффективности функционирования комплексов ЭИБ**

Испытательный полигон (космодром) ( $n = 1$ )									...	Испытательный полигон (космодром) ( $n = N$ )								
Испытываемый образец КСр ( $k = 1$ )				...	Испытываемый образец КСр ( $k = m_1$ )				...	Испытываемый образец КСр ( $k = m_N$ )				...	Испытываемый образец КСр ( $k = K_N$ )			
1	2	...	$i$	...	1	2	...	$i$	...	1	2	...	$i$	...	1	2	...	$i$
$u_{11}$	$u_{12}$		$u_{1i}$	...	$u_{m_1 1}$	$u_{m_1 2}$		$u_{m_1 i}$	...	$u_{m_N 1}$	$u_{m_N 2}$		$u_{m_N i}$	...	$u_{K_1 1}$	$u_{K_1 2}$		$u_{K_1 i}$
		$P_1$		...			$P_{m_1}$		...			$P_{m_N}$		...			$P_{K_N}$	
$u_{11}^{мд}$	$u_{12}^{мд}$		$u_{1i}^{мд}$		$u_{m_1 1}^{мд}$	$u_{m_1 2}^{мд}$		$u_{m_1 i}^{мд}$		$u_{m_N 1}^{мд}$	$u_{m_N 2}^{мд}$		$u_{m_N i}^{мд}$		$u_{K_1 1}^{мд}$	$u_{K_1 2}^{мд}$		$u_{K_1 i}^{мд}$

Формирование состава ЭИБ полигона (космодрома) в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр осуществляется по критерию максимума эффективности без превышения затрат на реализацию состава ЭИБ в соответствии с постановкой задачи (1).

При невозможности обеспечения минимально допустимого показателя эффективности функционирования комплексов ЭИБ осуществляется корректировка исходных данных.

Затраты на реализацию состава ЭИБ полигона (космодрома) могут рассчитываться с использованием подходов, изложенных в работе [7].

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предлагаемая методика позволяет решить задачу обоснования рационального состава ЭИБ испытательного полигона (космодрома) в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр. При этом учитываются особенности проведения испытаний ракетно-космической техники. Также в задаче обоснования рационального состава ЭИБ с использованием разработанной методики учитываются:

- показатели качества средств ЭИБ полигона (космодрома);
- показатели эффективности функционирования комплексов ЭИБ полигона (космодрома);
- математические модели функционирования комплексов ЭИБ, а также математические модели функционирования и применения образцов КСр;
- методические подходы к оцениванию затрат на формирование ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр.

Необходимо отметить, что модели функционирования комплексов ЭИБ должны включать различные методы и алгоритмы обработки (оценивания) информации об объектах испытаний.

Использование частных показателей эффективности функционирования ЭИБ испытательных полигонов (космодромов), рассчитанных по отдельным частным методикам, позволяет декомпозировать многомерную задачу формирования рационального состава ЭИБ в соответствии с потребностями обеспечения испытаний КСр.

### Список используемых источников

1. Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе / под ред. В.М. Буренка. – М.: Граница, 2013. – 519 с.
2. Буренок В.М., Косенко А.А., Лавринов Г.А. Техническое оснащение Вооруженных Сил Российской Федерации: организационные, экономические и методологические аспекты. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.
3. Цурков В.И. Декомпозиция в задачах большой размерности. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1981. – 352 с.
4. Гальцов Е.М., Минаев В.Н., Тунгушаев А.Т. Методология обоснования задач испытаний и перспектив развития полигонного испытательного комплекса МО РФ. – М.: ФГУП «ВИМИ», 2007. – 154 с.
5. Буренок В.М., Найденов В.Г., Поляков В.И. Математические методы и модели в теории информационно-измерительных систем. – М.: Машиностроение, 2011. – 336 с.
6. ГОСТ 57412–2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. – М.: Стандартинформ, 2017. – 16 с.
7. Буренок В.М., Лавринов Г.А., Подольский А.Г. Оценка стоимостных показателей высокотехнологичной продукции. – М.: Граница, 2012. – 423 с.

А.А. Донцов,

*доктор техн. наук, доцент*

ВУНЦ ВВС «ВВА» имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж;

М.А. Караваев,

*кандидат техн. наук, старший научный сотрудник*

ВУНЦ ВВС «ВВА» имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж;

Д.А. Нагалин,

ВУНЦ ВВС «ВВА» имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж;

О.Ю. Тонконогов

ВУНЦ ВВС «ВВА» имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж

## **ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ОПОРНОГО КАНАЛА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗАЩИТЫ ОТ СРЕДСТВ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОРАЖЕНИЯ**

С использованием теории ошибок измерений получены выражения для оценки угловых погрешностей определения углового положения виртуального опорного канала и дальности до летательного аппарата. Обоснованы требования к точности определения координат летательных аппаратов при проведении летных экспериментов по оценке эффективности авиационных комплексов защиты от средств высокоточного поражения.

Ключевые слова: авиационный комплекс защиты, высокоточное поражение, виртуальный опорный канал.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время разрабатывается множество авиационных комплексов защиты летательных аппаратов (ЛА) от средств высокоточного поражения [1, 2], в связи с этим актуализируется задача по испытанию таких средств защиты. В работе [3] предложено использовать виртуальный опорный канал при проведении испытаний наземных комплексов защиты от авиационных средств высокоточного поражения с применением летающей лаборатории (ЛЛ) и размещенной на борту оптической системы самонаведения. Суть способа формирования виртуального опорного канала заключается в высокоточном определении координат ЛА и ЛЛ, определении ориентации в пространстве ЛЛ в текущий момент времени. Обобщив зарегистрированную информацию на борту ЛЛ, определяется взаимное положение ЛА в пространстве, угловые положения линии визирования оптической системы самонаведения на объект защиты (ЛА с авиационным комплексом защиты) в текущий момент времени. При этом текущие значения промаха относительно точки прицеливания оцениваются на основе расчета текущей дальности от ЛЛ до ЛА и углового рассогласования между положением виртуального опорного канала и оптической системой самонаведения.

Предложенный способ и границы его применения определяются точностью регистрации исходных данных для формирования виртуального опорного канала (координат ЛА и углового положения ЛЛ в пространстве). Для определения границ использования предложенного способа при испытаниях авиационных комплексов защиты необходимо оценить погрешность формирования виртуального опорного канала.

*Цель данной работы* – провести оценку погрешностей формирования виртуального опорного канала при испытаниях авиационных комплексов защиты от высокоточных средств поражения.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предположим, что координаты оптической системы самонаведения, размещенной на летающей лаборатории (ЛА № 1), определяются с использованием средств высокоточного навигационно-временного обеспечения  $x_1, y_1, z_1$  (точка А на рис. 1), аналогично определяются координаты летательного аппарата с размещенным на его борту авиационным комплексом защиты (ЛА № 2)  $x_2, y_2, z_2$  (точка О на рис. 1). Данные о параметрах полета ЛА № 2 передаются на ЛА № 1 по специализированному радиоканалу передачи данных. Угловая ориентация строительной оси системы самонаведения относительно горизонтальной и вертикальной плоскостей определяется с использованием гироскопа, размещенного на ЛА № 1, и равна  $\alpha$  и  $\beta$ .

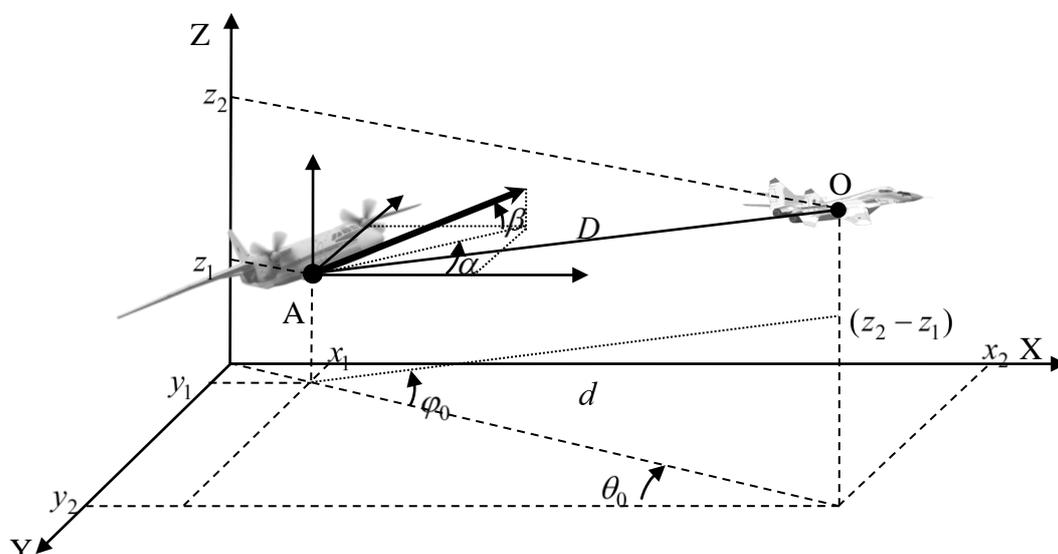


Рис. 1. Расположение летательных аппаратов в пространстве при проведении летного эксперимента

Угловое положение линии визирования системы самонаведения (виртуального опорного канала), осуществляющей сопровождение ЛА № 2, с учетом углового положения линии дальности до цели  $\theta_0, \varphi_0$ , определяется выражениями:

$$\theta_0 = \arctg \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} + \alpha; \quad \varphi_0 = \arctg \frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} + \beta. \quad (1)$$

Наклонная дальность от ЛА до точки прицеливания находится по выражению

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (2)$$

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Согласно работе [4] введем в рассмотрение погрешности определения координат авиационного объекта защиты, координат системы самонаведения и ее углового положения  $\Delta\alpha, \Delta\beta$ . Полагая их малыми относительно истинных значений, осуществляя разложение выра-

жений (1), записанных в приращениях, в ряд Тейлора и исключив из рассмотрения члены разложения 2-го и более порядков, получим выражения для расчета погрешностей определения углового положения и наклонной дальности для виртуального опорного канала в векторно-матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\varphi \\ \Delta D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial\theta}{\partial x_1} & \frac{\partial\theta}{\partial y_1} & 0 & \frac{\partial\theta}{\partial x_2} & \frac{\partial\theta}{\partial y_2} & 0 & \frac{\partial\theta}{\partial\alpha} & 0 \\ \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} & \frac{\partial\varphi}{\partial y_1} & \frac{\partial\varphi}{\partial z_1} & \frac{\partial\varphi}{\partial x_2} & \frac{\partial\varphi}{\partial y_2} & \frac{\partial\varphi}{\partial z_2} & 0 & \frac{\partial\varphi}{\partial\beta} \\ \frac{\partial D}{\partial x_1} & \frac{\partial D}{\partial y_1} & \frac{\partial D}{\partial z_1} & \frac{\partial D}{\partial x_2} & \frac{\partial D}{\partial y_2} & \frac{\partial D}{\partial z_2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \\ \Delta\alpha \\ \Delta\beta \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Умножив матрицы в правой части выражения (3) и усреднив квадраты правых и левых частей, получим в общем виде выражения для дисперсий погрешностей определения углового положения и наклонной дальности виртуального опорного канала:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}^2 &= \left(\frac{\partial\theta}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial y_1}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial y_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial\alpha}\right)^2 \sigma_{\alpha}^2, \\ \sigma_{\varphi}^2 &= \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y_1}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z_1}\right)^2 \sigma_{z_1}^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z_2}\right)^2 \sigma_{z_2}^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\beta}\right)^2 \sigma_{\beta}^2, \\ \sigma_D^2 &= \left(\frac{\partial D}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial y_1}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial z_1}\right)^2 \sigma_{z_1}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial y_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial z_2}\right)^2 \sigma_{z_2}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\sigma_{x_1}^2$ ,  $\sigma_{y_1}^2$ ,  $\sigma_{z_1}^2$  – дисперсии погрешностей определения координат ЛА №1;

$\sigma_{x_2}^2$ ,  $\sigma_{y_2}^2$ ,  $\sigma_{z_2}^2$  – дисперсии погрешностей определения координат ЛА №2;

$\sigma_{\alpha}^2$ ,  $\sigma_{\beta}^2$  – дисперсии погрешностей определения углового ЛА №1 относительно горизонтальной и вертикальной плоскостей;

$\sigma_D^2$  – дисперсия погрешности определения наклонной дальности строительной оси системы самонаведения.

Рассчитав частные производные функций (1), (2) и подставив в формулу (3), получим выражения для расчета СКО погрешностей определения углового положения виртуального опорного канала и дальности:

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{\frac{(y_2 - y_1)^2}{((y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2)^2} (\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2) + \frac{(x_2 - x_1)^2}{((y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2)^2} (\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2) + \sigma_{\alpha}^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{(z_2 - z_1)^2 (x_2 - x_1)^2}{d^2 D^4} (\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2) + \frac{(z_2 - z_1)^2 (y_2 - y_1)^2}{d^2 D^4} (\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2) + \frac{(\sigma_{z_2}^2 + \sigma_{z_1}^2)}{D^4} + \sigma_{\beta}^2},$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{(x_2 - x_1)^2 (\sigma_{x_2}^2 + \sigma_{x_1}^2) + (y_2 - y_1)^2 (\sigma_{y_2}^2 + \sigma_{y_1}^2) + (z_2 - z_1)^2 (\sigma_{z_2}^2 + \sigma_{z_1}^2)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}},$$

где  $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$  – проекция наклонной дальности на горизонтальную плоскость.

Определим координаты системы самонаведения с использованием полярных координат:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_2 - D \cos \varphi_0 \cos \theta_0, \\ y_1 &= y_2 - D \cos \varphi_0 \sin \theta_0, \\ z_1 &= z_2 - D \sin \varphi_0, \end{aligned} \right\} (6)$$

где  $\varphi_0, \theta_0$  – угловые положения ЛА № 2 в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Подставляя выражение (6) в (5), получим:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_0 (\sigma_{x_2}^2 + \sigma_{x_1}^2) + \cos^2 \theta_0 (\sigma_{y_2}^2 + \sigma_{y_1}^2) + D^2 \cos^2 \varphi_0 \sigma_{\alpha}^2}{D^2 \cos^2 \varphi_0}}, \\ \sigma_{\varphi} &= \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi_0 \cos^2 \theta_0 (\sigma_{x_2}^2 + \sigma_{x_1}^2) + \sin^2 \varphi_0 \sin^2 \theta_0 (\sigma_{y_2}^2 + \sigma_{y_1}^2) + \cos^2 \varphi_0 (\sigma_{z_2}^2 + \sigma_{z_1}^2) + D^2 \sigma_{\beta}^2}{D^2}}, \\ \sigma_D &= \sqrt{\cos^2 \varphi_0 \cos^2 \theta_0 (\sigma_{x_2}^2 + \sigma_{x_1}^2) + \cos^2 \varphi_0 \sin^2 \theta_0 (\sigma_{y_2}^2 + \sigma_{y_1}^2) + \sin^2 \varphi_0 (\sigma_{z_2}^2 + \sigma_{z_1}^2)}. \end{aligned} \right\} (7)$$

Выражения (7) позволяют оценить влияние ошибок определения координат по каждой из осей на точность определения углового положения виртуального опорного канала и точность определения наклонной дальности между ЛА с использованием виртуального опорного канала.

### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ОПОРНОГО КАНАЛА

При условии неравноточного определения местоположения ЛА ( $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ ) графики зависимости СКО погрешности определения азимутального положения виртуального опорного канала  $\sigma_{\theta}$  от отношения СКО ошибок определения координат ЛА и точки прицеливания  $\sigma_2/\sigma_1$ , рассчитанные при  $\sigma_{\alpha} = 0,1$  град,  $\sigma_1 = 10$  м,  $\theta_0 = 5$  град,  $\varphi_0 = 5$  град (сплошные линии) и  $\varphi_0 = 15$  град (пунктир), примут вид, показанный на рис. 2.

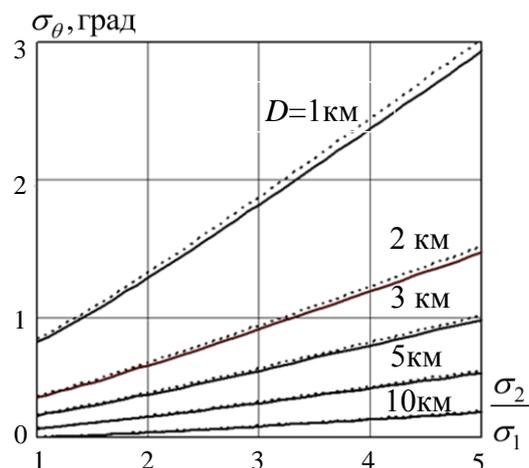


Рис. 2. Зависимость СКО погрешности определения азимутального положения виртуального опорного канала от отношения СКО ошибок определения координат ЛА и точки прицеливания

При тех же условиях и  $\sigma_\beta = 0,1$  град зависимости СКО погрешности определения угломестного положения виртуального опорного канала  $\sigma_\varphi$  от  $\sigma_2/\sigma_1$  примут вид, показанный на рис. 3.

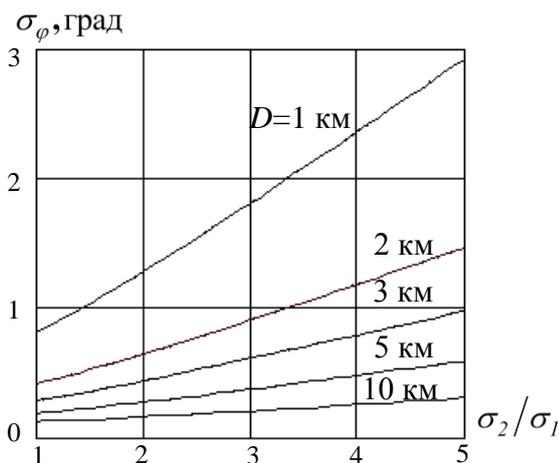


Рис. 3. Зависимость СКО погрешности определения азимутального положения виртуального опорного канала от отношения СКО ошибок определения координат ЛА и точки прицеливания

Анализ графиков на рис. 2 и 3 показывает, что при сокращении удаления до 1 км между ЛА ошибки определения местоположения ЛА будут оказывать значительное влияние на СКО ошибки углового определения положения виртуального опорного канала. Так, на дальности 2 км при СКО ошибки определения местоположения ЛА № 1 10 м и СКО определения ЛА № 2 30 м ошибка определения угломестного положения виртуального опорного канала составит порядка 1 град, на дальности 1 км – порядка 1,8 град.

Графики зависимости СКО погрешности определения дальности между ЛА с использованием виртуального опорного канала от отношения СКО ошибок определения координат ЛА № 2 и ЛА №1  $\sigma_2/\sigma_1$ , рассчитанные при  $\sigma_1 = 10$  м,  $\theta_0 = 5$  град,  $\varphi_0 = 0 \div 45$  град, примут вид, показанный на рис. 4.

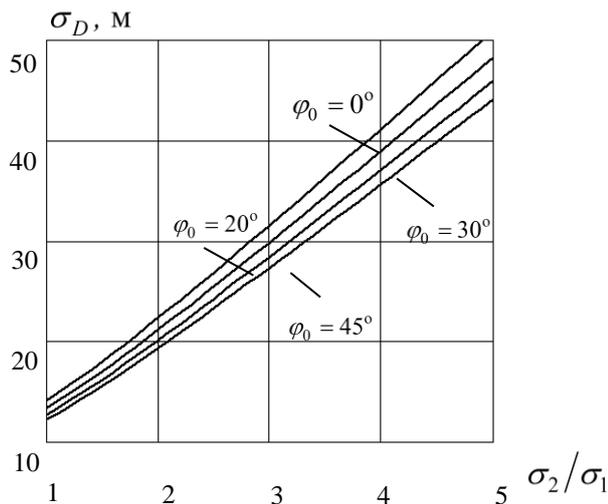


Рис. 4. Зависимость СКО погрешности определения дальности с использованием виртуального опорного канала от отношения СКО ошибок определения координат ЛА и точки прицеливания

Анализ графика показывает, что ошибка определения наклонной дальности между ЛА прямо пропорциональна СКО ошибки определения местоположения ЛА. Так, при отношении СКО ошибки определения местоположения ЛА № 1 10 м, а ЛА № 2 20 м – ошибка определения дальности составит порядка 22 м, при увеличении СКО ошибки определения местоположения до 40 м – ошибка определения дальности составит 40 м.

При рассмотрении случая равноточного определения координат ЛА № 1 и ЛА № 2  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_k^2$  получим соответствующие графики зависимости СКО погрешностей определения азимутального положения виртуального опорного канала  $\sigma_\theta$  от СКО ошибок определения координат ЛА  $\sigma_k$  (рис. 5), рассчитанные при  $\sigma_\alpha = 0,1$  град,  $\theta_0 = 10$  град,  $\varphi_0 = 5$  град.

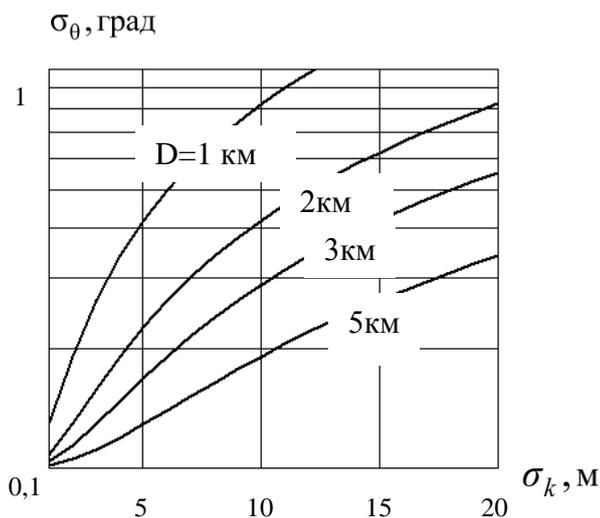


Рис. 5. Зависимость СКО погрешности определения азимутального положения виртуального опорного канала от СКО погрешности определения местоположения ЛА

При условии регистрации координат ЛА и воздушной цели с СКО 10 м на удалении до 5 км СКО погрешности определения азимутального положения виртуального опорного канала составит порядка 0,2 град, с уменьшением дальности до 1 км – порядка 0,8 град.

Знание ошибок определения дальности и углового положения виртуального опорного канала еще не дает ясного представления об ошибках определения промахов системы самонаведения в условиях помех. Очевидно, что граничные требования к линейным значениям промахов относительно точки прицеливания будут определять требования к точности определения углового положения виртуального опорного канала. Задаваясь линейным значением промаха  $\Delta L$ , можно определить угловое рассогласование линии визирования системы самонаведения на заданной дальности:

$$\Delta\gamma = \operatorname{arctg} \frac{\Delta L}{D}. \quad (8)$$

В условиях априорной неопределенности об угловом положении виртуального опорного канала, обусловленной ошибками измерений, высокая вероятность правильного обнаружения факта перенацеливания системы самонаведения в результате воздействия помех может быть обеспечена, если  $\Delta\gamma \geq 3 \max(\sigma_\theta, \sigma_\varphi)$ . Принимая  $\sigma_\theta = \Delta\gamma/3$  и  $\sigma_\varphi = \Delta\gamma/3$  и приравнявая выражения (7) и (8), определим предельные значения СКО ошибок определения координат ЛА для случая равноточного определения координат ЛА и точки прицеливания  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_k^2$ :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{knp}^\theta &= D \cos \varphi_0 \sqrt{\frac{1}{18} \operatorname{arctg}^2 \frac{\Delta L}{D} - \frac{1}{2} \sigma_\alpha^2}, \\ \sigma_{knp}^\varphi &= D \sqrt{\frac{1}{18} \operatorname{arctg}^2 \frac{\Delta L}{D} - \frac{1}{2} \sigma_\beta^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из выражений (9) видно, что при равенстве СКО погрешностей определения углового положения строительной оси системы самонаведения по горизонтали и вертикали  $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = \sigma_{\alpha,\beta}$  наиболее жесткие требования к точности определения координат ЛА дает выражение, определяющее  $\sigma_{knp}^\theta$ . Поэтому в конечном виде расчет предельных ошибок определения координат ЛА для гарантированного определения линейных размеров промахов системы самонаведения, больших  $\Delta L$ , будем выполнять с использованием выражения

$$\sigma_k^{np} = D \cos \varphi_0 \sqrt{\frac{1}{18} \operatorname{arctg}^2 \frac{\Delta L}{D} - \frac{1}{2} \sigma_{\alpha,\beta}^2}. \quad (10)$$

На рис. 6 показаны зависимости значений предельных ошибок определения координат ЛА  $\sigma_k^{np}$  от дальности, рассчитанные для различных значений линейных размеров промаха системы самонаведения  $\Delta L$ , при  $\varphi_0 = 5$  град;  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,1$  град (сплошные линии);  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,05$  град (пунктир).

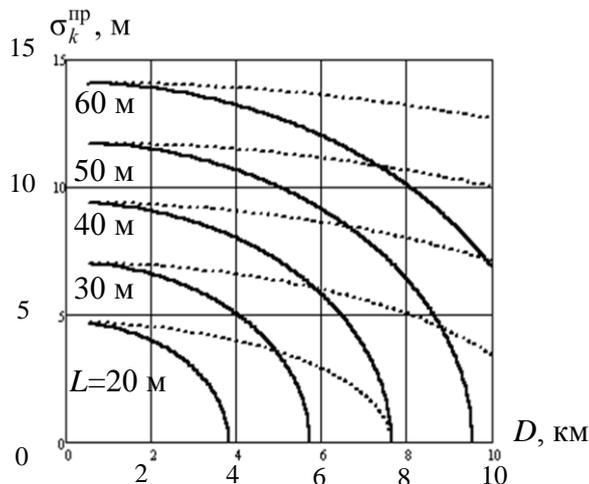


Рис. 6. Зависимость значений предельных ошибок определения местоположения ЛА от дальности

Результаты расчетов показывают, что виртуальный опорный канал может применяться для оценки значений промаха систем самонаведения, составляющих 30–40 м, при этом необходимо обеспечить СКО определения координат ЛА порядка 5–10 м на удалении до 4 км. С увеличением дальности между ЛА требования к точности определения их местоположения существенно повышаются. Так, для оценки значений промаха, составляющего 30 м, при  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,1$  град на удалении 2 км между ЛА  $\sigma_k^{pp}$  должно составлять порядка 7 м, с увеличением удаления до 4 км  $\sigma_k^{pp}$  не должно превысить 5 м. Существенно расширить диапазон дальностей применения способа можно за счет увеличения в 2 раза точности определения углового положения следящей системы ( $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,05$  град).

На рис. 7 показаны зависимости значений предельных ошибок определения координат ЛА  $\sigma_k^{pp}$  от дальности, рассчитанные для линейных размеров промаха системы самонаведения  $\Delta L = 30$  м (сплошные линии) и  $\Delta L = 40$  м (пунктир) при  $\varphi_0 = 5$  град и различных значений  $\sigma_{\alpha,\beta}$  («1» –  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,05$  град; «2» –  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,1$  град; «3» –  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,2$  град; «4» –  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,3$ ).

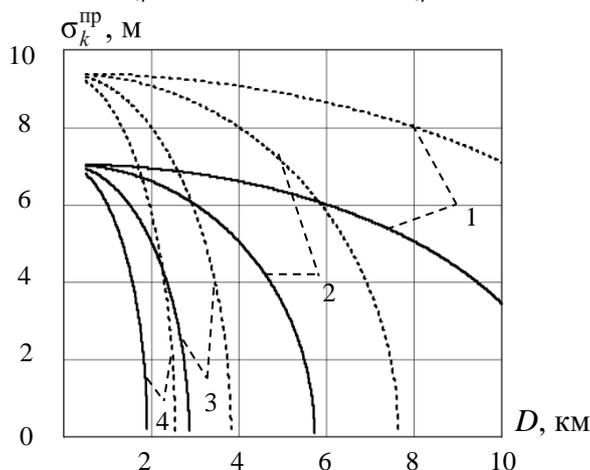


Рис. 7. Зависимость значений предельных ошибок определения местоположения ЛА

Из графиков (рис. 7) видно, что при повышении точности определения углового положения виртуального опорного канала, требования к точности определения положения ЛА сни-

жаются. Так, на удалении между ЛА 4 км и точности определения углового положения  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,1$  град необходимо обеспечивать СКО ошибок определения координат ЛА порядка 5–8 м для линейных значения промаха  $\Delta L = 30 \div 40$  м. При увеличении точности определения углового положения виртуального опорного канала до  $\sigma_{\alpha,\beta} = 0,05$  град требования к СКО ошибок определения координат ЛА снижаются до 7–9 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана методика расчета погрешностей формирования виртуального опорного канала при проведении летного эксперимента по оценке эффективности авиационных бортовых комплексов защиты на трассе «воздух-воздух». Получены выражения для расчета СКО ошибок определения углового положения виртуального опорного канала и дальности между ЛА, позволяющие определить предельные ошибки измерения координат летательных аппаратов для гарантированного прогнозирования промаха системы самонаведения относительно защищаемого объекта. Показана возможность применения виртуального опорного канала для оценки значений промаха системы самонаведения, составляющего порядка 30–40 м при обеспечении СКО ошибки определения координат летательных аппаратов не более 5–10 м.

## Список используемых источников

1. Авиационный комплекс индивидуальной защиты «Витебск» // Бастион: военнотехнический сборник. – URL: <http://www.bastion-karpenko.ru/vitebsk-reb> (дата обращения: 10.09.2018).
2. Авиационный комплекс радиоэлектронного противодействия «Президент-С» // Новости ВПК. – URL: <http://www.vpk.name/library/f/prezident-s.html> (дата обращения: 12.09.2018).
3. Донцов А.А., Тонконогов О.Ю., Нагалин Д.А. Способ формирования виртуального опорного канала при испытаниях наземных комплексов защиты от авиационных средств высокоточного оружия // Современное состояние, актуальные проблемы и перспективные направления развития авиационного радиоэлектронного оборудования. – 2017. – С. 98–104
4. Кемниц Ю.В. Теория ошибок измерений. – М.: Изд-во геодезической литературы, 1961. – 98 с.

А.Н. Дьяков,  
кандидат техн. наук;  
А.С. Кокарев,  
кандидат техн. наук;  
А.В. Пачин

## КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В статье представлено решение задачи построения моделей функционирования подвижной системы обеспечения запасными частями (СОЗЧ), позволяющих определять готовность каждого агрегата комплекса в зависимости от показателей СОЗЧ и надежности оборудования. Математической основой моделей является аппарат разностных уравнений, что позволило учесть изменения значений показателей СОЗЧ во времени. Приведены результаты вычислительного эксперимента, проведенного с применением разработанного комплекса моделей.

Ключевые слова: обеспечение готовности, технические комплексы, запасные части, системы обеспечения запасными частями, ЗИП, разностные уравнения.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных методов обеспечения надежности восстанавливаемых систем является формирование комплектов запасных частей (будем именно эти запасы в последующем называть ЗИПом). Причем методы обоснования их состава хорошо известны [1–7] и широко используются разработчиками технических систем.

Более того, в настоящее время вопрос оценки и оптимизации комплекта ЗИП переведен в практическую плоскость. Имеется, по крайней мере, три программных комплекса, которые реализуют аналитические методы оценки и оптимизации комплектов ЗИП.

Сложности в их использовании возникают в случае невозможности нахождения приемлемого решения, удовлетворяющего Заказчика. Далеко не всегда удается создать большие начальные запасы (по соображениям ограничений на суммарную стоимость начальных запасов, габаритных ограничений и пр.), которые позволяли бы обеспечить с высокой вероятностью возможность замены отказавшего элемента. В этих условиях необходимы либо структурная трансформация системы обеспечения запасами (СОЗ), либо, в случае ее невозможности, ослабление требований Заказчика по указанным ограничениям.

Одним из очевидных способов такой трансформации, обеспечивающей некоторый баланс между требованиями к надежности технической системы (далее – изделия) и ограничениями на эксплуатационные затраты, является придание мобильности одному или нескольким элементам (эшелонам) СОЗ. В этом случае модели, описывающие функционирование таких СОЗ, должны быть чувствительны не только к объему и номенклатуре запасных частей каждой составляющей СОЗ, но и к показателям, характеризующим эту мобильность, в частности к срокам перемещения мобильного элемента СОЗ между источниками отказов и пополнения.

В случае предъявления Заказчиком требований к надежности каждого элемента изделия в отдельности (например, коэффициент готовности агрегата или максимальное время устранения отказа) модель функционирования такого изделия, кроме того, должна учитывать и их взаимовлияние.

В большинстве известных работ в области логистического анализа динамических систем [8–12] для исследования изменения состояния таких объектов используется имитационное моделирование. Данный подход обладает множеством преимуществ, в частности наглядностью и универсальностью. Основным недостатком этих моделей является достаточно низкая доказательность полученного решения, особенно в случае недостаточности (а тем более – полного отсутствия) статистической информации об объекте исследования.

Очевидно, что указанные недостатки моделей систем обеспечения запасами приводят к ошибкам двух типов: либо к их необоснованной избыточности, либо к невыполнению требований к надежности. И первое, и второе в конечном счете оборачивается прямыми экономическими потерями, иногда весьма значительными, а в ряде случаев и другими, не менее ощутимыми, потерями (репутационными, снижением конкурентоспособности и пр.).

Приведенные обстоятельства определяют необходимость создания новых математических моделей, позволяющих исследовать процессы функционирования динамических систем и, в частности, подвижных СОЗ. Основанные на этих моделях методики формирования требований к таким СОЗ должны позволять главному разработчику изделия наглядно показывать Заказчику, что все меры, обеспечивающие сокращение стоимости его эксплуатации при сохранении заданных значений целевых показателей качества его функционирования, приняты.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представим исследуемую систему в виде комплекса  $I \in \mathbb{N}$  агрегатов, состоящих из  $J_i$  групп однотипных элементов, каждой из которых присвоен индекс  $ij$  ( $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J_i}$ ), и ЗИП-О к ним, где  $J \in \mathbb{N}$  – совокупная номенклатура типов элементов, критичных для работоспособности агрегата. Отказ любого элемента приводит к отказу агрегата, в состав которого он входит, и, следовательно, должна быть произведена его замена из ЗИП-О. При отсутствии в нем элементов, необходимых для устранения отказов оборудования или замены элементов, выработавших установленный для них ресурс, оборудование будет простаивать в неисправном состоянии, что приведет к уменьшению коэффициента готовности агрегата.

Для восполнения ЗИП-О в состав системы входит подвижный групповой ЗИП-А, передвигающийся между текущей  $x$  и целевой  $y$  ( $x = \overline{1, I}, y = \overline{1, I}$ ) позициями в соответствии с очередью заявок от агрегатов на пополнение ЗИП-О. Удовлетворение заявки от  $i$ -го агрегата осуществляется только в случае нахождения ЗИП-А в позиции  $i$ . В случае отсутствия в ЗИП-А ЗЧ требуемой номенклатуры соответствующая заявка не удовлетворяется до момента пополнения ЗИП-А. В свою очередь, восполнение ЗИП-А осуществляется из стационарного группового ЗИП-Б с периодичностью  $s$  (рис. 1).

Ключевым показателем, характеризующим готовность комплекса к применению по назначению, является время простоя агрегата, вызванного отказами его оборудования. Тогда задача моделирования подвижной системы обеспечения запасами (СОЗЧ) такой системы заключается в нахождении зависимости времени простоя каждого агрегата комплекса  $t_i^{np}$  за период эксплуатации  $t_3$  от количества запасных частей каждой номенклатуры во всех ЗИП-О  $z_{ij}^O$ , подвижном ЗИП-А  $z_j^A$ , стационарном ЗИП-Б  $z_j^B$  и периодичности пополнения ЗИП-А  $s$ .

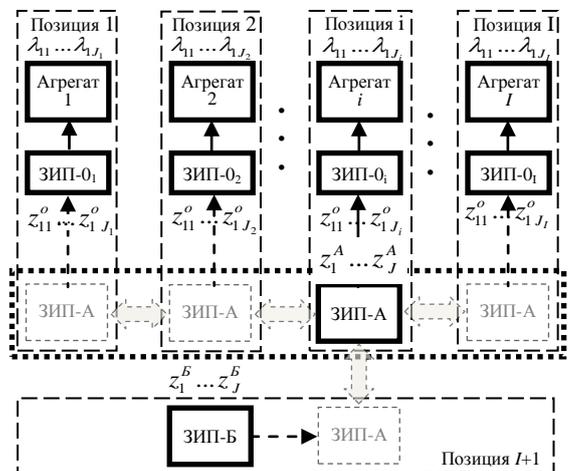


Рис. 1. Структура взаимодействия элементов СОЗЧ

Формально указанная задача может быть представлена в следующем виде.

Дано:  $\Delta, t_3, Z^o, Z^A, Z^B, K, T, s,$

где  $\Delta = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_J]^T$  – интенсивности отказов элементов комплекса;

$Z_i^o = [z_{i1}^o, z_{i2}^o, \dots, z_{ij}^o]^T, Z^A = [z_1^A, z_2^A, \dots, z_j^A, \dots, z_J^A]^T, Z^B = [z_1^B, z_2^B, \dots, z_j^B, \dots, z_J^B]^T$  – состав комп-

лектов запасных частей ЗИП-О каждого агрегата, ЗИП-А и ЗИП-Б соответственно;

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1j} & \dots & k_{1J} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2j} & \dots & k_{2J} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \dots & k_{ij} & \dots & k_{iJ} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \dots & k_{ij} & \dots & k_{iJ} \end{bmatrix} \text{ – состав} \quad T = \begin{bmatrix} t_{1,1} & t_{1,2} & \dots & t_{1,j} & \dots & t_{1,J+1} \\ t_{2,1} & t_{2,2} & \dots & t_{2,j} & \dots & t_{2,J+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{i,1} & t_{i,2} & \dots & t_{i,j} & \dots & t_{i,J+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{I+1,1} & t_{I+1,2} & \dots & t_{I+1,j} & \dots & t_{I+1,J+1} \end{bmatrix} \text{ – длительности}$$

оборудова- перемещения  
ния агрега- между позиция-  
тов,  $k_{ij} \in \mathbb{N};$  ми,  $t_{ij} \leq t_3.$

Найти:  $t^{np} = f(t_3, \Delta, Z^o, Z^A, Z^B, s).$

Процесс функционирования СОЗЧ является динамическим, значения ряда показателей, характеризующих объект (таких, например, как текущее местоположение), существенно меняются во времени, что определяет необходимость применения динамических моделей при исследовании такого типа объектов.

Одним из известных методов построения динамических моделей является применение разностных уравнений вида  $s(t) = s(t-1) + a(t) - b(t)$ , описывающих текущее состояние системы относительно предыдущего состояния, где  $a(t)$  и  $b(t)$  – некоторые переменные коэффициенты, описывающие изменение системы с ходом времени. Данный метод достаточно широко используется в динамических моделях управления запасами предприятий. Так, в работе [9] обосновано применение разностных уравнений для решения задач управления и планирования, доказана достаточность алгоритмического задания модели дискретного времени с полностью известными параметрами только текущего состояния при решении практических задач. Указанный подход предлагается и в данной работе. Состояние каждого агрегата комплекса в момент времени  $\tau$  можно описать кортежем входных и выходных воздействий, а задача получения зависимости  $t_i^{np}(\tau) = t_i^{np}(\tau-1) + \xi(\tau)$ , где

$$\xi(\tau) = f(U'_i(\tau), Q_i^o(\tau)), \xi \in \overline{0,1};$$

$$U'_i = [u'_{i1}, u'_{i2}, \dots, u'_{ij}, \dots, u'_{iJ}]^T, u'_{ij} \in N_0 \text{ – потребность агрегата в ТЭЗ};$$

$$Q_i^o = [q_{i1}^o, q_{i2}^o, \dots, q_{ij}^o, \dots, q_{iJ}^o]^T, q_{ij}^o \in N_0 \text{ – вектор количества ТЭЗ, выданных из ЗИП-О};$$

сводится к описанию правил изменения  $\xi$  во времени.

Потребность  $U'_i$  определяется показателями надежности ТЭЗ, входящих в состав агрегата. Опишем далее процесс функционирования составных частей исследуемого комплекса.

## МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТА

Обозначим:  $r_{ijk} \in \overline{0,1}$  – признак работоспособности элемента  $ijk$  ( $k = \overline{1, K_{ij}}$  – номер элемента в группе  $ij$ ,  $K_{ij} \in N_0$ );  $t_{ijk}^h \in N_0$  – наработка элемента;  $r_i^A \in \overline{0,1}$  – признак работоспособности агрегата. Нароботка элемента  $t_{ijk}^h$  увеличивается при отсутствии неработоспособных элементов в агрегате в целом. Допустим, что отказ элемента происходит при достижении им нара-

ботки  $\omega_{ijk} = \hat{X}(\lambda_j)$ , где  $\hat{X}_{ijk}(\lambda_j)$  – некоторая случайная величина;  $\lambda_j$  – интенсивность отказов  $j$ -го типа элементов, а одновременный отказ двух элементов одного типа невозможен.

Тогда изменение переменных  $r_{ijk}$ ,  $t_{ijk}^H$  и  $\omega_{ijk}$  описывается выражениями:

$$\omega_{ijk}(\tau) = \begin{cases} \hat{X}(\lambda_j), \text{ при } \tau = 0 \vee (r_{ijk}(\tau-1) = 0 \wedge q_{ij}^O(\tau-1) > 0); \\ \omega_{ijk}(\tau-1) \end{cases}; \quad (1)$$

$$r_{ijk}(\tau) = \begin{cases} 0, \text{ при } \omega(\tau) = 0 \vee (\tau > 0 \wedge t_{ijk}^H(\tau-1) = \omega_{ijk}(\tau)) \\ 1 \end{cases}; \quad (2) \quad t_{ijk}^H(\tau) = \begin{cases} 0, \text{ при } \tau = 0 \vee r(\tau) = 0 \\ t_{ijk}^H(\tau-1) + 1, \text{ при } r_i^A(\tau) = 1 \\ t_{ijk}^H(\tau-1) \end{cases}. \quad (3)$$

Информационная модель элемента представлена на рис. 2. Входными данными для модели являются значения признака работоспособности агрегата  $r_i^A$  и значения случайной величины  $\hat{X}_{ijk}(\lambda_j)$ . Выходными данными – значение признака работоспособности элемента  $r_{ijk}$ .

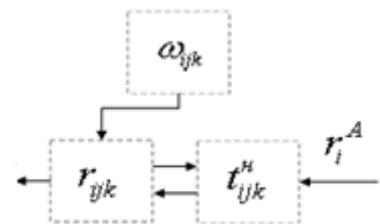


Рис. 2. Информационная модель элемента

По условию задачи элементы функционируют в составе агрегата, который и формирует заявку на выдачу ТЭЗ из ЗИП-О в случае отказа одного из них. Опишем правила изменения переменных, характеризующих работу самого агрегата и ЗИП-О.

### МОДЕЛЬ АГРЕГАТА

В случае отказа одного (или нескольких) элемента  $ijk$  формируется заявка на выдачу ТЭЗ  $u'_{ij}$  из ЗИП-О, входящего в состав агрегата, для восстановления работоспособности. В ответ на заявку ЗИП-О осуществляет выдачу необходимых ТЭЗ  $Q_i^O$  в пределах их наличия.

Поскольку при неисправности любого элемента, входящего в состав агрегата (а значит, при наличии хотя бы одной заявки  $u'_{ij}$ ), последний простаивает, за время простоя агрегата можно принять длительность нахождения в его составе, по крайней мере, одного неисправного элемента.

Тогда правила изменения переменных  $u'_i$ ,  $r_i^A$  и  $t_i^{np}$  описываются выражениями:

$$u'_{ij}(\tau) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{K_{ij}} |r_{ijk}(\tau) - 1|, \text{ при } \tau = 0 \\ \sum_{k=1}^{K_{ij}} |r_{ijk}(\tau) - 1| - q_{ij}^O(\tau-1) \end{cases}; \quad (4) \quad r_i^A(\tau) = \begin{cases} 1, \text{ при } \sum_{j=1}^J u'_{ij}(\tau) = 0 \\ 0 \end{cases}; \quad (5)$$

$$t_i^{np}(\tau) = \begin{cases} 0, \text{ при } \tau = 0 \\ t_i^{np}(\tau-1) + 1, \text{ при } r_i^A(\tau) = 0 \\ t_i^{np}(\tau-1), \text{ при } r_i^A(\tau) = 1 \end{cases}. \quad (6)$$

Структура информационной модели агрегата представлена на рис. 3.

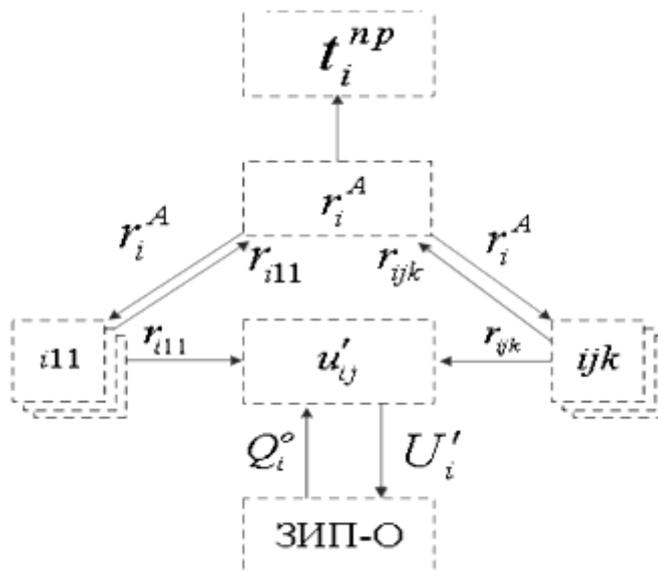


Рис. 3. Информационная модель агрегата

### МОДЕЛЬ ЗИП-О

Обозначим параметры модели одиночного ЗИП следующим образом:

$Z_i^{o*} = [z_{i1}^{o*}, z_{i2}^{o*}, \dots, z_{ij}^{o*}, \dots, z_{ij}^{o*}]^T$  – вектор начальных запасов элементов в ЗИП-О  $i$ -го агрегата,  $z_{ij}^{o*} \in N_0$ ;

$U_i^o = [u_{i1}^o, u_{i2}^o, \dots, u_{ij}^o, \dots, u_{ij}^o]^T$ ,  $u_{ij}^o \in N_0$  – потребность в пополнении ТЭЗ из ЗИП-А для ЗИП-О  $i$ -го агрегата;

$Q_i^A = [q_{i1}^A, q_{i2}^A, \dots, q_{ij}^A, \dots, q_{ij}^A]^T$ ,  $q_{ij}^A \in N_0$  – количество ТЭЗ, выданных из ЗИП-А в ЗИП-О  $i$ -го агрегата.

В случае отказа одного или нескольких элементов агрегата, ЗИП-О осуществляет выдачу запасных элементов соответствующей номенклатуры  $Q_i^o$  [формула (6)] в количестве, определяемом на основании потребности  $U_i'$  агрегата и текущего уровня запасов  $Z_i^o$ , рассчитываемого с учетом выдачи из ЗИП-А  $Q_i^A$  [формула (7)].

Тогда потребность в восполнении запаса из ЗИП-А  $U_i^o$  определяется остаточной потребностью после выдачи ТЭЗ в агрегат и текущим некомплектом ЗИП-О, т. е.

$$q_{ij}^o(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } u_{ij}'(\tau) = 0 \\ u_{ij}'(\tau), & \text{при } z_{ij}^o(\tau-1) \geq u_{ij}'(\tau) \\ z_{ij}^o(\tau-1), & \text{при } z_{ij}^o(\tau-1) < u_{ij}'(\tau) \end{cases}, \quad (7)$$

$$z_{ij}^o(\tau) = \begin{cases} z_{ij}^{o*} - q_{ij}^o(\tau), & \text{при } \tau = 0 \\ z_{ij}^o(\tau-1) - q_{ij}^o(\tau) + q_{ij}^A(\tau-1), & \end{cases} \quad (8)$$

$$u_{ij}^o(\tau) = [u'_{ij}(\tau) - q_{ij}^o(\tau)] + [z_{ij}^{o*}(\tau) - z_{ij}^o(\tau)] . \quad (9)$$

В целом информационная модель ЗИП-О агрегата можно представить в виде рис. 4. Входными данными для модели ЗИП-О являются векторы потребности агрегата и выдачи из ЗИП-А, выходными – векторы выдачи в агрегат и потребности на восполнение из ЗИП-А.

Пополнение ЗИП-О (т. е. изменение  $Z_i^o$ ) осуществляется при получении ТЭЗ из ЗИП-А, а значит, зависит как от фактического наличия требуемых запасных частей в ЗИП-А, так и от текущей позиции ЗИП-А относительно ЗИП-О. Модель ЗИП-А, таким образом, должна учитывать указанные параметры.

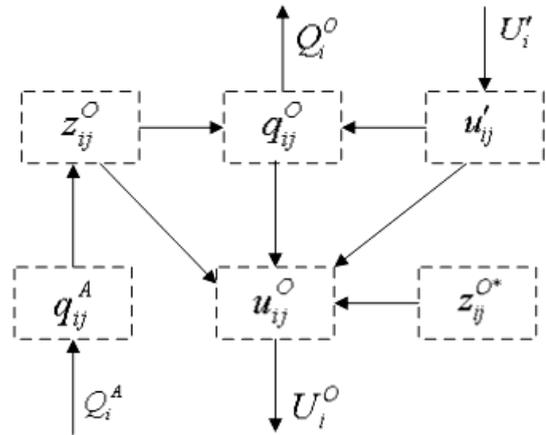


Рис. 4. Информационная модель ЗИП-О

### МОДЕЛЬ ЗИП-А

Обозначим параметры модели подвижного группового ЗИП-А следующим образом:

$\Phi = [\phi_1, \dots, \phi_i, \dots, \phi_I]^T$  – вектор заявок на пополнение ЗИП-О агрегатов,  $\phi_i \in \mathbb{N}_0$ ;

$Z^{A*} = [z_1^{A*}, z_2^{A*}, \dots, z_j^{A*}, \dots, z_J^{A*}]^T$  – вектор начальных запасов элементов в ЗИП-А,  $z_j^{A*} \in \mathbb{N}_0, Z^A(\tau = 0) = Z^{A*}$ ;

$U^A = [u_1^A, u_2^A, \dots, u_j^A, \dots, u_J^A]^T, u_j^A \in N_0$  – потребность в пополнении ТЭЗ из ЗИП-Б для ЗИП-А;

$Q^B = [q_1^B, q_2^B, \dots, q_j^B, \dots, q_J^B]^T, q_j^B \in N_0$  – объем ТЭЗ, выдаваемых из ЗИП-Б в ЗИП-А;

$d$  – время до прибытия ЗИП-А на целевую позицию,  $d \in \mathbb{N}_0$ .

В случае необходимости пополнения ЗИП-О агрегатов формируют заявки  $\phi_i$ , которые удовлетворяются ЗИП-А в порядке их поступления.

С целью обработки очередной заявки от  $i$ -го агрегата, ЗИП-А двигается от текущей позиции  $x = \overline{1, I}$  к позиции  $y = i$  в течение известного времени  $t_{x,y}$ . При прибытии в позицию  $i$  ЗИП-А уменьшает потребность ЗИП-О  $i$ -го агрегата в ТЭЗ. При этом уменьшается и запас элементов в самом ЗИП-А  $Z^A$ , и, как следствие, увеличивается потребность в пополнении  $U^A$ . Заявка  $\phi_i$  снимается только при полном удовлетворении потребности ЗИП-О  $i$ -го агрегата в ТЭЗ. Далее обрабатывается следующая по приоритету заявка:

$$\phi_i(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } \sum_{j=1}^J u_{ij}^o(\tau) = 0 \\ \tau, & \text{при } \sum_{j=1}^J u_{ij}^o(\tau) > 0 \wedge \phi_i(\tau - 1) = 0, \\ \phi_i(\tau - 1) \end{cases} \quad (10)$$

$$y(\tau) = \begin{cases} I+1, \text{ нпу } d(\tau-1) = 0 \wedge \tau \geq s + t^B \wedge \sum_j^J u_j^A(\tau-1) > 0 \wedge \sum_j^J z_j^B(\tau-1) > 0 \\ i | \phi_i(\tau) = \min(\Phi(\tau)), \text{ нпу } d(\tau-1) \leq 1 \wedge \sum_j^J u_{ij}^O(\tau) \cdot z_j^A(\tau-1) > 0, \\ Pos^*, \text{ нпу } \tau = 0 \vee x(\tau-1) = I+1 \\ y(\tau-1) \end{cases} \quad (11)$$

$$d(\tau) = \begin{cases} T(y(\tau), x(\tau-1)), \text{ нпу } y(\tau) \neq x(\tau-1) \wedge (\tau = 0 \vee d(\tau-1) \leq 1) \\ 0, \text{ нпу } y(\tau) = x(\tau-1), \\ d(\tau-1) - 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$x(\tau) = \begin{cases} Pos^*, \text{ нпу } \tau = 0 \\ y(\tau), \text{ нпу } d(\tau) = 1, \\ x(\tau-1) \end{cases} \quad (13)$$

$$q_{ij}^A(\tau) = \begin{cases} 0, \text{ нпу } i \neq x(\tau) \\ u_{ij}^O(\tau), \text{ нпу } z_j^A(\tau-1) \geq u_{ij}^O(\tau), \\ z_j^A(\tau-1) \end{cases} \quad (14)$$

$$z_j^A(\tau) = \begin{cases} z_j^{A*} - q_{ij}^A(\tau), \text{ нпу } \tau = 0 \\ z_j^A(\tau-1) + q_j^B(\tau-1), \text{ нпу } x = I+1, \\ z_j^A(\tau-1) - q_{ij}^A(\tau) \end{cases} \quad (15)$$

$$u_j^A(\tau) = z_j^{A*}(\tau) - z_j^A(\tau). \quad (16)$$

Информационная модель ЗИП-А показана на рис. 5.

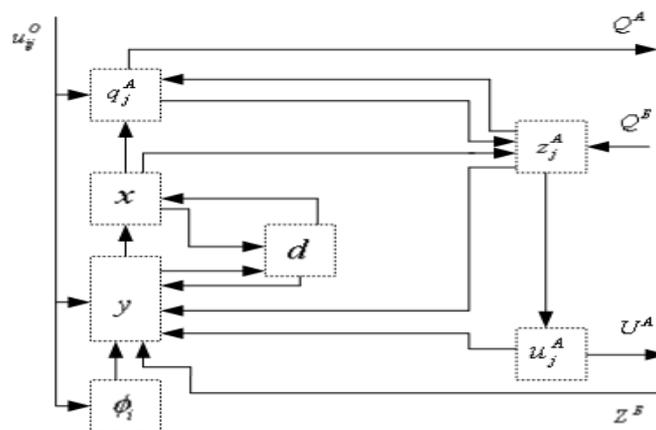


Рис. 5. Информационная модель ЗИП-А

Последним эшелоном СОЗЧ, влияющим на уровень запасов в ЗИП-А за счет выдачи восполнения ТЭЗ, является стационарный групповой ЗИП-Б. Опишем порядок его работы.

### МОДЕЛЬ ЗИП-Б

ЗИП-Б размещается на складе в месте постоянной дислокации, его запас ТЭЗ восполняется из внешних источников за пределами заданного периода эксплуатации  $t_s$ .

Таким образом, при прибытии ЗИП-А в позицию  $I+1$  выполняется пополнение текущего запаса элементов из ЗИП-Б в пределах потребности  $U^A$  и имеющегося запаса  $Z^B$ . Текущий запас ЗИП-Б соответственно уменьшается.

Обозначим:  $Z^{B*} = [z_1^{B*}, z_2^{B*}, \dots, z_j^{B*}, \dots, z_J^{B*}]^T$  – вектор начальных запасов элементов в ЗИП-Б,  $z_j^{B*} \in N_0$ .

Тогда изменение параметров ЗИП-Б может быть описано следующими выражениями:

$$q_j^B(\tau) = \begin{cases} 0, \text{ при } \tau = 0 \\ u_j^A(\tau), \text{ при } z_j^B(\tau - 1) \geq u_j^A(\tau) \\ z_j^B(\tau - 1) \end{cases} \quad (17)$$

$$z_j^B(\tau) = \begin{cases} z_j^{B*}, \text{ при } \tau = 0 \\ z_j^B(\tau - 1) - q_j^B(\tau) \end{cases} \quad (18)$$

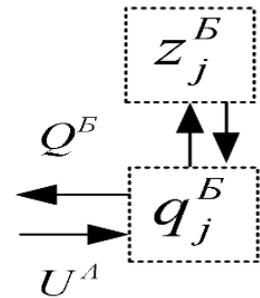


Рис. 6. Информационная модель ЗИП-Б

Входными данными для модели является вектор потребности восполнения запасов из ЗИП-А, выходными данными – вектор выдачи в ЗИП-А.

### ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью оценки адекватности и анализа результативности разработанного комплекса моделей, было осуществлено моделирование функционирования СПЗЧ с тремя различными вариантами размещения ТЭЗ в СОЗЧ и при следующих исходных данных:

$$K = \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{matrix}; \quad T = \begin{matrix} 0 & 4 & 3 & 24 \\ 4 & 0 & 5 & 24 \\ 3 & 5 & 0 & 25 \\ 24 & 24 & 25 & 0 \end{matrix}; \quad t_s = 4230 \text{ ч};$$

	Вариант а	Вариант б	Вариант в
$Z_1^o$	1 1 1 1 1 0 0 1 1 1	1 1 1 1 1 0 0 1 1 1	1 1 1 1 1 0 0 1 1 1
$Z_2^o$	1 1 0 1 0 1 1 1 1 1	0 0 0 1 0 1 1 1 1 1	0 0 0 1 0 1 1 1 1 1
$Z_3^o$	0 0 1 1 1 1 1 1 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1 1 1
$Z^A$	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
$Z^B$	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4

$$\Delta = [56 \ 322 \ 18 \ 14 \ 200 \ 25 \ 33 \ 89 \ 100 \ 450] \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Анализ полученных графиков, представленных на рис. 7 и соответствующих вариантам исходных данных (вариант а соответствует рис. 7,а и т. д.), позволяет определить область значений периодичности пополнения ЗИП-А от  $s_{\max}$  до  $s_{\min}$ , при котором времена простоя всех агрегатов комплекса находятся в установленных ограничениях  $\forall t_i^{np} \leq t_{mp}^{np}$ .

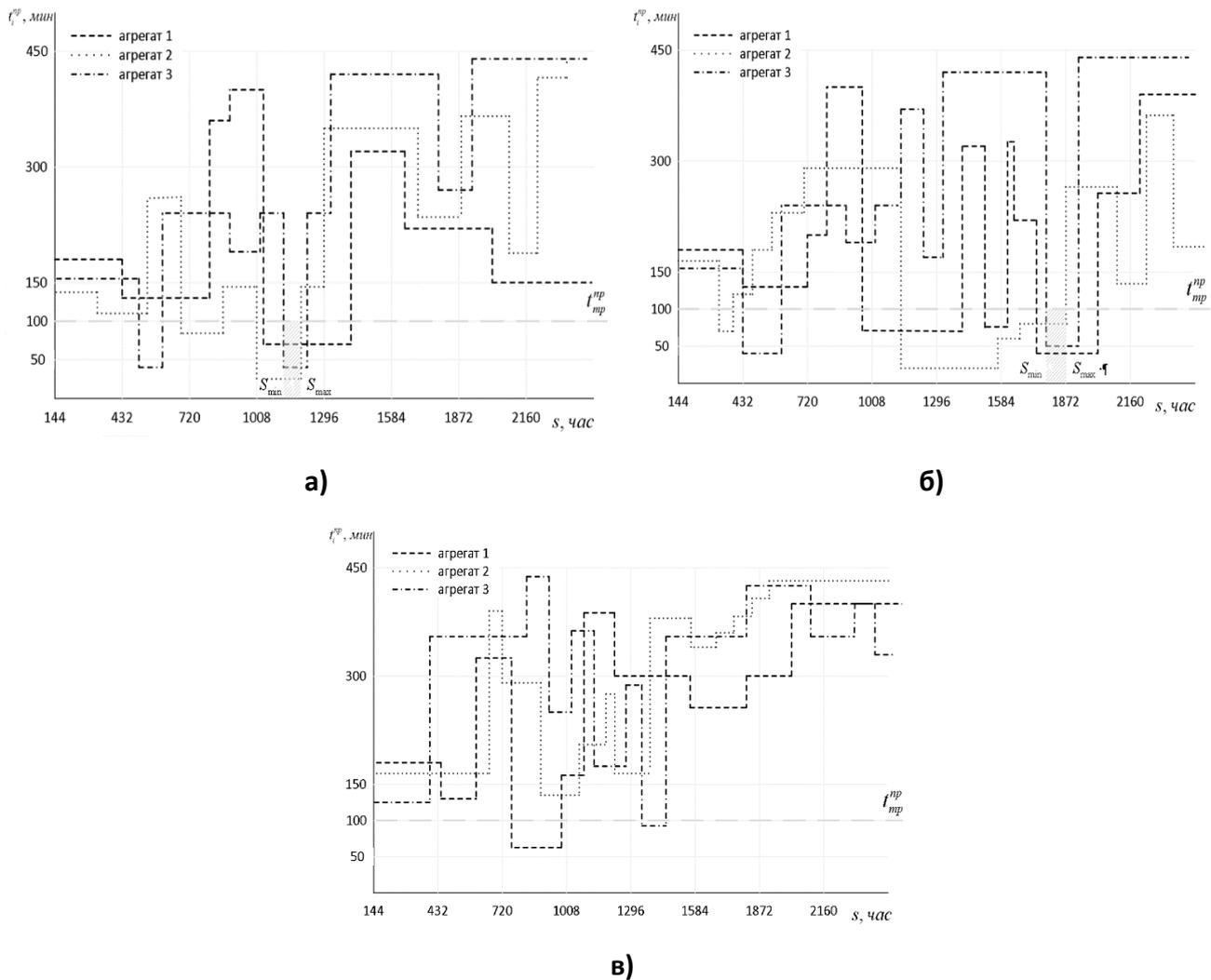


Рис. 7. Моделирование СОЗЧ при различных вариантах размещения ТЭЗ

Результаты подтверждают решение поставленной задачи создания модели, позволяющей определить длительность простоя каждого агрегата комплекса  $t_i^{np}$  за период эксплуатации  $t$ , как функцию от количества запасных частей каждой номенклатуры во всех ЗИП-О  $z_{ij}^O$ , подвижном ЗИП-А  $z_j^A$ , стационарном ЗИП-Б  $z_j^B$  и периодичности пополнения ЗИП-А  $s$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено решение научной задачи создания комплекса моделей функционирования системы обеспечения запасными частями сложных технических комплексов.

Полученные модели, в отличие от существующих, позволяют при определении показателей, характеризующих готовность оборудования, учитывать динамическое изменение параметров подвижной СОЗЧ во времени.

Практическая значимость полученных моделей заключается в возможности определения готовности каждого агрегата СТК за заданный период в зависимости от показателей подвижной СОЗЧ, изменяющихся во времени.

Полученный комплекс моделей может быть использован в организациях, имеющих в своем составе мобильные удаленные подразделения, такие как лесопорубочные и дорожно-строительные бригады, геологоразведывательные партии, спасательные отряды и т. п.

Наиболее перспективным направлением совершенствования представленного комплекса моделей является внедрение возможности варьирования количеством подвижных групповых комплектов ЗИП.

### Список используемых источников

1. ГОСТ 25.507-2015. Надежность в технике (ССНТ). Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200135689> (дата обращения: 12.05.2019).
2. ГОСТ РВ 27.3.03 – 2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. – URL: <https://gostost.ru/gost-rv-27-3-03-2005> (дата обращения: 12.05.2019).
3. РД В 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП. – URL: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/908> (дата обращения: 12.05.2019).
4. *Жаднов В.В.* Автоматизация проектирования запасов компонентов в комплектах ЗИП // Компоненты и технологии. – М., 2010. – №5. – С.173–176.
5. *Черкесов Г.Н.* Оценка надежности систем с учетом ЗИП. – СПб., 2012. – 480 с.
6. *Чуркин В.В.* Оценка и оптимизация комплекта ЗИП с помощью метода статистического моделирования // Научно-технические ведомости СПбГУ. – 2015. – С. 79–92.
7. *Брежнев Д.Ю., Допира Р.В., Судариков А.А.* Методический подход к моделированию обеспечения сложных технических систем запасными частями // Программные продукты и системы. – 2018. – Т.31, №2. – С. 374–381.
8. *Кокарев А.С., Марченко М.А., Пачин А.В.* Разработка комплексной программы повышения ремонтпригодности сложных технических комплексов // Фундаментальные исследования. – 2016. – №4-3. – С.501–505.
9. *Дьяков А.Н., Решетников Д.В., Бояришинов С.Н.* Моделирование системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем // Вооружение и экономика. – 2016. – № 3 (36). – С. 35–43.
10. *Кузнецов А.Н.* Методологические основы анализа функционирования и развития системы эксплуатации космических средств. – СПб.: Наука, 2002. – 167 с.
11. *Лысенко И.В.* Анализ и синтез сложных технических систем (основы теории). – М.: Воениздат, 1995. – Ч. 1: Анализ и синтез систем обеспечения готовности ракет-носителей и космических аппаратов к запуску. – 368 с.
12. *Первозванский А.А.* Математические модели в управлении производством. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. – 616 с.

Г.М. Завьялова,  
кандидат техн. наук, доцент;  
Е.Л. Лебедев,  
доктор техн. наук, профессор

## МЕТОДИКА ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ МИКРОФРАКТОГРАФИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

В статье представлена методика входного контроля конструкционных материалов по результатам статистического анализа цифровых изображений контролируемой поверхности. Введен диагностический признак качества конструкционных материалов при их микрофрактографическом анализе. Показана возможность применения предлагаемой методики для сталей и сплавов в широком диапазоне химического состава.

Ключевые слова: микрофрактографический анализ, статистический анализ цифровых изображений, гистограмма яркости фазовых составляющих.

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данных исследований обоснована необходимостью повышения информативности при входном контроле качества специальных сталей и сплавов металлографическим методом.

Следует отметить, что химический состав, структурное состояние металлических конструкционных материалов не всегда соответствует существующим требованиям ГОСТов и иных нормативных документов. Поэтому при входном контроле используется комплекс методов проверки специальных сталей и сплавов на предмет их соответствия нормам химического, структурного состава, механическим характеристикам. Одним из известных методов является металлографический метод, в частности, применяется *микрофрактографический анализ* сталей и сплавов.

Особенностью микрофрактографического анализа является то, что для достоверного получения информации о контролируемом металлическом материале требуется высокая квалификация персонала. Таким образом, микрофрактографический анализ не может быть автоматизирован, его результаты носят субъективный характер, не имеют параметров численной оценки и не могут быть запротоколированы. Данные обстоятельства, несмотря на высокую достоверность получения информации о конструкционном материале, накладывают ограничения в применении указанного метода при входном контроле.

В работе [1] рассмотрены вопросы статистической обработки цифровых изображений при металлографическом анализе конструкционных материалов ракетной техники, использовано программное обеспечение, указанное в работе [2], показано преимущество данной методики при ее реализации при входном контроле. Однако возможность реализации данной методики при анализе сталей и сплавов с различным химическим содержанием на всем диапазоне легирующих элементов оставалась неизученной.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Для решения данной задачи было разработано специальное программное обеспечение статистической обработки видимой при микрофрактографическом анализе поверхности шлифа иссле-

дуемого конструкционного материала. Применение указанного программного обеспечения может позволить автоматизировать процесс металлографического анализа за счет обоснованного введения показателей и критериев качества исследуемых сплавов по результатам статистической обработки оцифрованного изображения поверхности шлифа.

*Цель исследования* заключалась в обосновании диагностических признаков статистической обработки видеоизображения, которые позволят судить о качестве исследуемых сталей и сплавов и имеют корреляционную зависимость с их химическим, структурным составами и механическими характеристиками. Потому для тестовых испытаний в качестве конструкционных материалов использовались стали и сплавы, изменения механических характеристик от химического состава которых известны. В качестве таковых использованы стали с различным содержанием углерода и сплавы алюминия с различным содержанием меди.

Для анализа фазового состава применялся микрофрактографический анализ с использованием микроскопа «Метам-РВ» при увеличении от 300 до 450 $\times$ . Шлифы исследуемых поверхностей выполнялись согласно методике, указанной в справочнике [3].

Для работы данного программного обеспечения микроскоп был оснащен видеокамерой (рис. 1), преобразующей видимое в его объективе изображение в цифровой сигнал, который и подвергался дальнейшему анализу.

Необходимо отметить, что программа анализа цифровых изображений позволяет формировать поверхностный график уровня яркости и гистограмму яркости фазовых составляющих контролируемой поверхности. Особенностью металлографического анализа является то, что яркость отдельных участков цифрового изображения поверхности (при одинаковых условиях подготовки поверхности) сталей и сплавов в основном определяется параметрами шероховатости отдельных фазовых составляющих после их травления. В свою очередь, шероховатость фазовых составляющих контролируемого сплава после травления зависит от их химического состава. В частности, химическое соединение –  $\text{CuAl}_2$ , границы его зерен и примеси более подвергаются травлению и, с учетом рассеивания отраженного света, имеют низкое значение яркости, по сравнению с фазами твердого раствора, химического соединения цементит –  $\text{Fe}_3\text{C}$  и механическими смесями.

Было показано, что незначительное изменение содержания легирующих элементов контролируемых сталей и сплавов (даже в пределах допустимых значений) существенно влияет на поверхностный график и гистограмму яркости фазовых составляющих. При этом зачастую внешний вид структуры металлографических шлифов практически не изменяется. В табл. 1 и 2 показаны поверхностные графики и гистограммы для сталей с различным содержанием углерода и алюминиевых сплавов с различным содержанием меди.

На основании данного анализа было предложено в качестве диагностического параметра качества сталей и сплавов при их металлографическом анализе использовать следующие статистические характеристики цифровых изображений контролируемых поверхностей исследуемых сталей (сплавов), а именно минимальную и максимальную яркость изображений, моду, медиану яркости и иные параметры гистограммы яркости изображений.

Однако в зависимости от уровня освещения, площади исследуемого участка (фотографии), кратности увеличения указанные характеристики также могут меняться. Для обеспечения устойчивости предлагаемой методики к условиям ее применения было впервые предложено использовать отношение медианы гистограммы к ее моде –  $M_e/M_o$  как диагностический параметр качества сталей и сплавов.



*Рис. 1. Цифровое изображение контролируемого сплава, полученное с применением разработанного программного обеспечения*

Таблица 1

## Поверхностные графики и гистограммы цифровых изображений сталей

Шлиф	Поверхностный график	Гистограмма яркости
<p><math>C \approx 0.2\%</math></p>		<p>Значений: 3289248    Минимум: 0          Медиана: 97.7209    Максимум: 255          Ст. откл-е: 37.5665    Мода: 134 (29867)</p>
<p><math>C \approx 0.4\%</math></p>		<p>Значений: 3289248    Минимум: 8          Медиана: 122.2930    Максимум: 209          Ст. откл-е: 34.1268    Мода: 151 (42041)</p>
<p><math>C \approx 0.6\%</math></p>		<p>Значений: 3289248    Минимум: 0          Медиана: 68.8924    Максимум: 201          Ст. откл-е: 28.4957    Мода: 45 (42887)</p>
<p><math>C \approx 0.8\%</math></p>		<p>Значений: 3289248    Минимум: 0          Медиана: 63.6007    Максимум: 196          Ст. откл-е: 42.6910    Мода: 21 (58785)</p>
<p><math>C \approx 1.2\%</math></p>		<p>Значений: 3289248    Минимум: 0          Медиана: 82.5968    Максимум: 255          Ст. откл-е: 24.9186    Мода: 73 (64823)</p>

Таблица 2

**Поверхностные графики и гистограммы цифровых изображений  
алюминиевых сплавов**

Шлиф	Поверхностный график	Гистограмма яркости
<b>Cu ≈ 2%</b>		 Значений: 5038848 Медиана: 80.7552 Ст. откл-е: 27.6680 Минимум: 19 Максимум: 249 Мода: 65 (85007)
<b>Cu ≈ 4.5%</b>		 Значений: 5038848 Медиана: 110.999 Ст. откл-е: 42.092 Минимум: 24 Максимум: 252 Мода: 92 (49824)
<b>Cu ≈ 12%</b>		 Значений: 5038848 Медиана: 74.519 Ст. откл-е: 32.281 Минимум: 22 Максимум: 250 Мода: 45 (78766)
<b>Cu ≈ 20%</b>		 Значений: 5038848 Медиана: 59.189 Ст. откл-е: 30.171 Минимум: 18 Максимум: 253 Мода: 37 (123852)
<b>Cu ≈ 33.8%</b>		 Значений: 5038848 Медиана: 49.040 Ст. откл-е: 26.425 Минимум: 17 Максимум: 252 Мода: 34 (168323)
<b>Cu ≈ 44%</b>		 Значений: 5038848 Медиана: 113.231 Ст. откл-е: 61.197 Минимум: 38 Максимум: 255 Мода: 61 (128935)
<b>Cu ≈ 50%</b>		 Значений: 5038848 Медиана: 109.267 Ст. откл-е: 46.305 Минимум: 47 Максимум: 255 Мода: 83 (113066)

Отдельно мода и медиана будут одинаково зависеть от условий фотографирования, и их отношение остается неизменным при различных условиях металлографического анализа контролируемого сплава, следовательно, данную методику можно применять без поправок к условиям настроек микроскопов.

При проведении экспериментальной апробации предлагаемой методики использовались различные уровни освещенности и кратности увеличения, при этом для одних и тех же сталей и сплавов изменение предлагаемого параметра  $Me/Mo$  находилось в пределах статистической погрешности. Кроме того, была выявлена корреляция между предлагаемым диагностическим признаком – отношением медианы гистограммы к ее моде ( $Me/Mo$ ) и механическими свойствами сталей и сплавов ( $\sigma_B$ ).

В частности, на рис. 2 показана зависимость значений данных параметров от содержания углерода в стали. При увеличении содержания углерода до 1% прочность сталей увеличивается [3, 4]. С увеличением временного сопротивления разрушению ( $\sigma_B$ ) наблюдается аналогичное увеличение значения параметра статистической обработки изображения структуры сталей –  $Me/Mo$ .

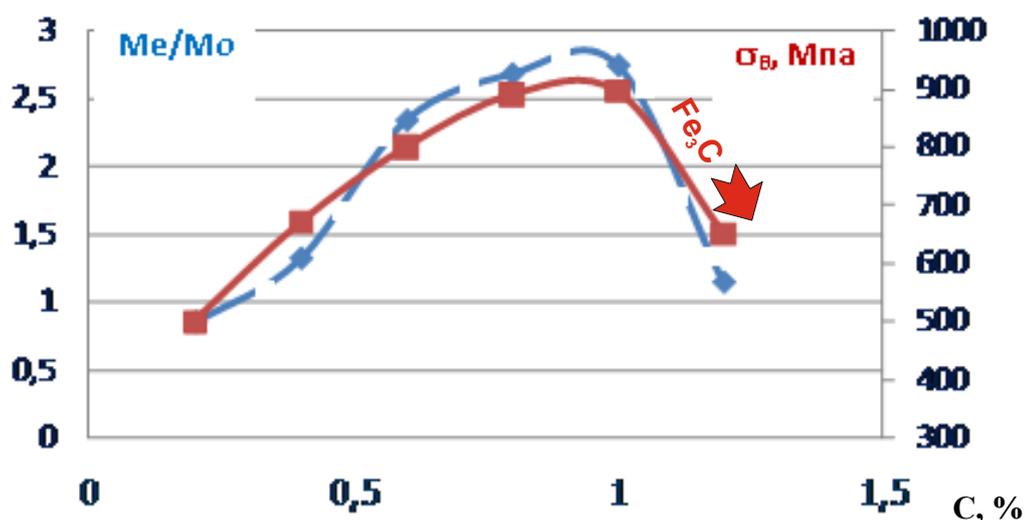


Рис. 2. Зависимость временного сопротивления разрушению ( $\sigma_B$ ) и параметра  $Me/Mo$  от содержания углерода в сталях:

----- –  $Me/Mo$ ; ———— –  $\sigma_B$

При содержании углерода более 1% образуется «сетка» хрупкого химического соединения – цементита ( $Fe_3C$ ) по границам зерен перлита. При этом временное сопротивление разрушению ( $\sigma_B$ ) снижается [5], о чем свидетельствует снижение значения параметра статистической обработки изображений структуры сталей ( $Me/Mo$ ). Изменение последнего параметра может объясняться тем, что при выделении «светлой» фазы цементита снижается доминанта «темных» составляющих структуры данного сплава, изменяется форма гистограммы, и снижается значение параметра  $Me/Mo$ , повторяя снижение значения прочности –  $\sigma_B$ .

Значение параметра статистической обработки изображения  $Me/Mo$  также позволяет определять и влияние эвтектической составляющей и составляющей химического соединения на механические характеристики сплава алюминия с различным содержанием меди (рис. 3).

При увеличении содержания меди механические характеристики алюминиевых сплавов (прочность) возрастают, о чем свидетельствует возрастание  $Me/Mo$ . При увеличении содержания меди более чем на 15% превалирующим является влияние эвтектической составляющей

щей сплава, статистический показатель  $Me/Mo$  снижается, что свидетельствует о снижении механических характеристик сплава.

При содержании меди 33,8% образуется эвтектический сплав с низкими механическими характеристиками [6], в этом случае значение статистического показателя  $Me/Mo$  минимально.

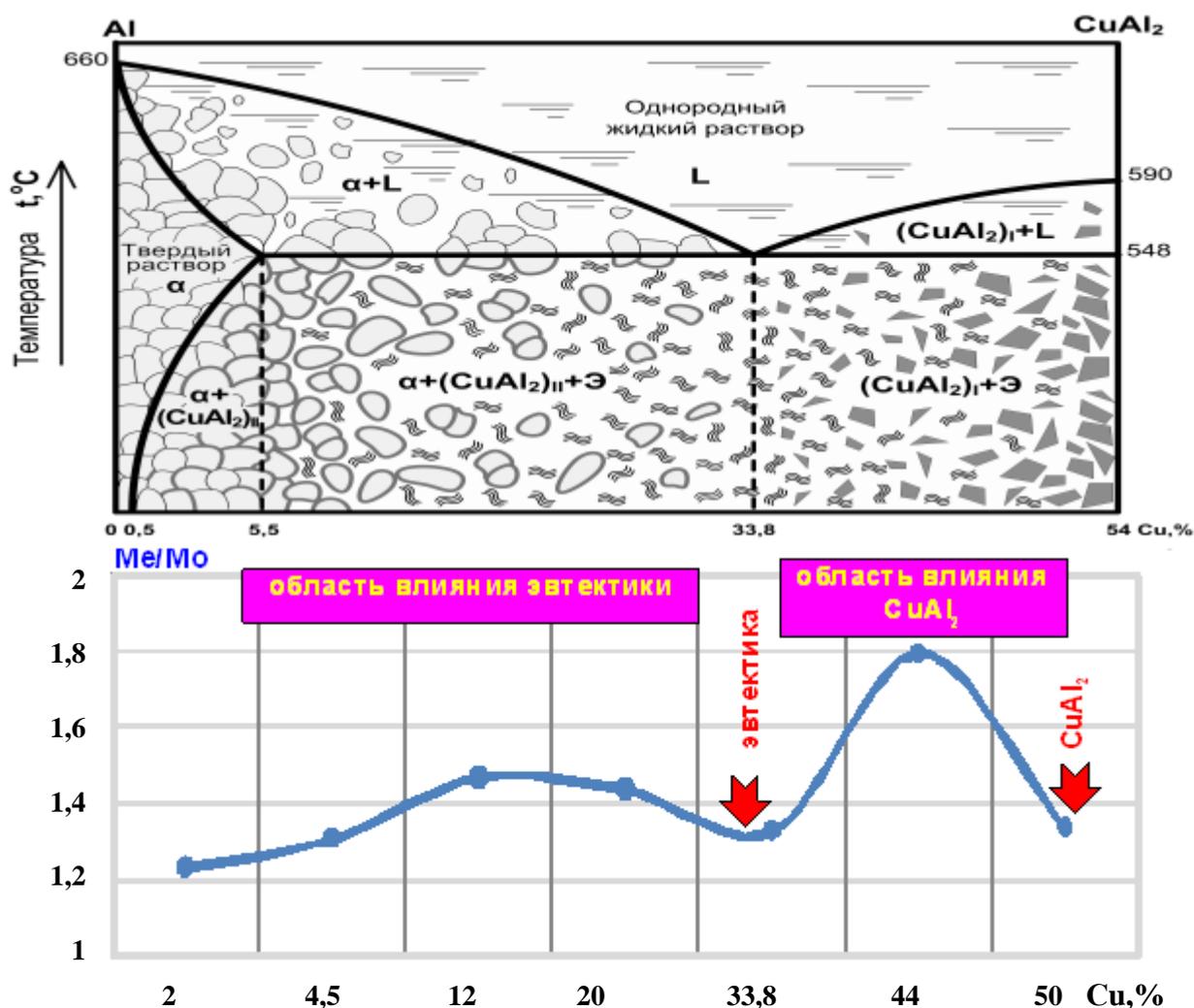


Рис. 3. Зависимость параметра  $Me/Mo$  от содержания меди в алюминиевых сплавах

В заэвтектической области ( $Cu > 38\%$ ) превалирующим является влияние химического соединения ( $CuAl_2$ ). До 40%  $Cu$  химическое соединение упрочняет сплав, а при содержании более 40% – снижает его пластичность. При содержании меди 54% образуется хрупкое химическое соединение [7], при этом значение показателя  $Me/Mo$  также минимально.

Изменение значения показателя  $Me/Mo$  при анализе алюминиевых сплавов с различным содержанием меди, так же, как и при анализе сталей, объясняется наличием или отсутствием доминанты «темных» или «светлых» фазовых составляющих данных сплавов. Например, в эвтектическом сплаве отсутствуют крупные кристаллы твердого раствора или химического соединения, что влияет не только на прочность данных сплавов, но и на яркость их изображений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемая методика статистической обработки видимой при микрофрактографическом анализе поверхности шлифа исследуемого конструкционного материала позволяет оценивать качество как сталей, так и сплавов в широком диапазоне легирующих элементов.

Особенностью методики является применение предложенного относительного параметра – отношения медианы гистограммы к ее моде ( $M_e/M_o$ ). Предложенный параметр – это диагностический признак, позволяющий не только оценивать изменение химического состава контролируемых конструкционных материалов, но и прогнозировать изменение их механических свойств. Корреляция параметра  $M_e/M_o$  с механическими свойствами объясняется тем, что статистическая обработка цифровых изображений контролируемых поверхностей учитывает наличие или отсутствие фазовых составляющих (по уровню их яркости), которые, в свою очередь, влияют на механические характеристики.

## Список используемых источников

1. Влияние содержания алюминия на коррозионную стойкость сталей / С.М. Дарвейш, А.Н. Добролюбов, Е.Л. Лебедев, Н.С. Самойлов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2015. – Вып. 647. – С. 142–146.
2. Программное обеспечение «Микро-Анализ Pro». Инструкция пользователя ИЮСБ.941239.001 ИЭ. – СПб.: ООО «ЛОМО-Микросистемы», 2012. – 96 с.
3. Металлы и сплавы: справочник. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», АНО НПО «Мир и Семья», 2003. – 1066 с.
4. Материаловедение. Свойства конструкционных материалов: учеб. пособие / Г.М. Завьялова, Н.С. Самойлов, Е.Л. Лебедев, А.Н. Добролюбов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 107 с.
5. *Науменко В.В.* Влияние азота и кремния на механические и коррозионные свойства низкоуглеродистой аустенитной стали для применения в сильноокислительных средах: автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М., 2012.
6. *Шкатов В.В.* Моделирование фазовых и структурных превращений при термической обработке проката из раскисленных алюминием низкоуглеродистых сталей: автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Липецк, 2007.
7. *Захарова Е.Г.* Влияние алюминия на механизмы деформации, деформационное упрочнение и разрушение высокопрочных монокристаллов стали Гадфильда: автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. физико-матем. наук. – Томск, 2005.

И.И. Захарчук,  
кандидат техн. наук, доцент;  
А.Н. Пронин;  
А.А. Рощупкин,  
кандидат техн. наук, доцент

## МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛИТЕЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Представлена модель датчика бортового оборудования космического аппарата длительного функционирования с функцией контроля метрологической исправности в процессе летной эксплуатации. Оценивание метрологической исправности датчика осуществляется на основе статистической обработки информации, получаемой с двух первичных измерительных преобразователей, имеющих одинаковую статическую характеристику.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение космических аппаратов, интеллектуальный датчик, контроль метрологической исправности, статистические методы.

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени еще не сложилась система метрологического обеспечения летной эксплуатации космических аппаратов длительного функционирования [1]. Измерительные системы бортового оборудования космических аппаратов, включающие первичные (датчики) и вторичные измерительные преобразователи, в большинстве своем не включены в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений, валидация их метрологических характеристик не осуществляется процедурой утверждения типа средства измерения, а в процессе эксплуатации – процедурой поверки, так как сроки активного функционирования (более семи лет согласно стандарту [2]) существенно превышают межповерочный интервал для аналогичных по точности наземных измерительных систем.

Существующие методики оценивания нестабильности метрологических характеристик и прогнозирования состояния средств измерений [3] не дают удовлетворительных результатов для автономных бортовых измерительных систем. Определение межповерочных интервалов осуществляют на основе экономического критерия или статистики отказов для типа средства измерения, а не экземпляра с последующей корректировкой первоначального значения в течение всего срока функционирования.

Возможности калибровки бортовых средств измерений с использованием наземных эталонов и астрообъектов в процессе летной эксплуатации существуют для ограниченного перечня измерительных систем. Бортовые системы контроля фиксируют функциональный, а не метрологический отказ (выход метрологических характеристик за установленные пределы по определению, данному в [4]).

Для повышения достоверности измерительной информации необходимы новые подходы к оцениванию состояния бортовых средств измерений, основанные на интеллектуализации процедур обработки.

На сегодняшний день сложились два подхода к толкованию понятия «интеллектуальное средство измерения».

Первый подход нашел отражение в семействе стандартов IEEE 1451 «Smart Transducer Interface Standards» [5–8]. Согласно стандарту интеллектуальный измерительный преобразователь (*smart transducer*) – первичный измерительный преобразователь (датчик) с интеле-

гированной электроникой, выполняющий одну или несколько функций: логическую (собственно интеллектуальную); принятия решений (функцию управления); функцию двусторонней связи. Интеллектуальные функции такого датчика могут рассматриваться как в «узком» смысле – компенсация дополнительных погрешностей, вызванных условиями измерений, так и в «широком» смысле – повышение метрологических характеристик за счет применения интеллектуальных алгоритмов, основанных на базах знаний. Анализируя стандарты IEEE 1451, следует отметить, что они определяют прежде всего технические спецификации и интерфейсы интеллектуальных датчиков как компонентов открытых систем, обеспечивающих их функциональную совместимость с другими компонентами.

Второй подход, изложенный в [9–12], определяет интеллектуальный датчик как «адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля», а термин «метрологический самоконтроль» раскрывается как «автоматическая проверка метрологической исправности датчика в процессе его эксплуатации, осуществляемая с использованием принятого опорного значения, формируемого с помощью встроенного в датчик средства (измерительного преобразователя или меры) или выделенного дополнительного параметра выходного сигнала». В отличие от стандартов IEEE 1451, стандарты [9–12] не определяют технических спецификаций, общих методик синтеза таких датчиков. Предлагается выделять диагностические параметры исходя из технических особенностей конкретных типов датчиков и физических принципов измерения.

Предлагаемая модель интеллектуального датчика основывается на статистических процедурах обработки измерительной информации без привязки к типу датчика.

## МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ИСПРАВНОСТИ ДАТЧИКА

Пусть модель датчика бортового оборудования представлена в виде

$$y = f(x) + \Delta(t), \quad (1)$$

где  $y$  – выходной сигнал датчика;

$f(x)$  – функция преобразования от входного сигнала  $x$ ;

$\Delta(t)$  – основная погрешность датчика, изменяющаяся во времени  $t$ .

Изменение критической метрологической характеристики – основной погрешности – во времени представляет собой случайный нестационарный процесс, множества реализаций которого в общем случае могут быть представлены в виде ансамбля кривых  $\Delta_i$  (рис. 1), лежащих внутри полосы погрешностей с квантильными границами, которые определяются заданной доверительной вероятностью  $P$ .

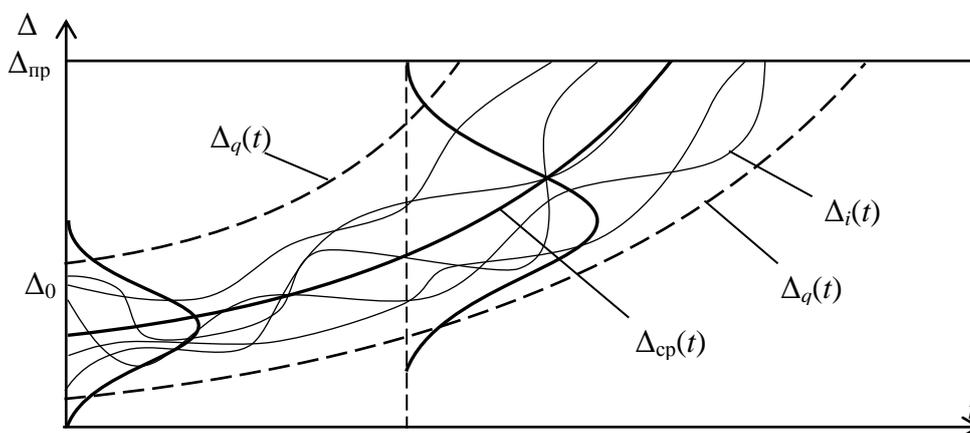


Рис. 1. Случайный процесс изменения основной погрешности

Метрологический отказ наступает при пересечении кривой  $\Delta_i$  прямой предельно допустимого значения –  $\Delta_{пр}$ .

Пусть плотность распределения погрешности в каждом сечении – симметричная унимодальная функция. Тогда доверительные границы погрешности  $\Delta_q(t_i)$  для каждого сечения  $t_i$  выражаются аналитически в виде зависимости  $\Delta_q(t_i) = \Delta_{cp}(t_i) + k\sigma(t_i)$ , где  $\Delta_{cp}(t_i)$  – математическое ожидание случайного процесса для сечения  $t_i$ ;  $k$  – квантильный множитель, соответствующий заданной доверительной вероятности;  $\sigma(t_i)$  – стандартное отклонение погрешности датчика для сечения  $t_i$ . Значение квантильного множителя  $k$  определяется законом распределения погрешности в сечении и доверительной вероятностью  $P$ . Так как вид закона распределения не определен, то воспользуемся положением, что при доверительной вероятности  $P = 0,9$  для высокоэнтропийных и симметричных законов распределения случайного процесса квантильный множитель  $k = 1,6$ . При этих условиях состояние метрологической исправности датчика в момент  $t_i$  определяется следующим выражением:

$$\Delta_{пр}(t_i) > \Delta_{cp}(t_i) + 1,6\sigma(t_i). \quad (2)$$

## МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА

Пусть измеряемая величина  $x$  в моменты времени  $t_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) наблюдается двумя датчиками с одинаковыми метрологическими характеристиками, описываемыми выражением (1). Результаты измерения представляются в виде  $y_{i1} = x_i + \Delta_{i1}$ ,  $y_{i2} = x_i + \Delta_{i2}$ , где  $y_{i1}, y_{i2}$  – результаты наблюдений первого и второго датчиков на  $i$ -й момент времени;  $\Delta_{i1}, \Delta_{i2}$  – основные погрешности первого и второго датчиков на  $i$ -й момент времени. Будем полагать, что на интервале наблюдения случайный процесс стационарен (начало эксплуатации), стандартные отклонения погрешностей датчиков  $\sigma(\Delta_1)$  и  $\sigma(\Delta_2)$  составляют  $\sigma(\Delta_1) = \sigma(\Delta_2) = \sigma(\Delta)$  (измерения равнозначны),  $\Delta_{cp}(t_1) = \text{const}$ . Для каждой пары наблюдений определим разность  $d_i$ :

$$\begin{cases} d_1 = y_{11} - y_{12} = \Delta_{11} - \Delta_{12}, \\ d_2 = y_{21} - y_{22} = \Delta_{21} - \Delta_{22}, \\ \vdots \\ d_n = y_{n1} - y_{n2} = \Delta_{n1} - \Delta_{n2}. \end{cases} \quad (3)$$

Выборка случайной величины  $d$  и ее выборочные характеристики стандартного отклонения  $S(d)$  и среднего  $\bar{d}$  на начальной стадии эксплуатации могут служить своеобразным «эталоном сравнения» для контроля метрологической исправности на последующих стадиях, так как между стандартным отклонением разности погрешностей датчиков и стандартным отклонением погрешности датчика существует связь. Возведем в квадрат каждое уравнение системы (3):

$$\begin{cases} d_1^2 = \Delta_{11}^2 + \Delta_{12}^2 - 2\Delta_{11}\Delta_{12}, \\ d_2^2 = \Delta_{21}^2 + \Delta_{22}^2 - 2\Delta_{21}\Delta_{22}, \\ \vdots \\ d_n^2 = \Delta_{n1}^2 + \Delta_{n2}^2 - 2\Delta_{n1}\Delta_{n2}. \end{cases} \quad (4)$$

Суммируем уравнения (4) и разделим обе части полученных сумм на  $n$ :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{i1}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{i2}^2 - \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{i1}\Delta_{i2}. \quad (5)$$

Выражение (5) с увеличением  $n$  примет следующий вид:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{i1}^2}{n} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{i2}^2}{n} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2 \sum_{i=1}^n \Delta_{i1}\Delta_{i2}}{n}. \quad (6)$$

Так как измерения равноточны:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{i1}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{i2}}{n} = 0, \quad (7)$$

то можем записать:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{i1}^2}{n} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{i2}^2}{n}. \quad (8)$$

Выражения  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2$ ,  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{i1}^2$  и  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{i2}^2$  с учетом (7) могут рассматриваться как состоятельные смещенные оценки дисперсии разности погрешности и дисперсии погрешности первого и второго датчиков на интервале наблюдения, т. е.  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 = S^2(d)$ ,  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{i1}^2 = S^2(\Delta_1)$ , и  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{i2}^2 = S^2(\Delta_2)$ . Отсюда выражение (8) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} S^2(d) &= \lim_{n \rightarrow \infty} S^2(\Delta_1) + \lim_{n \rightarrow \infty} S^2(\Delta_2), \\ \sigma^2(d) &= \sigma^2(\Delta_1) + \sigma^2(\Delta_2) = 2\sigma^2(\Delta). \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, оценка стандартного отклонения погрешности датчика  $S(\Delta)$  связана с оценкой стандартного отклонения разности погрешностей  $S(d)$  датчиков зависимостью

$$S(\Delta) = \frac{S(d)}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{2n}}. \quad (10)$$

Представленные на рис. 2 диаграммы Тьюки, полученные моделированием распределений погрешностей датчиков, показывают, что медианы распределений оценок стандартных отклонений погрешностей датчиков, полученных согласно (10) на основании разностей  $d_i$ , дают удовлетворительную оценку при небольших объемах выборки.

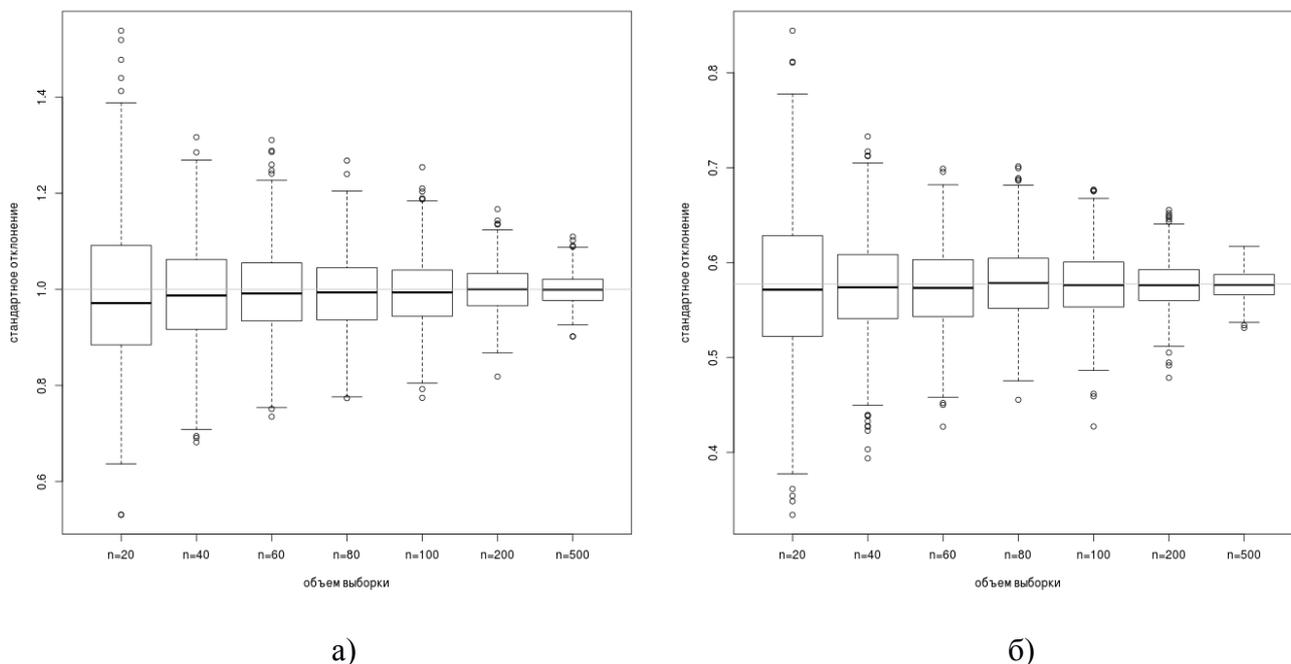


Рис. 2. Зависимость распределения оценки разности погрешностей от объема выборки:  
 а – при нормальном законе распределения погрешности датчика  $N(0,1)$ ;  
 б – при равномерном законе распределения погрешности датчика  $U(-1,1)$

Оценка стандартного отклонения разности  $S(d)$  может быть получена также по формуле Бесселя:

$$S'(d) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{(n-1)}}, \quad \bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}.$$

С учетом выражения (9) имеем вторую формулу для вычисления оценки стандартного отклонения погрешности датчика в зависимости от оценки стандартного отклонения разности:

$$S'(\Delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{2(n-1)}}.$$

На рис. 3 представлены сравнительные результаты распределения оценок стандартного отклонения разности, вычисленных по формулам (10) и (11) при равноточных и неравноточных показаниях датчиков (отличие в дисперсиях). Оценки идентичны.

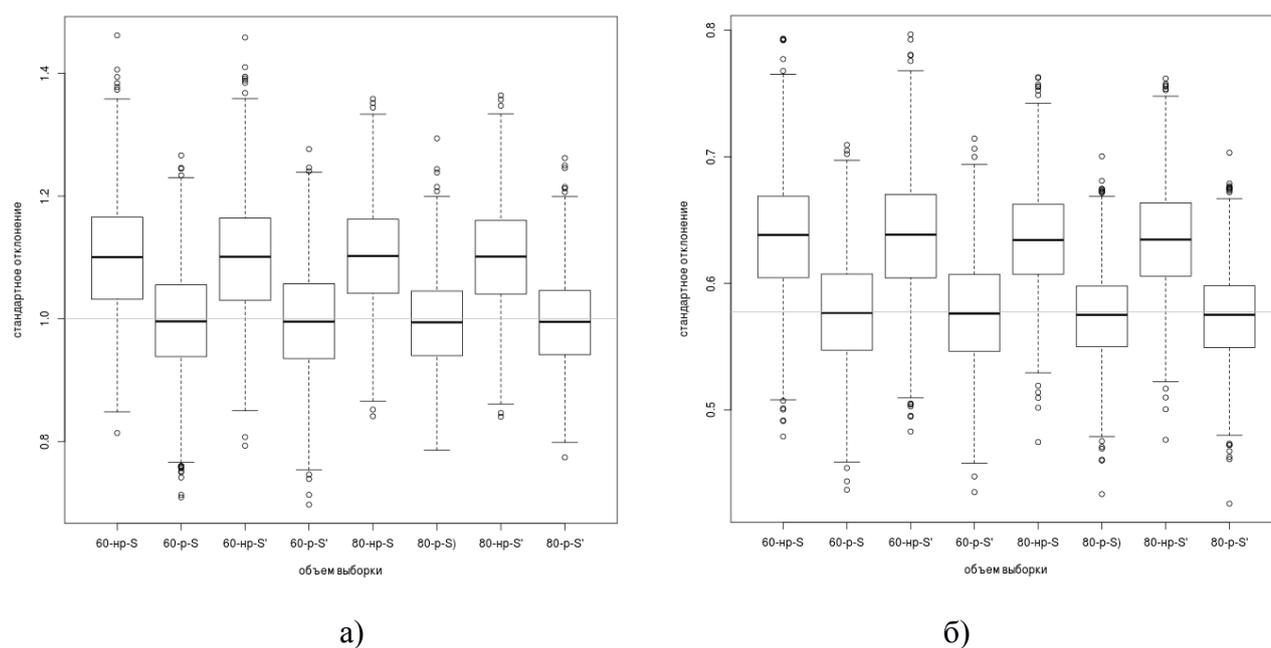


Рис. 3. Зависимость распределения оценки разности погрешностей при рассогласовании дисперсий погрешностей датчиков при расчетах по обеим формулам:

а – при законах распределения погрешности датчиков  $N(0;1)$  и  $N(0;1,1)$ ;

б – при законах распределения погрешности датчиков  $U(-1;1)$  и  $U(-1,1;1,1)$

Для получения оценок сдвига распределения погрешностей воспользуемся тем, что оценка (11) несмещенная. При условии сохранения равных стандартных отклонений погрешностей датчиков, но при наличии сдвига в распределении оценки существенно отличаются (рис.4).

Оценки, вычисленные по формуле (11), не отличаются от оценок, полученных при отсутствии такого сдвига и вычисленных по формуле (10). Численное значение сдвига может быть получено методами дисперсионного анализа.

На рис. 5 представлен общий случай, когда имеются отличия как в характеристиках сдвига, так и в характеристиках разброса. Эти отличия отражаются в различиях характеристик распределений оценок, полученных по формулам (10) и (11).

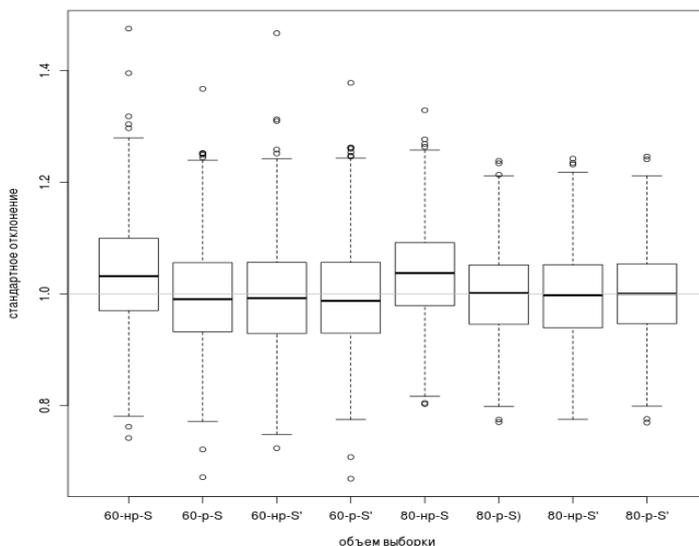


Рис. 4. Зависимость распределения оценки разности погрешностей от способа вычисления оценки при равных стандартных отклонениях погрешностей датчиков и сдвиге в распределении в одном из них ( $N(0;1)$  и  $N(0,4;1)$ )

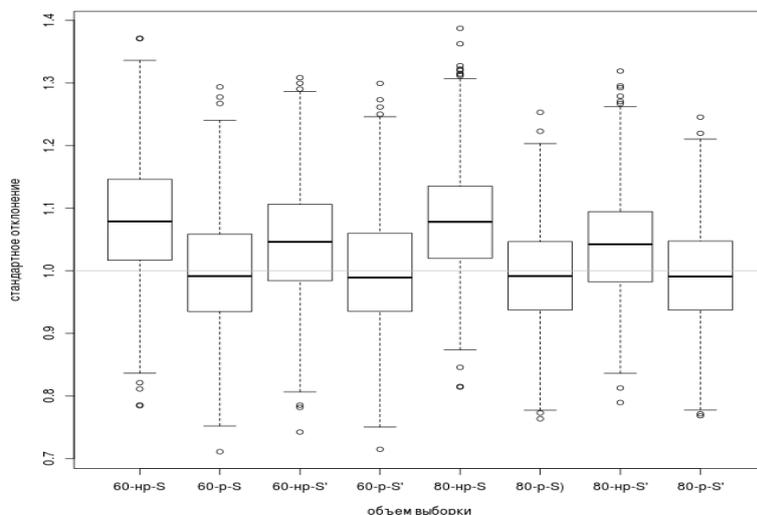


Рис. 5. Зависимость распределения оценки разности погрешностей от способа вычисления оценки при неравных стандартных отклонениях погрешностей датчиков и сдвиге в распределении в одном из них ( $N(0;1)$  и  $N(0,4;1.1)$ )

Таким образом, модель интеллектуального датчика может основываться на обработке измерительной информации, поступающей от двух первичных преобразователей, имеющих идентичные метрологические характеристики на начальной стадии эксплуатации. Для получения оценок диагностических параметров, входящих в неравенство (2), необходимо сформировать «эталонную выборку» (3) и определить характеристики этой выборки, вычислить оценки разброса и сдвига погрешности на интервалах, основываясь на оценках стандартного отклонения разностей погрешностей (10) и (11), полученных в ходе эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании приведенных результатов моделирования можно сделан вывод о том, что представленный подход может быть использован для контроля метрологической исправности средств измерений в процессе эксплуатации. Кроме того, он может быть пригоден для синтеза интеллектуальных датчиков космических аппаратов длительного функционирования.

### Список используемых источников

1. Захарчук И.И., Пронин А.Н. Метрологическое обеспечение летной эксплуатации космических аппаратов длительного функционирования // Труды Всероссийской научно-практической конференция «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – С. 47–53.
2. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 27 с.
3. РМГ 74-2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – М.: Стандартинформ, 2006. – 21 с.
4. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 55 с.
5. IEEE 1451.2-1997 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats.
6. IEEE 1451.1-1999 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Network Capable Application Processor Information Model.
7. IEEE 1451.3-2003. IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Digital Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats for Distributed Multidrop Systems.
8. IEEE 1451.4-2004. Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats.
9. ГОСТ 8.673-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.
10. ГОСТ Р 8.734-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.
12. ГОСТ Р 8.825-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 17 с.

Д.Д. Зыков,  
кандидат военных наук;  
К.А. Крупский,  
кандидат техн. наук;  
А.Б. Спесивцев

## ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ СРЕДСТВ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На основе применения математического аппарата обработки избыточной измерительной информации и данных по зарубежным и отечественным системам средств высокоточных измерений для заданного космического объекта проведено оценивание зависимости точности оценивания положения космического объекта от состава и тактико-технических характеристик средств высокоточных измерений. По итогам анализа полученных зависимостей обоснованы главные направления развития системы средств высокоточных измерений, которые подтверждены результатами математического моделирования.

Ключевые слова: космический объект, наклонная дальность, траекторные измерения, погрешности измерений, погрешности оценок положения, угловые координаты.

### ВВЕДЕНИЕ

Для получения высокоточных оценок положения космических объектов (КО), а также для решения ряда научных задач (уточнение орбит навигационных космических аппаратов, калибровка навигационно-геодезических и радиотехнических систем траекторных измерений, бортовых радиотехнических систем, обнаружение и определение координат космического мусора и его фрагментов и др.) создана и функционирует Международная служба лазерных измерений, представляющая собой сложную организационно-техническую структуру, основой которой являются высокоточные средства измерений, расположенные по всему миру [1]. В настоящее время функционируют 45 станций [2].

Кроме различного географического расположения зарубежных средств измерений (СИ) и средств, размещенных на территории Российской Федерации, они отличаются и по тактико-техническим характеристикам (ТТХ). Таким образом, выявление зависимости точности определения положения КО от состава, ТТХ, расположения отечественных и зарубежных СИ при избыточности измерительной информации, а также обоснование направлений развития отечественной системы средств высокоточных измерений на основе ее анализа являются актуальными научными задачами.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходными данными для решения задачи определения зависимости точности определения положения КО от состава, ТТХ и расположения отечественных и зарубежных СИ будут являться:

– состав зарубежных СИ, который можно записать в виде

$$\mathbf{S}_{\text{зар}} = [S_n(B_n, L_n, H_n)], \quad n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $S_n$  –  $n$ -е зарубежное СИ;

$B_n, L_n, H_n$  – геодезические координаты  $n$ -го зарубежного СИ;

$N$  – количество зарубежных СИ.

– состав отечественных СИ, который можно записать в виде

$$\mathbf{S}_{\text{отеч}} = [S_l(B_l, L_l, H_l)], \quad l = \overline{1, L}, \quad (2)$$

где  $S_l$  –  $l$ -е отечественное СИ;

$B_l, L_l, H_l$  – геодезические координаты  $l$ -го отечественного СИ;

$L$  – количество отечественных СИ.

– показатели точности измерений наклонной дальности до КО и его угловых координат зарубежными СИ, которые можно записать в виде

$$\Delta \mathbf{S}_{\text{зар}} = [\sigma R_n, \sigma \alpha_n, \sigma \beta_n, \delta R_n, \delta \alpha_n, \delta \beta_n], \quad n = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где  $\sigma R_m, \sigma \alpha_m, \sigma \beta_m$  – случайные составляющие погрешностей измерений  $R, \alpha, \beta$  зарубежными СИ;

$\delta R_m, \delta \alpha_m, \delta \beta_m$  – систематические составляющие погрешностей измерений  $R, \alpha, \beta$  зарубежными СИ.

– показатели точности измерений наклонной дальности до КО и его угловых координат отечественными СИ, которые можно записать в виде

$$\Delta \mathbf{S}_{\text{отеч}} = [\sigma R_l, \sigma \alpha_l, \sigma \beta_l, \delta R_l, \delta \alpha_l, \delta \beta_l], \quad l = \overline{1, L}, \quad (4)$$

где  $\sigma R_l, \sigma \alpha_l, \sigma \beta_l$  – случайные составляющие погрешностей измерений  $R, \alpha, \beta$  зарубежными СИ;

$\delta R_m, \delta \alpha_m, \delta \beta_m$  – систематические составляющие погрешностей измерений  $R, \alpha, \beta$  зарубежными СИ.

– параметры движения КО, заданные вектором для момента времени  $t=k$ :

$$\boldsymbol{\theta}_{\text{КО}}(k) = [x(k), y(k), z(k), Vx(k), Vy(k), Vz(k)]^T \quad (5)$$

где  $x(k), y(k), z(k)$  – положение КО;

$Vx(k), Vy(k), Vz(k)$  – составляющие скорости КО.

Необходимо, используя существующие алгоритмы совместной обработки измерительной информации и с учетом пространственной (структурной) и временной избыточности измерений, определить совокупности итоговых оценок вектора положения КО, их математических ожиданий и ковариационных матриц  $(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\Sigma}^{\text{КО}}, \mathbf{M}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\Sigma}^{\text{КО}}}, \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\Sigma}^{\text{КО}}})$ , полученных с применением совокупности отечественных и зарубежных СИ.

Результаты анализа итоговых оценок положения КО и их точностных характеристик позволят обосновать направления развития отечественной системы средств высокоточных измерений.

## РЕШЕНИЕ

Для расчета итоговых оценок положения КО необходимо воспользоваться следующим выражением [3]:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\Sigma}^{\text{КО}}(k) = \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\Sigma}^{\text{КО}}}(k) \cdot \left[ \sum_{n,l=1}^{N,L} \boldsymbol{\gamma}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}_{n,l}}^{-1}(k) \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}_{n,l}(k) \right], \quad n = \overline{1, N}, \quad l = \overline{1, L}, \quad (6)$$

где  $\boldsymbol{\gamma}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\Sigma}^{\text{КО}}}(k)$  – ковариационная матрица итоговой оценки вектора положения КО;

$\boldsymbol{\gamma}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}_{n,l}}(k)$  – ковариационная матрица оценки вектора положения КО, полученного с использованием  $n$ -го или  $l$ -го СИ;

$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{n,l}(k)$  – оценка вектора положения ОИ, полученная с использованием  $n$ -го или  $l$ -го СИ.

Ковариационная матрица итоговой оценки вектора положения КО рассчитывается по формуле [3]

$$\gamma_{\hat{\theta}_{\Sigma}^{\text{КО}}}(k) = \left[ \sum_{n,l=1}^{N,L} \gamma_{\hat{\theta}_{n,l}}^{-1}(k) \right]^{-1}. \quad (7)$$

При таком подходе к формированию итоговых оценок вектора положения КО и их ковариационных матриц учитывается пространственно-геометрическое расположение СИ относительно траектории полета КО [4, 5].

Ковариационная матрица  $\gamma_{\hat{\theta}_{n,l}}(k)$  рассчитывается с использованием выражения

$$\gamma_{\hat{\theta}_{n,l}}(k) = \left[ \mathbf{H}_{n,l}^T(k) \cdot \mathbf{P}_{n,l} \cdot \mathbf{H}_{n,l}(k) \right]^{-1}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{H}_{n,l}(k)$  – матрица частных производных от измеряемых параметров по оцениваемым параметрам движения КО;

$\mathbf{P}_{n,l}$  – матрица весовых коэффициентов.

Математические ожидания итоговых оценок положения КО рассчитываются с использованием выражения [6, 7]

$$\mathbf{M}_{\hat{\theta}_{n,l}}(k) = \gamma_{\hat{\theta}_{\Sigma}^{\text{КО}}}(k) \cdot \mathbf{H}_{N,L}^T(k) \cdot \mathbf{P}_{N,L} \cdot \mathbf{B}_{N,L}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{B}_{N,L} = \left[ \delta R_{n,l} \mid \delta \alpha_{n,l} \mid \delta \beta_{n,l} \mid \dots \mid \delta \beta_{N,L} \right]^T$ .

Результаты анализа зависимостей, полученных с использованием выражений (6)–(9) для совокупности зарубежных и отечественных СИ, позволят обосновать направления развития отечественной системы средств высокоточных измерений.

## ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ

В качестве исходных данных для расчета использовались следующие ТТХ существующих отечественных и зарубежных СИ:

среднее квадратическое отклонение измерения дальности, град, – 0,005–0,02;

систематическая составляющая погрешности измерения угловых координат КО, угл. сек, – 1–2;

азимут, град, – 0;

сектор обзора, град, – 360;

угол места (УМ) верх, град, – 90;

дальность действия, м, – 40 000 000.

Среднее квадратическое отклонение измерения азимута и угла места:

для отечественных СИ, угл. сек, – 1;

для зарубежных СИ, угл. сек, – 0,75.

Временной интервал моделирования – 1 сутки. При моделировании параметры атмосферы приняты благоприятными.

В качестве КО выбран космический аппарат дистанционного зондирования Земли. В расчетах использовались следующие параметры орбиты:

высота солнечно-синхронной орбиты, км, – 617;

период обращения, мин, – 97;

эпоха – 6325,7611;

кеплеровские элементы:

большая полуось, м, – 6 998 648,83;

прямое восхождение восходящего узла, град, – 196,6089;

наклонение, град, – 97,8654;

эксцентриситет, – 0,0013;

аргумент перигея, град, – 68,4444;

истинная аномалия, град, – 291,5547;

радиус апогея, м, – 7 007 916,8500;  
радиус перигея, м, – 6 989 380,8100.

Для решения задачи анализа точности оценивания положения КО выбраны две группы станций, состоящих из 10 отечественных и 16 зарубежных СИ, имеющих определенное географическое расположение (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Координатная информация группы отечественных СИ**

№ п/п	Станция	Долгота, град	Широта, град	Высота, м	УМ низ, град
1	Комсомольск-на-Амуре	136.74383 E	50.69461 N	269,4027	20
2	Менделеево 2	37.224903 E	56.027736 N	229,053	20
3	Алтай	82.3 E	51.2 N	270	20
4	Архыз	41.4333 E	43.6500 N	2077	20
5	Байконур	63.3422 E	45.7047 N	98,3	20
6	Светлое	29.7805 E	60.5332 N	69	20
7	Зеленчукская	41.5654 E	43.7887 N	1155,4	20
8	Бадары	102.2354 E	51.7700 N	803,3	20
9	Иркутск	104.3164 E	52.2191 N	505,62	20
10	Кацивели, Респ. Крым	33.9701 E	44.3932 N	68,7	20

Таблица 2

**Координатная информация группы зарубежных СИ**

№ п/п	Станция	Долгота, град	Широта, град	Высота, м	УМ низ, град
1	Голосеев, Украина	30.4961 E	50.3633 N	212,9	20
2	Симеиз, Украина	33.9931 E	44.4128 N	361,20	12
3	Рига, Латвия	24.059075 E	56.948551 N	31,3367	15
4	Апач Пойнт, США	105.820417 W	32.780361 N	2788	15
5	МакДональд, США	255.9848 E	30.6802 N	2006,2210	20
6	Гринбелт, США	76.82770 W	39.0206 N	19,184	10
7	Монумент Пик, США	116.4227 W	32.8917 N	1842,177	20
8	Халекаала, США	203.743079 E	20.706489 N	3056,272	20
9	Боровиц, Польша	17.0746 E	52.2770 N	123,4	20
10	Ветцелль, Германия	12.8781000 E	49.1449402 N	663,174	15
11	Грац, Австрия	15.4942 E	47.0678 N	495	5
12	Херстмонсо, GB	0.3361 E	50.8674 N	75	25-30
13	Потсдам, Германия	13.0614 E	52.3830 N	123,5	20
14	Грас, Франция	6.9216 E	43.7546 N	1323,1	5
15	Матера, Италия	16.7046 E	40.6486 N	536,9	20
16	Ветцелль, Германия	12.8780 E	49.1444 N	665	10

На рис. 1 представлена зависимость погрешности определения положения КО от состава, ТТХ и расположения отечественных и зарубежных СИ, на рис. 2 – погрешности определения положения группами отечественных и зарубежных СИ.

Минимальная погрешность определения положения КО группой отечественных СИ составляет 0,0100 м, а группой зарубежных СИ – 0,0048 м. Максимальная погрешность определения положения КО составляет соответственно 9,5605 и 12,2328 м.

Анализ диаграмм, представленных на рис. 2, показывает, что отечественные СИ имеют погрешности определения положения КО значительно большие в сравнении с зарубежными.

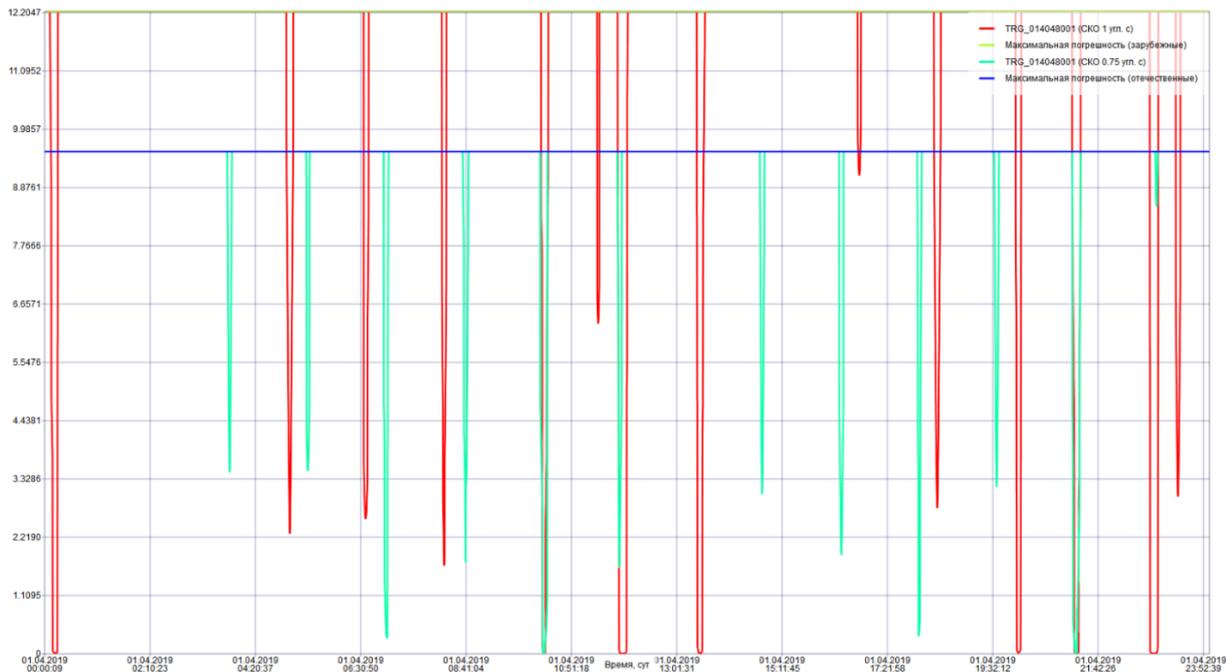


Рис. 1. Погрешности определения положения космического объекта

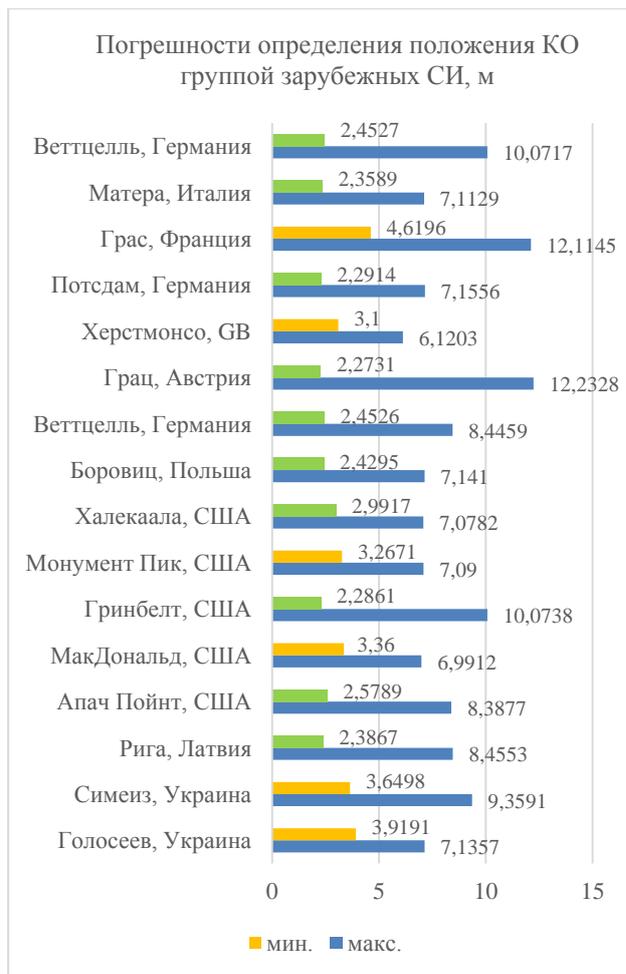
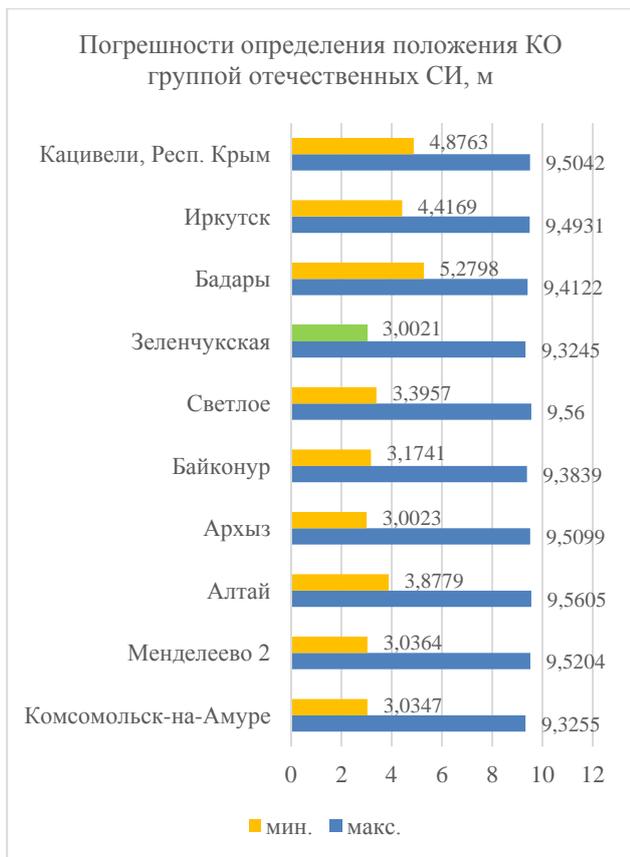


Рис. 2. Погрешности определения положения космического объекта группами отечественных и зарубежных средств измерений

Предположим, что ТТХ отечественных СИ, в частности СКО измерений азимута и угла места, сопоставимы с характеристиками зарубежных СИ (составляет 0,75 угл. сек) при том же географическом положении. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

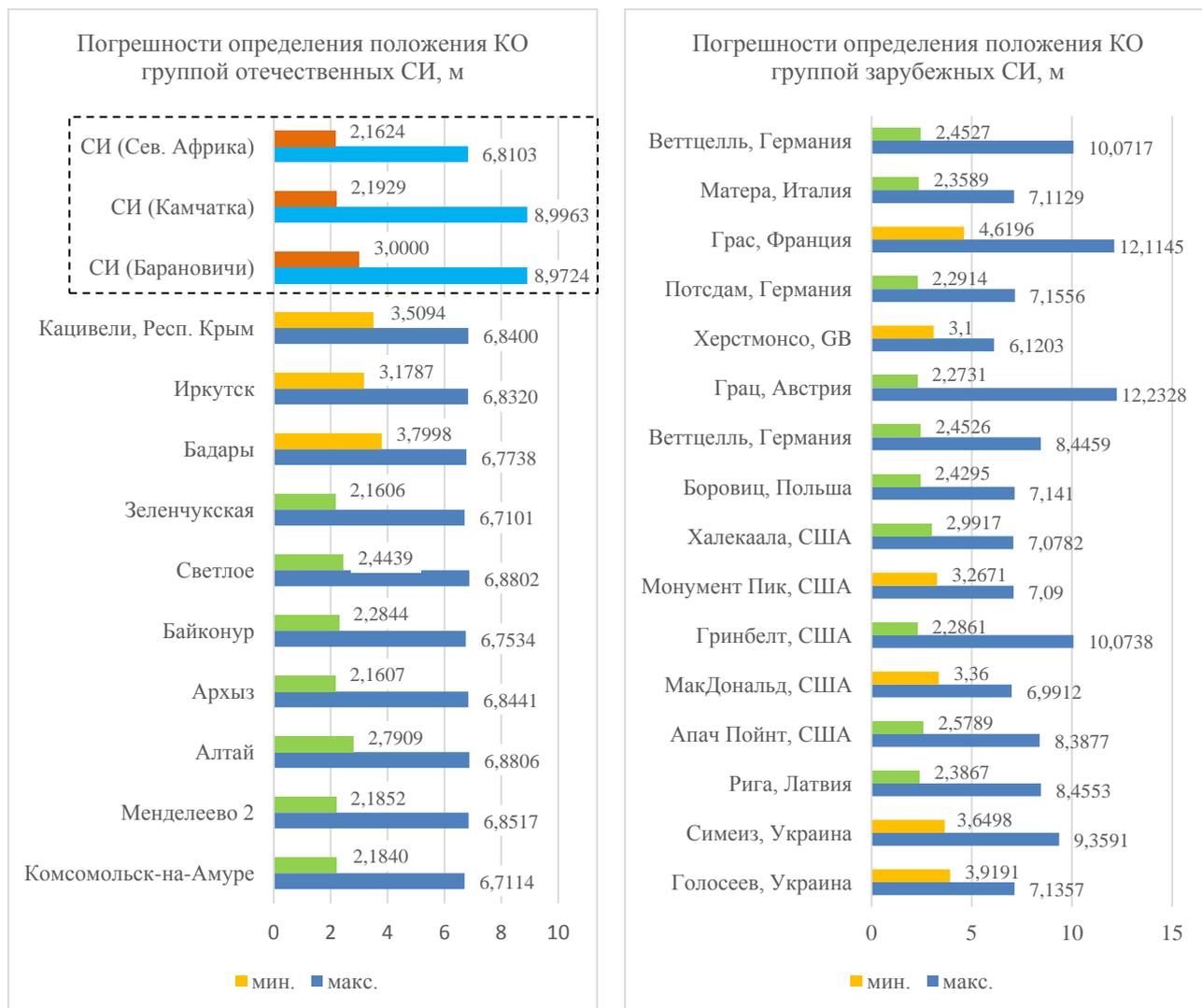


Рис. 3. Погрешности определения положения космического объекта при равных значениях средних квадратических отклонений измерений азимута и угла места

Результаты анализа данных, полученных при решении задачи определения зависимости точности определения положения КО от состава, ТТХ и положения СИ (рис. 1–3) показал, что зарубежные станции за весь период наблюдения провели 54 сеанса наблюдения, при этом общее количество времени обсервации КО составило 320,33 мин (22,25%). Период наблюдения КО отечественными станциями составил 129,93 мин (9,02%) в течение 25 сеансов наблюдения.

Таким образом, наилучшими остаются результаты, полученные группой зарубежных СИ, что объясняется их составом, ТТХ и географическим расположением, позволяющим получить большее количество сеансов наблюдения КО на восходящих и нисходящих витках орбиты. Развитие системы средств высокоточных измерений возможно по следующим основным направлениям.

1. Размещение высокоточных СИ как на территории Российской Федерации, так и за ее пределами.

2. Улучшение ТТХ СИ в части точности измерения угловых координат и наклонной дальности до КО.

Для проверки зависимости точности оценивания положения КО от состава СИ добавим три новые географически удаленные друг от друга СИ в группу отечественных СИ (табл. 3). Погрешности оценок положения КО (см. рис. 3), новые СИ обведены контуром, при совместной обработке избыточной измерительной информации позволяют повысить точность итоговых оценок положения КО.

Таблица 3

### Координатная информация отечественных СИ

№ п/п	Станция	Долгота, град	Широта, град	Высота, м	УМ низ, град
1	СИ (Северная Африка)	13.5200 E	32.5200 N	0,0000	20
2	СИ (Камчатка)	158.3400 E	53.2200 N	0,0000	12
3	СИ (Барановичи)	26.0100 E	53.1300 N	0,0000	12

Результаты анализа данных, полученных в результате моделирования, показали, что увеличение количества отечественных СИ с 10 до 13 дает увеличение времени наблюдения КО на 34,39% или дополнительные 68,2 мин за счет 12 сеансов наблюдения.

Общее время наблюдения группой отечественных СИ составило в сумме 198,3 мин (13,77%) за 37 сеансов наблюдения, а точность оценивания положения КО повысилась: минимальная и максимальная погрешности уменьшились и составили, соответственно, 0,0081 м (- 0,0019 м) и 8,9812 м (- 0,5793 м).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа итоговых оценок положения КО и их точностных характеристик позволили обосновать основные направления развития отечественной системы средств высокоточных измерений. Увеличение количества СИ с размещением их как на территории Российской Федерации, так и за ее пределами позволит увеличить количество сеансов наблюдения КО, что, в свою очередь, повысит точность определения положения КО.

Однако основным направлением повышения эффективности функционирования отечественных СИ остается задача улучшения их ТТХ в части точности измерения угловых координат и наклонной дальности до КО.

## Список используемых источников

1. *Gunter S.* Satellite Geodesy. – Berlin, New York, 2003.
2. International Laser Ranging Service. – URL: <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov> (дата обращения: 20.06.2019).
3. *Буренок В.М., Найденов В.Г.* Методы повышения эффективности применения средств и систем обеспечения испытаний вооружения, военной и специальной техники. – М.: Издательский дом «Граница», 2006. – 274 с.
4. Определение и прогнозирование движения центра масс летательного аппарата по результатам траекторных измерений / под ред. С.С. Шмыголь. – М.: МО СССР, 1969. – 121 с.
5. *Огородничук Н.Д.* Обработка траекторной информации. – Киев: Изд-во КВВАИУ, 1981. – Ч. I: Методы реализации пространственной (структурной, параметрической) избы-

точности измерений при решении нелинейных задач контроля недетерминированных траекторий. – 141 с.

6. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.

7. *Мудров В.И., Кушко В.Л.* Методы обработки измерений. – М.: Радио и связь, 1983. – 303 с.

О.Р. Кивчун,  
кандидат технических наук  
филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде,  
г. Калининград

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ БАЛТИЙСКОГО ФЛОТА**

В статье рассматриваются предложения по построению автоматизированной системы управления электропотреблением при эксплуатации объектов военной инфраструктуры Балтийского флота. Новизна предложений заключается в комплексном использовании ее основных элементов: устройства мониторинга, базы данных и программно-аппаратного комплекса, реализующего статическое и динамическое моделирование при управлении электропотреблением на основе векторного рангового анализа.

Ключевые слова: объект военной инфраструктуры, автоматизированная система управления электропотреблением, процесс электропотребления, устройство мониторинга, база данных, векторный ранговый анализ.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Анализ развития информационных технологий в энергетике России показывает, что передача и распределение электрической энергии в дальнейшем будут осуществляться за счет разрабатываемых в последнее время инновационных технологий. На сегодняшний день к таким технологиям относятся интеллектуальные системы учета электроэнергии, современные системы автоматизации и сетевой автоматики, распределенная генерация, цифровые подстанции, технологии компенсации реактивной мощности, электромобили и инфраструктура их зарядки, а также системы сетевого накопления энергии. Все они нашли достаточно широкое применение в различных отраслях промышленности нашей страны, а некоторые – стали частью цифровой экономики [1].

Однако требуется более интенсивно развивать некоторые группы новых технологий, позволяющих повысить эффективность управления электроэнергией в регионах с особым географическим положением. Одним из таких регионов является Калининградская область, которая энергетически зависит от соседних государств. В связи с этим самостоятельное функционирование энергосистемы Калининградской области становится первостепенной и актуальной задачей как для жителей региона, так и для объектов военной инфраструктуры Балтийского флота, которые дислоцируются на ее территории.

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ БАЛТИЙСКОГО ФЛОТА**

Военная инфраструктура Балтийского флота представляет собой совокупность военных объектов и отдельных сооружений, предназначенных для обеспечения выполнения войсками стратегических, оперативно-стратегических, оперативных, боевых задач вооруженной борьбы, размещения и проведения повседневной подготовки войск, а также обслуживания военного производства в мирное время. Объектами военной инфраструктуры (ОВИ) являются пункты управления и дислокации войск, аэродромы, военно-морские базы, ракетные позиции, комплексы связи, системы инженерного оборудования, полигоны, склады и др. [2].

При эксплуатации ОВИ Балтийского флота в различных условиях возникает необходимость в постоянном и бесперебойном обеспечении их электроэнергией. В связи с модернизацией и увеличением ОВИ и, как следствие, возрастанием потребления электроэнергии, возникает необходимость решения актуальной проблемы по ее рациональному использованию и экономии.

Одним из путей, позволяющим решить данную проблему, является совершенствование системы управления электропотреблением. Перед рассмотрением существующей структуры системы управления электропотреблением ОВИ следует ввести два важных понятия, которые позволят более полно изложить ее особенности.

Первое понятие – это управление электропотреблением ОВИ. В толковых словарях русского языка под управлением, как правило, понимается руководство, направление, распоряжение кем-либо или чем-либо. Там же говорится, что управлять – это значит: 1) пользуясь какими-нибудь приборами и приемами, приводить в движение, направлять ход чего-либо; 2) руководить, распоряжаться деятельностью, направлять работу кого-либо или чего-либо; 3) направлять чьи-нибудь поступки, быть побудительной причиной, руководящим началом чего-либо. Тогда в более узком смысле понятие «управление электропотреблением ОВИ» – это обязательное для исполнения систематическое организационно-техническое воздействие на процесс электропотребления со стороны системы управления посредством совместного использования организационных и программно-аппаратных средств. Целью управления электропотреблением ОВИ является получение максимальной экономии электроэнергии при минимизации затрат на всестороннее обеспечение данного процесса.

Кроме того, еще одним понятием, которое необходимо ввести, является «процесс электропотребления ОВИ», под которым понимается управляемый (фиксируемый в базе данных, оцениваемый, прогнозируемый, нормируемый) процесс потребления электроэнергии приемниками или потребителями ОВИ, осуществляемый автономно либо в составе системы управления.

В настоящее время система управления электропотреблением ОВИ представляет собой совокупность организационных и технических подсистем, их взаимосвязей, а также определенных процессов, которые в период эксплуатации ОВИ регулируют управление электропотреблением на различных этапах функционирования. На рис. 1 показано, что она является частью системы технического обеспечения и имеет цель – обеспечение эффективного процесса управления электропотреблением в различные периоды функционирования на этапах восстановления, эксплуатации, снабжения и т. д. [2].

Учитывая многолетний опыт ученых, которые проводили исследования в области систем управления, можно считать, что система управления электропотреблением ОВИ Балтийского флота является сложной военно-технической системой (СВТС) [3–5]. Специфика ее заключается в том, что с момента начала реформирования Вооруженных сил России – примерно с 2012 года – в зависимости от количественного и качественного состояния кораблей флота, а также от уровня социально-экономического развития российского государства, элементы системы управления электропотреблением постоянно менялись. С этого времени она не всегда соответствовала целям и задачам флота, так как в ее состав вошли объекты различных видов Вооруженных сил.

Примерно с 2013 года изменились места дислокации кораблей, созданы новые соединения и части, постоянно модернизируются вооружение и технические средства. Наряду с этим функции управления электропотреблением объектов и обслуживания военной инфраструктуры были переданы гражданским организациям ОАО «Славянка», ОАО «Оборонсервис», ОАО «Оборонэнерго», ОАО «Оборонэнергосбыт», которые не были подчинены органам военного управления Балтийского флота. В настоящее время ситуация в управлении электропотреблением ОВИ практически не изменилась. Вместо вышеуказанных гражданских организаций были созданы другие сервисные организации.

Кроме того, все ОВИ Балтийского флота территориально разнесены друг от друга на значительные расстояния, в результате их электропотребление имеет свои особенности. Например, при прогнозировании электропотребления следует учитывать ряд геофизических параметров: температуру воздуха, освещенность, ветер, влажность и др.

Различное предназначение ОВИ Балтийского флота, особенности их использования, а также их структура – все это накладывает ограничения по предъявлению им норм электропотребления и на определение потенциала энергосбережения. Важно отметить, что организации, обслуживающие ОВИ Балтийского флота, обладают недостаточным количеством программно-аппаратных средств, использующих научно обоснованные методы и методики управления электропотреблением.



*Рис. 1. Структура системы управления электропотреблением при эксплуатации объектов военной инфраструктуры Балтийского флота*

Таким образом, возникает необходимость решения проблемы по созданию автоматизированной системы управления электропотреблением. Элементы такой системы должны находиться на каждом ОВИ и содержать программно-аппаратные решения, позволяющие учесть структуру, предназначение и геофизическое положение ОВИ Балтийского флота, а также реализовывать научно обоснованные методики для оценки потенциала энергосбережения, прогнозирования и нормирования электропотребления. Эксплуатировать такую систему должны органы военного управления.

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ БАЛТИЙСКОГО ФЛОТА

Анализу и исследованию автоматизированных систем управления посвящено довольно большое количество научных работ в теории управления, кибернетике, системном анализе, исследовании операций, ранговом анализе [3–6]. Одним из основных направлений исследований для данных областей науки является совершенствование структур управления. В настоящее время это достигается созданием автоматизированных систем управления, направленных на решение задачи максимальной экономии ресурсов при минимизации затрат. Учитывая актуальность проблемы совершенствования системы управления электропотреблением ОВИ Балтийского флота, в статье сформулированы предложения по построению автоматизированной системы управления электропотреблением (АСУЭ) при эксплуатации ОВИ.

Структура предлагаемой АСУЭ представлена четырьмя уровнями: сбора и передачи данных об объектах, база данных, программно-аппаратный комплекс и поддержки принятия решений (рис. 2).

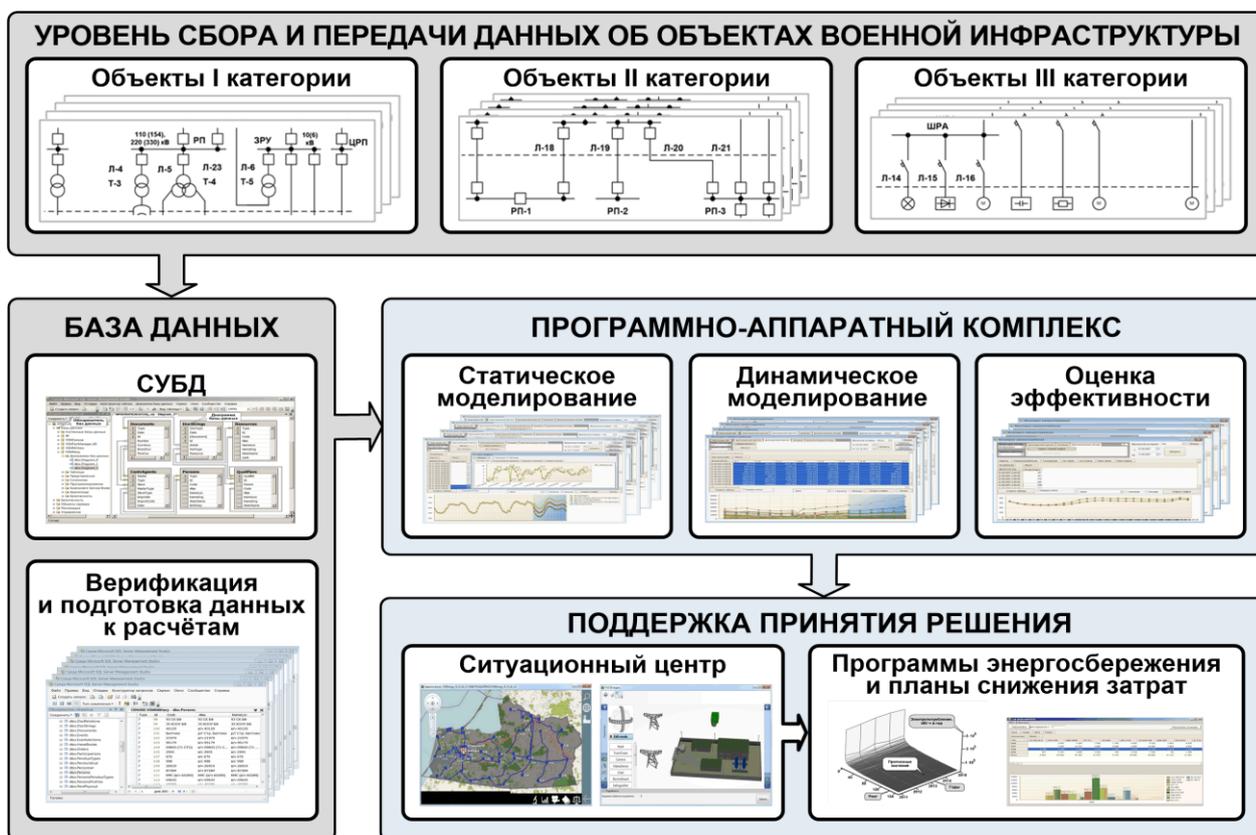


Рис. 2. Структура автоматизированной системы управления электропотреблением при эксплуатации объектов военной инфраструктуры

В табл. 1 приведены краткое описание подсистем и их функции для каждого уровня предлагаемой АСУЭ, а также их типовое оборудование.

Первый уровень АСУЭ предназначен для сбора и передачи данных с точек присоединения к энергосистеме и представлен подсистемой мониторинга и ограничения, в которой основным элементом является устройство мониторинга (УМ) (рис. 3).

Таблица 1

**Уровни построения автоматизированной системы управления  
электропотреблением**

Наименование уровня АСУЭ	Подсистема	Функции	Оборудование и компоненты
Сбора и передачи данных	Мониторинга и ограничения	Мониторинг и контроль значений напряжения, тока, а также частоты в электросети; хранение измеряемой информации	Устройство мониторинга
База данных	Обработки и верификации данных по электропотреблению	Накапливание, хранение и управление информацией об ОВИ; реализация верификации данных	Серверное и коммутационное оборудование, СУБД
Программно-аппаратный комплекс	Статического моделирования	Реализация метода управления электропотреблением на основе синтеза процедур рангового анализа.	Персональные ЭВМ, программное обеспечение, расчетные и графические модули, установленные на автоматизированных рабочих местах
	Динамического моделирования	Реализация метода управления электропотреблением на основе добавочного ресурса	
	Оценки эффективности управления электропотреблением	Реализация методики управления электропотреблением на основе оценки эффективности	
Поддержки принятия решений	Планирования и создания программ	Формирование программ и планов снижения затрат на электропотребление	Инфокоммуникационное оборудование

Первый уровень АСУЭ предназначен для сбора и передачи данных с точек присоединения к энергосистеме и представлен подсистемой мониторинга и ограничения (рис. 3), в которой основным элементом является устройство мониторинга (УМ).

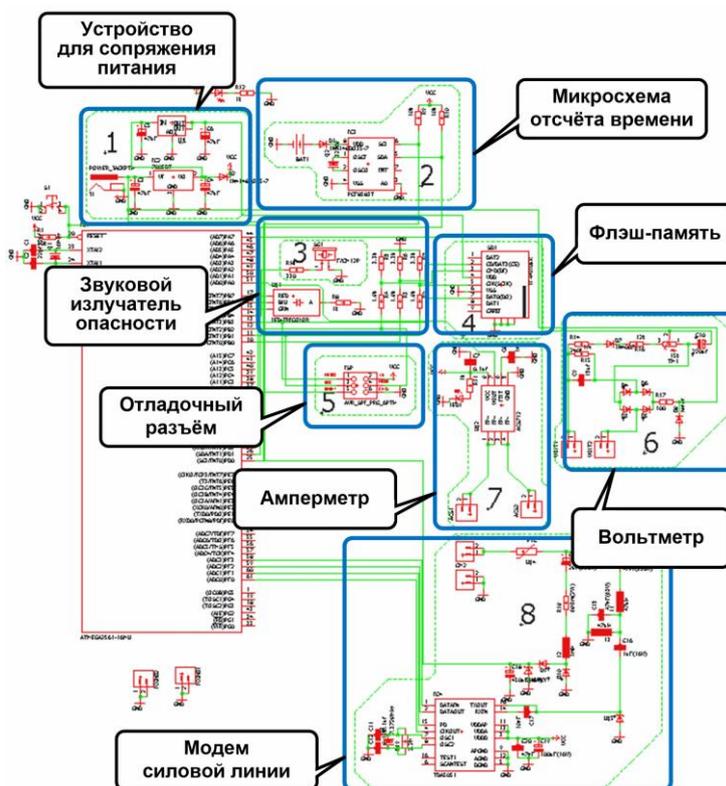


Рис. 3. Базовая схема устройства мониторинга

УМ предлагается устанавливать на всех уровнях системы электроснабжения ОВИ. Характеристика и описание данных уровней подробно представлены в работе [4]. Получение данных с места, где устанавливается УМ, осуществляют датчики измерения напряжения, тока и частоты, подключенные к интерфейсу микропроцессора, выполненные в виде амперметра и вольтметра. К другим цифровым входам интерфейса подключена энергонезависимая память, которая хранит информацию о величине тока, частоте в сети, напряжении, мощности, состояниях включения и выключения электроприемников. Все эти данные хранятся в форматах CSV или XLS с указанием даты и времени текущего часового пояса. Связь с сервером и локальной сетью обеспечивают мультисканальный дуплексный цифровой модем для силовой линии и «Ethernet – Wi-Fi – Bluetooth» чипсет с поддержкой открытых стандартов 433 и 968 МГц. Для управления доступом к стационарной электрической сети общего назначения встроено электромагнитное реле.

Полученные данные с УМ поступают на второй уровень АСУЭ – базу данных управления электропотреблением, которая выполнена в среде *Microsoft SQL Server 2016* [11]. База данных включает в себя систематизированную совокупность таблиц, в которых содержится основная информация об ОВИ, их зданиях и сооружениях, подстанциях и электростанциях, линиях электропередач. Кроме того, база данных содержит сведения, получаемые с УМ, об идентификаторах устройств и электроприборов, подключенных к электрической сети, информацию о состоянии включения и выключения оборудования, а также о распределении электроприемников по группам электроснабжения. Основными таблицами базы данных являются «Список зданий и сооружений», «Категории по надежности электроснабжения», «Список фидеров», «Группы электропотребления», «Идентификаторы устройств», «Виды оборудования», «Виды идентификаторов», «Список линий электропередач» и «Информация о включении и выключении оборудования».

Таким образом, на втором уровне АСУЭ с помощью языка базы данных описываются все элементы энергосистемы, осуществляется верификация данных, показываются связи, начиная

от поставщика электроэнергии до конечного потребителя. Важно отметить, что база данных хранит и формирует своего рода «отпечаток пальца» потребителя – его уникальный определитель, который формируется совместно с УМ.

Информация второго уровня является входными данными для программно-аппаратного комплекса – третьего уровня АСУЭ, где при управлении электропотреблением ОВИ осуществляется статическое и динамическое моделирование. Теоретической основой для них является векторный ранговый анализ [3–6, 8–12].

Основная идея векторного рангового анализа основана на понятии меры ранговой параметрической близости. Для пояснения данного понятия необходимо обратить внимание на рис. 4. Как видно, на нем построены два параметрических радиуса-вектора, однозначно задающие эмпирические точки, соответствующие электропотреблению двух ОВИ, отстающих друг от друга по ранговому параметрическому распределению на 10 рангов:

$$\bar{W}_k, \bar{W}_{k+10}. \quad (1)$$

Тогда разность данных радиусов-векторов  $\bar{W}_k$  и  $\bar{W}_{k+10}$  будет представлять собой длину вектора  $\Delta W$ , который является мерой ранговой топологической близости:

$$\Delta W = |\bar{W}_k - \bar{W}_{k+10}| = \sqrt{(W_k - W_{k+10})^2 + (X_{k+10} - X_k)^2}. \quad (2)$$

Такая форма задания эмпирической (или произвольной) точки в ранговом параметрическом пространстве позволяет использовать новые дополнительные возможности в исследовании динамики систем управления электропотреблением.

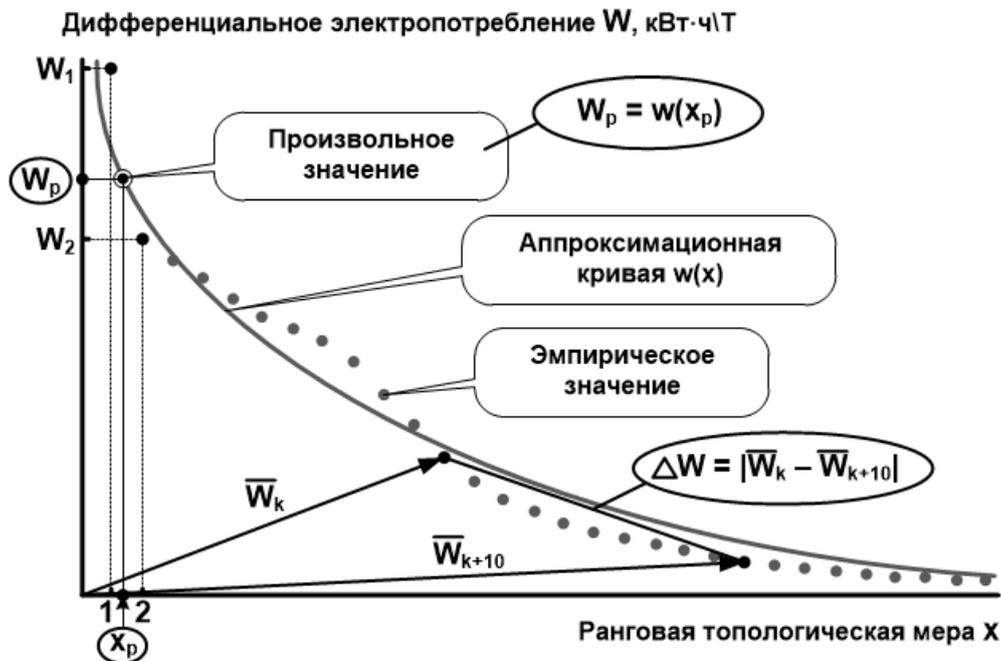


Рис. 4. К понятию рангового параметрического распределения по электропотреблению (в кВт · ч / Т) – значение электропотребления за промежуток времени (знак «|» обозначает, что это не математическая операция «деление»)

На основе положений векторного рангового анализа разработаны и предлагаются для реализации в программно-аппаратном комплексе статическая и динамическая модели управления электропотреблением. На рис. 5 и 6 представлены их структурные схемы [8–10].

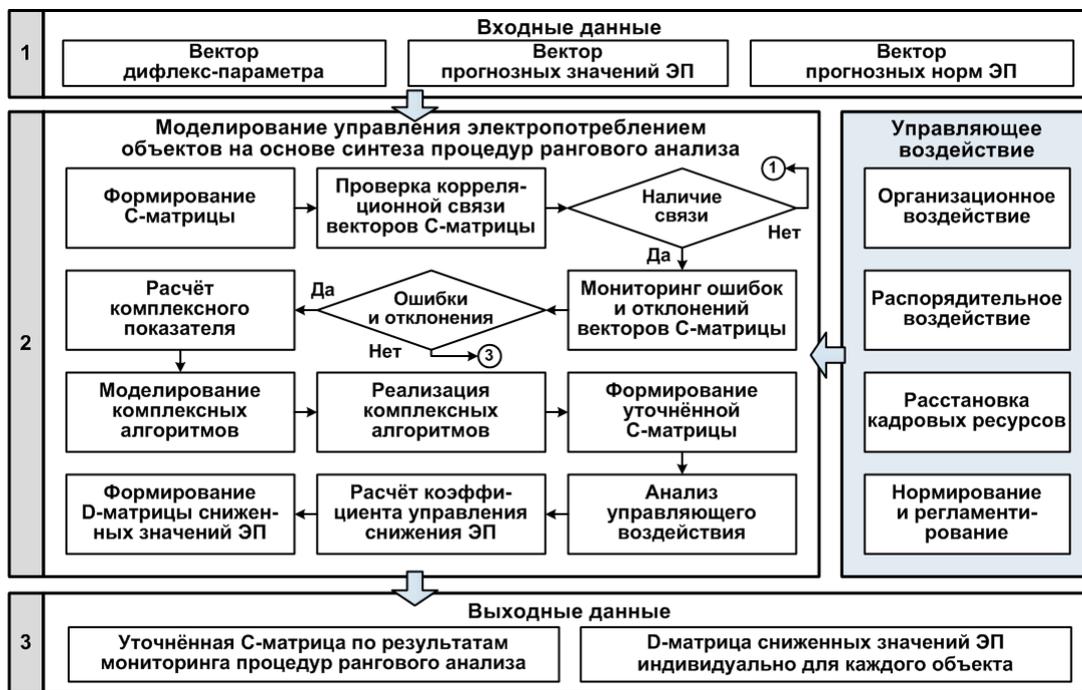


Рис. 5. Структура статической модели управления электропотреблением



Рис. 6. Структура динамической модели управления электропотреблением

Основной целью статической модели управления электропотреблением при эксплуатации ОВИ является реализация синтеза процедур рангового анализа (интервального оценивания, прогнозирования и нормирования электропотребления), направленного на получение свёрхсуммар-

ного эффекта, а также снижение затрат на электропотребление. Статическая модель реализуется для определенного временного интервала и позволяет строить краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные прогнозы электропотребления для ОВИ. Кроме того, модель реализует алгоритм снижения электропотребления на основе управляющего воздействия. Норма снижения электропотребления рассчитывается индивидуально для каждого ОВИ.

Динамическая модель управления электропотреблением позволяет исследовать процесс управления электропотреблением при эксплуатации ОВИ в режиме реального времени [10]. Ее основной целью является реализация процедур, которые существенно уточняют интервальное оценивание, прогнозирование и нормирование электропотребления за счет:

– определения потенциала энергосбережения на основе нормирования удельных показателей энергоэффективности лучших мировых образцов;

– повышения точности прогноза электропотребления, вследствие использования добавочного ресурса, сформированного на основе статистической информации об электропотреблении ОВИ как точки на ранговой параметрической поверхности всех объектов.

– процедуры режимного нормирования электропотребления, позволяющей реализовать планомерное вынужденное снижение электропотребления ОВИ в трех режимах. В третьем режиме осуществляется частичное ограничение от электроснабжения потребителей третьей категории. Второй режим предполагает, помимо потребителей третьей категории, принудительное отключение потребителей второй категории. При введении первого режима, на всех объектах, помимо потребителей второй и третьей категорий, принудительно отключаются потребители первой категории.

На пятом уровне АСУЭ осуществляется операция поддержки принятия решения, которая направлена на оценку эффективности управления электропотреблением ОВИ путем сопоставления двух интегральных показателей, один из которых характеризует положительный эффект, а второй – затраты. Положительный эффект оценивается следующим интегральным показателем:

$$\begin{cases} IP_w^* = \left( \int_0^{\infty} W(x) dx - \int_0^{\infty} W^*(x) dx \right) / \int_0^{\infty} W(x) dx; \\ IP_w^t = \left( \int_0^{\infty} W(x) dx - \int_0^{\infty} W^t(x) dx \right) / \int_0^{\infty} W(x) dx, \end{cases} \quad (3)$$

где  $IP_w^*$  – целевой интегральный показатель;

$IP_w^t$  – текущий интегральный показатель качества, определяемый на  $t$ -м временном интервале;

$W(x)$  – аппроксимационная кривая, полученная на уровне программно-аппаратного комплекса;

$W^*(x)$  – нижняя граница области допустимых значений;

$x$  – ранговая топологическая мера;

$W^t(x)$  – аппроксимационная кривая, получаемая для модельных значений электропотребления объектов на  $t$ -м временном интервале.

Затраты на уровне программно-аппаратного комплекса оцениваются интегральным показателем, который отражает степень отличия совокупных затрат на энергосбережение, рассчитанных в результате моделирования на текущем временном интервале, от стоимости электроэнергии. В условиях индивидуальных тарифов на электроэнергию, предъявляемых ОВИ, данный показатель определяется следующим образом:

$$IP_c = 1 + \frac{\int_0^{\infty} C^t(x) dx}{\int_0^{\infty} (W(x) \cdot sc(x)) dx - \int_0^{\infty} (W^*(x) \cdot sc^*(x)) dx}, \quad (4)$$

где  $C'(x)$  – векторное ранговое параметрическое распределение на  $t$ -м интервале;  
 $x$  – ранговая топологическая мера;  
 $sc(x)$  – векторное ранговое параметрическое распределение тарифа на электроэнергию, предъявляемого объектам на начальном временном интервале;  
 $sc^*(x)$  – векторное ранговое параметрическое распределение тарифа на электроэнергию.

Оценка эффективности управления электропотреблением при эксплуатации ОВИ представляет собой довольно сложный методологический аппарат и предполагает формирование программ и планов снижения затрат при управлении электропотреблением. После оценки эффективности управления электропотреблением ОВИ аналитики и операторы на автоматизированных рабочих местах программно-аппаратного комплекса разрабатывают программы и планы снижения затрат. Векторные ранговые параметрические распределения по затратам (как правило, измеряемым в денежном выражении), а также по тарифам на электроэнергию строятся для ОВИ аналогично соответствующим векторным ранговым распределениям по электропотреблению [11, 12].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложения по построению АСУЭ при эксплуатации ОВИ включают в себя установку и использование УМ, внедрение базы данных, программно-аппаратного комплекса и системы поддержки принятия решения, позволяющих осуществлять статическое и динамическое моделирование при управлении электропотреблением на основе векторного рангового анализа, а также оценку его эффективности. Именно такое сочетание при автоматизированном управлении электропотреблением ОВИ позволит получить максимальную экономию электроэнергии при минимизации затрат на всестороннее обеспечение данного процесса, а также сформировать программы энергосбережения и планы снижения затрат в режиме реального времени.

## Список используемых источников

1. Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016-2020 гг. с перспективой до 2025 года. – М.: ПАО «Россети», 2016. – 341 с.
2. Военная инфраструктура: сайт Министерства обороны Российской Федерации. – URL: <http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12803%40morfDictionary> (дата обращения: 03.01.2019).
3. Морозов Л.М., Петухов Г.Б., Сидоров В.Н. Методологические основы теории эффективности. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1982. – 236 с.
4. Кудрин Б.И. Введение в технетику. – Томск: ТГУ, 1993. – 552 с.
5. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: моногр. – 2-е изд., перераб. и доп. – Электронные текстовые данные. – Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2014. – URL: <http://gnatukvi.ru/ind.html>, свободный (дата обращения: 12.01.2019).
6. Методика мониторинга электропотребления электротехнического комплекса Калининградской области / В.И. Гнатюк, В.Н. Васильев, О.Р. Кивчун, Д.В. Луценко // Промышленная энергетика. – 2015. – № 3. – С. 26–35.
7. База данных для управления электропотреблением техноценологического типа: свидетельство о государственной регистрации базы данных / К.Д. Галев, В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун и др. – № 2018621057. – 15 с.
8. Кивчун О.Р. Метод векторного рангового анализа электропотребления объектов региональной инфраструктуры // Промышленная энергетика. – 2018. – Вып. № 5. – С. 36–43.

9. *Кивчун О.Р.* Метод векторного рангового анализа при управлении электропотреблением объектов военной инфраструктуры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 11. – С. 550–560.
10. *Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Луценко Д.В.* Динамическая модель управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии». – 2017. – Т. № 3, вып. № 4 (38). – С. 112–117.
11. *Авсеенко А.И., Дорофеев С.А., Кивчун О.Р.* Концептуальная модель управления электропотреблением энергетических комплексов на основе оценки потенциала энергосбережения с учетом динамики факторов, влияющих на электропотребление // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 98–105.
12. Potential of Energy Saving as a Tool for Increasing the Stability of Electrical Supply of the Kaliningrad Region / V.I. Gnatyuk, G.V. Kretinin, O.R. Kivchun, D.V. Lutsenko // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2018. – № 8 (1). – P. 137–143.

А.С. Матюнин;  
Е.М. Росляков,  
*кандидат технических наук, профессор*

## **МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК**

Представлены результаты рассмотрения модели трубопроводной сети системы водоснабжения объектов космических войск, отражающей размер утечки при повреждении трубопроводов в результате длительной эксплуатации. На основании полученных результатов дано обоснование возможности применения модели состояния трубопроводов систем водоснабжения при планировании технического обслуживания и ремонта систем жизнеобеспечения.

Ключевые слова: объект космических войск, трубопровод, старение, утечки, коррозия, техническое состояние.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из систем, обеспечивающей выполнение боевых и коммерческих задач космических войск, является система водоснабжения. Спроектированные и смонтированные в 60–80 годы системы водоснабжения объектов наземной космической инфраструктуры к настоящему времени выработали свой ресурс на 65–70%, многие трубопроводы эксплуатируются с превышением проектного срока службы. Трубопроводы, оборудование насосных станций для гарантированного обеспечения выполнения ими функциональных задач нуждаются в масштабной реконструкции, что, безусловно, потребует серьезных затрат для ее осуществления. Трубопроводы относятся к категории промышленных объектов, отказы которых сопряжены со значительными материальным и экологическим ущербом. В результате увеличивающейся продолжительности эксплуатации и износа трубопроводов актуализируется проблема идентификации их технического состояния.

Реконструкция и ремонт систем водоснабжения связаны с выбором приоритетных участков систем проведения ремонтно-строительных работ. Выбор приоритетов требует тщательного анализа состояния сетей систем водоснабжения, последствий отказов и повреждений оборудования. Решение указанных задач может быть осуществлено с помощью экспериментов на моделях, отражающих динамику состояния систем водоснабжения.

В известных работах в области идентификации технического состояния трубопроводов выделены типичные механизмы отказов, составлены физико-механические и математические модели процессов на основе локальных параметров. В то же время такие модели недостаточно полно отражают реальную величину и интенсивность изменения технического состояния на многокилометровых участках или всего трубопровода в целом.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методология моделирования трубопроводных систем водоснабжения, теплоснабжения и водоотведения предполагает разработку математических моделей сетей, отражающих их особенности и стоящие перед ними задачи [5, 7], к которым относятся следующие:

- построение модели технического состояния системы водоснабжения;
- оценка эффективности функционирования системы водоснабжения с проведением идентификации технического состояния.

Рассмотрим модель трубопроводной сети, отражающая размер утечки при повреждении трубопровода в результате длительной эксплуатации.

При построении модели состояния трубопроводной сети предполагается, что рассматриваемый объект эксплуатируется в течение срока, превышающего назначенный ресурс эксплуатации сети  $t_{\text{наз}}$ . Период эксплуатации трубопроводов рассматриваем как период, состоящий из двух этапов: первого этапа продолжительностью  $t \leq t_{\text{наз}}$ , он характеризуется стационарным потоком повреждений –  $\lambda_0$ ; второго этапа, продолжительность которого  $\Delta t = t_{\text{ф}} - t_{\text{наз}}$ , отличается от первого преобладанием процессов старения. Для второго этапа характерно, что интенсивность повреждений является неубывающей функцией, зависящей от множества факторов, в том числе и от времени. Следует иметь в виду, что рассматриваемые повреждения не приводят к отказу системы водоснабжения, лишь некоторая их последовательность завершается полным отказом.

Предполагается, что на  $i$ -м участке трубопровода имеет место простейший поток формирования  $k$ -х повреждений, что, как правило, согласуется с практикой. При достижении некоторого числа повреждений  $K$  элемент сети переходит в неработоспособное состояние (рис.1). Процесс накопления повреждений обусловлен деградацией (старением) трубопроводной сети.

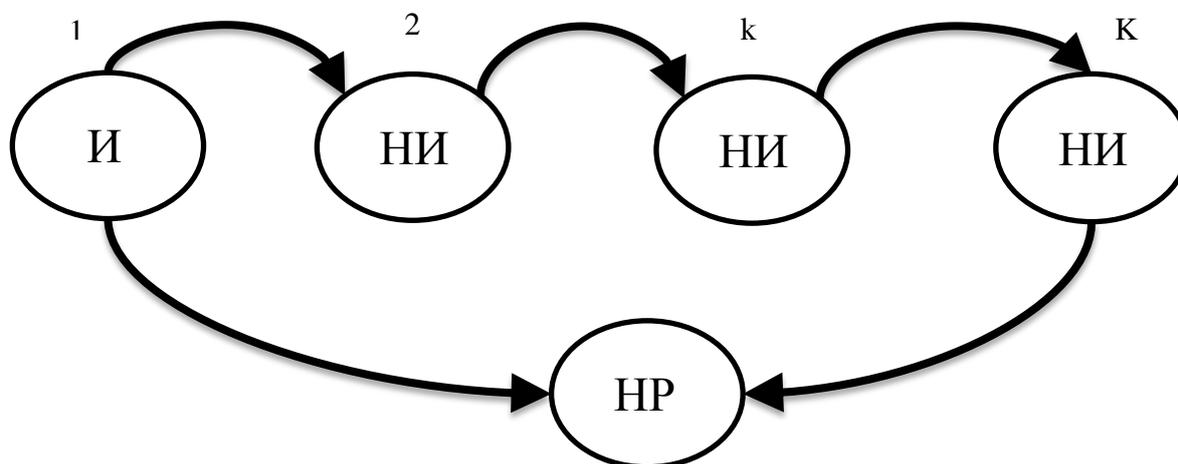


Рис.1. Модель технического состояния при накоплении повреждений:  
*И* – исправное состояние; *НИ* – неисправное состояние;  
*НР* – неработоспособное состояние

Непосредственный переход из исправного состояния в неработоспособное состояние (отказ, авария) – событие случайное и обусловленное воздействием множества случайных факторов. Кроме того, это событие достаточно редкое, предвидеть его невозможно, и, как правило, устранение аварий выполняется в ходе аварийно-восстановительных работ (АВР).

В соответствии со сформулированными задачами модель состояния трубопроводов должна отражать изменение технического состояния, характеризуемого некоторым показателем в зависимости от времени.

Полагаем, что параметром, который отражает состояние трубопровода, является фактическая толщина стенки трубы –  $h_{\text{ф}}$ . Тогда повреждением следует считать факт превышения  $h_{\text{ф}}$  некоторого критического значения толщины трубы  $h_{\text{крит}}$ . Это предположение в полной мере соответствует модели постепенных отказов, предложенной А.С. Прониковым [8] и подтвержденной многолетней практикой эксплуатации трубопроводов и экспериментальными исследованиями. Таким образом, условие повреждения может быть представлено в виде неравенства  $h_{\text{ф}} \leq h_{\text{крит}}$ .

Предложенные в работе [8] подходы, принимаемые в данной работе за основу, следует адаптировать для описания процессов старения трубопроводов систем водоснабжения. Известно, что для стальных труб основным процессом, определяющим старение, является электрохимическая коррозия [2, 3, 6], обусловленная действием как рабочей среды, подаваемой по трубам в сочетании с наличием кислорода, так и действием факторов окружающей среды, особенно в случае траншейной укладки. Именно интенсивность коррозии определяет в основном состояние трубопроводов.

Показателями, характеризующими интенсивность коррозионных процессов, являются: масса унесенного материала, глубина коррозии и скорость коррозии [7, 9]. В данном исследовании примем в качестве основных параметров коррозионных процессов изменение глубины коррозии в единицу времени ( $h_{\text{кор}}$ , мм/год) и скорость коррозии ( $V_{\text{кор}}$ ).

При построении модели изменения технического состояния следует учесть и такой фактор, как номинальная или начальная надежность труб. Под надежностью понимается интенсивность отказов  $\lambda_0$ , которая определяется материалом труб, технологией изготовления и которая задается как паспортная величина показателя надежности.

Тогда выражение для определения фактического показателя надежности стареющих трубопроводов можно представить в общем виде как

$$\lambda_{\phi}(t) = (\lambda_0, h_{\text{кор}}, V_{\text{кор}}, t). \quad (1)$$

Зависимость (1), как отмечается в источнике [8], будет иметь монотонно неубывающий характер. Анализ процессов старения, выполненный в работах [8], позволяет сделать вывод, что функция  $\lambda_{\phi}(t)$  может принимать либо линейную, либо экспоненциальную форму.

В работе [1] предложен вид  $\lambda_{\phi}$ -характеристики стареющего изделия (рис.1), который может быть описан выражением

$$\lambda_{\phi}(t) = \lambda_0 \cdot e^{\alpha t}, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  – начальная интенсивность стареющих элементов;

$\alpha$  – коэффициент, отражающий скорость старения элемента.

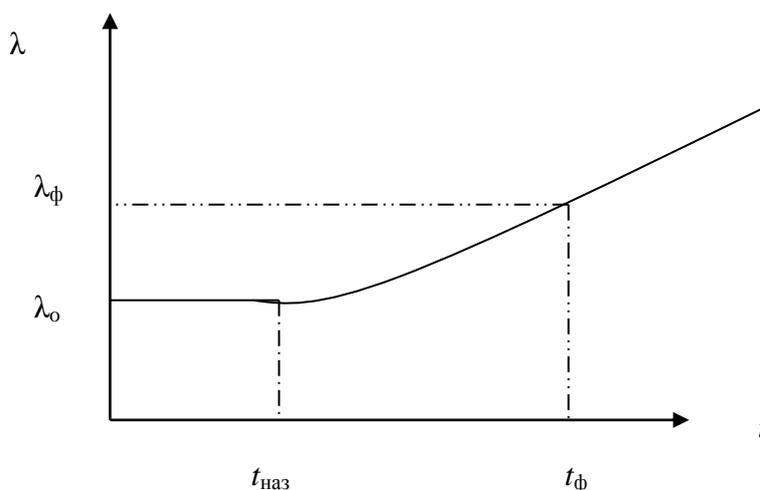


Рис.2. Возможный вид  $\lambda$ -характеристики стареющего элемента:

$t_{\phi}$  – фактический срок эксплуатации;  $t_{\text{наз}}$  – назначенный срок эксплуатации

Для применения выражения (2) необходимо принципиально определить порядок вычисления коэффициента  $\alpha$ . Имеется достаточно оснований полагать, что введенный коэффициент непосредственно зависит от рассмотренных параметров коррозионного процесса  $h_{\text{кор}}$  или  $V_{\text{кор}}$ .

Для получения зависимости  $\alpha(h_{\text{кор}})$  или  $\alpha(V_{\text{кор}})$  необходимо принять следующие предложения.

Из рассмотренных источников известно, что в условиях России, где фактические сроки эксплуатации превышают нормативные в 1,5–3,5 раза, интенсивность повреждений трубопроводов лежит в пределах от 0,47–0,41 1/км·год [7]. В странах, где эксплуатации систем водоснабжения уделяется должное внимание, этот показатель составляет 0,013 1/км·год [4]. Как правило, такое положение обеспечивается за счет своевременной замены трубопроводов (5% всего объема сети в год), т. е. обеспечивается эксплуатация труб до начала процесса интенсивного старения.

Принимая во внимание приведенные факты, можно выполнить ориентировочную оценку параметра  $\alpha$  на основе выражения (2).

Сроки эксплуатации трубопроводов характеризуются двумя параметрами:  $t_{\text{ф}}$  – фактическим сроком эксплуатации,  $t_{\text{наз}}$  – назначенным (расчетным) сроком эксплуатации. Полагаем, что до достижения назначенного срока  $t_{\text{наз}}$  процессы старения не оказывают существенного влияния на состояние трубопроводов. Интерес представляет период эксплуатации за пределами назначенного срока, определяемый выражением

$$t = t_{\text{ф}} - t_{\text{наз}}, \quad (3)$$

тогда формула (2) примет вид

$$\lambda\varphi(t) = \lambda_0 \cdot e^{\alpha(t_{\text{ф}} - t_{\text{наз}})}. \quad (4)$$

Значение  $\alpha$  можно определить, используя два подхода: статистический и физический.

Суть *статистического подхода* заключается в использовании выражения (4) и статистических данных, получаемых в результате эксплуатации. В качестве данных рассматриваются значения (реализации) переменных  $\lambda_{\text{ф}}$  и  $t_{\text{ф}}$  при известных параметрах  $\lambda_0$  и  $t_{\text{наз}}$ .

Для применения данного подхода выражение (4) преобразуется к виду

$$\alpha = \frac{\ln \frac{\lambda_{\text{ф}}}{\lambda_0}}{t_{\text{ф}} - t_{\text{наз}}}. \quad (5)$$

Например, используя данные, приведенные в работе [2], можно получить значение коэффициента  $\alpha$  для следующих исходных данных:

$$\lambda_{\text{ф}} = 0,47 \text{ 1/год} \cdot \text{км}; \lambda_0 = 0,113 \text{ 1/год} \cdot \text{км}; t_{\text{наз}} = 15 \text{ лет}; t_{\text{ф}} = 25 \text{ лет}.$$

В этом случае показатель экспоненты составит  $\alpha = 0,1425 \text{ 1/год}$ .

Указанный подход прост, удобен, но требует достаточно большого объема информации. Однако полученное значение  $\alpha$  можно принять за среднее и использовать для вычисления  $\lambda_{\text{ф}}$  в рамках данной модели.

Физический подход заключается в построении зависимости коэффициента  $\alpha$  от интенсивности коррозионных процессов, т. е.

$$\alpha = f(H, V_{\text{кор}}; \beta; t_{\text{ф}}), \quad (6)$$

где  $H$  – начальная толщина стенки трубы;

$V_{\text{кор}}$  – скорость коррозии;

$t_{\phi}$  – срок эксплуатации;

$\beta$  – некоторый коэффициент пропорциональности.

Данный подход отличается, безусловно, большей «физичностью», может быть применен для вновь строящихся сетей, однако его применение возможно лишь на основе большого объема экспериментов, получения значения коэффициента  $\beta$  и общего вида зависимости. Применение данного подхода можно рассматривать как направление дальнейших исследований.

Рассмотренный показатель состояния трубопроводов – интенсивность повреждений является, в некоторой степени, промежуточным показателем, характеризующим качество трубопроводной сети. Практический интерес вызывают последствия повреждений, а именно величина утечки воды и трудоемкость устранения повреждения.

Величина утечки через повреждение зависит, очевидно, от его размеров, напора воды, состояния окружающего грунта. Получение зависимости  $q_{yt}$  от перечисленных факторов требует большого объема экспериментов, эксплуатационных данных. В работе [6] предложено выражение, которое позволяет получить оценочное значение интенсивности утечки от интенсивности повреждений,

$$q_{yt} = 20,3(\lambda_{\phi})^{2,2}, \quad (7)$$

где  $q_{yt}$  – величина утечки, м<sup>3</sup>/час·км;

$\lambda_{\phi}$  – фактическая интенсивность повреждений, 1/км·год.

В данной работе в выражение (7) в качестве показателя  $\lambda$  принято вводить значения, соответствующие рассматриваемому моменту времени, т. е. полученные из предложенной формулы (4).

Интенсивность утечек на  $i$ -м участке сети в зависимости от его длины  $l_i$  определяется выражением

$$q_{yt.i} = 20,3(\lambda_{\phi i})^{2,2} \cdot l_i, \quad (8)$$

В формуле (8) также вместо стационарного показателя надежности  $\lambda$  введен нестационарный показатель  $\lambda_{\phi i}(t)$ , определяемый по формуле (4).

Суммарный объем утечек сети за год определяется выражением

$$q_{yt.гол} = 8600 \cdot \sum_{i=1}^N q_{yt i} = 8600 \cdot 20,3 \sum (\lambda_{\phi i})^{2,2} \cdot l_i, \quad (9)$$

Естественно, что объем утечек за  $t$  лет составит

$$q_{yt} = q_{yt.гол} \cdot t, \quad (10)$$

где  $t$  – срок эксплуатации в годах и долях лет в зависимости от фактического времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель состояния трубопроводов систем водоснабжения может быть использована при реализации риск-ориентированного подхода при планировании технического обслуживания и ремонта систем жизнеобеспечения [9].

Разработанная модель технического состояния системы водоснабжения позволяет определить степень изношенности и запланировать работы по диагностике, техобслуживанию и ремонту трубопровода.

В условиях кризисных явлений и реформирования Минобороны, отсутствия бюджетных субсидий, а также перехода на полную оплату стоимости услуг водоснабжения, продолжение

игнорирования вопросов эффективности работы систем инфраструктуры и борьбы с неучтенными расходами не может быть оправдано ни с экономической, ни с социальной точек зрения.

В связи с этим весьма актуальными для объектов космических войск являются разработка и дальнейшая практическая реализация стратегии по сокращению потерь и неучтенных расходов воды.

### Список используемых источников

1. *Алексеев И.И., Ермолин Ю.А.* Надежность систем водоотведения. – СПб.: СПбГАСУ, 2015. – 166 с.
2. Коррозионная стойкость и эксплуатационная надежность сварных трубопроводов из ВЧГШ. Экономическая целесообразность / А.А. Бабанов, В.В. Ветер, Я.И. Ковылянский и др. // Теплоэнергоэффективные технологии. – 2011. – № 3-4. – С. 60–67.
3. Защита подземных металлических сооружений от коррозии: справочник / А.Д. Белоголовский, В.И. Дмитриев, И.В. Стрижевский и др. – М.: Стройиздат, 2009. – 303 с.
4. *Гальперин Е.М., Полуян В.И., Чувилин В.Н.* Надежность систем водоснабжения водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 9, ч. 2. – С. 38–42.
5. *Кочетов О.А.* Построение гидравлической модели простого трубопровода при наличии утечек по его длине // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура (Самара). – 2013. – № 4 (13). – С.45–48.
6. *Маттссон Э.* Электрохимическая коррозия / пер. со швед. под. ред. Я.М. Колотыркина. – М.: Металлургия, 2007. – 158 с.
7. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефти- и газоснабжения / А.П. Меренков, Е.В. Сеннова, С.В. Сумароков и др. – Новосибирск: ВО «Наука» [Сибирская издательская фирма], 2002. – 407 с.
8. *Проников А.С.* Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 560 с.
9. Реконструкция систем водоотведения / В.П. Саломеев, Е.С. Гогина, В.А. Орлов, Н.А. Макиша. – М.: НИУ МГСУ, 2016. – 233 с.

А.С. Мокроусов,

кандидат технических наук, доцент

Вольский военный институт материального обеспечения, г. Вольск

## АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАКАЗА НА ЗАКУПКУ НЕФТЕПРОДУКТОВ ДЛЯ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РФ

В статье проведен анализ процесса формирования гособоронзаказа на закупку и поставки нефтепродуктов в ВС РФ на основе заключения государственных контрактов и определения основных направлений развития научно-методического аппарата оценки логистических параметров в этой области.

Ключевые слова: конкурсные торги, рынок госзакупок, логистические затраты, трансакционные издержки, балансовая прибыль, логистическая сеть.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ основных показателей государственного заказа показывает, что наиболее важными целями государства при проведении закупочной кампании являются:

- максимальная экономичность и эффективность государственных закупок;
- развитие конкуренции среди поставщиков при поставках продукции, обеспечение справедливого и равного отношения государственных заказчиков ко всем поставщикам;
- совершенствование организационных структур управления государственными закупками;
- достижение надежности в отношениях, возникающих в связи с закупкой и поставкой материальных ресурсов для государственного заказчика, которые позволяют заказчику реализовывать его логистическую стратегию;
- достижение открытости процесса, связанного с закупками, соблюдение законодательной и нормативно-правовой базы по вопросам размещения госзаказа.

Осуществить все вышеперечисленное возможно посредством организации открытых конкурсов (торгов, тендеров) на приобретение материальных средств для нужд Министерства обороны (МО) РФ. При этом необходимо выделить следующие ключевые моменты и понятия.

Во-первых, это *конкурсные торги* – как публичное открытое состязание претендентов за получение контракта на поставку товаров или выполнение работ. Главной задачей при закупках продукции для МО РФ является обеспечение максимальной эффективности расходования средств государственного бюджета.

Второе ключевое понятие – это *интересы госзаказчика*. Важно особо подчеркнуть, что речь идет не только о текущих интересах, а главным образом – о долгосрочных интересах госзаказчика в лице МО РФ.

И наконец, понятие *«совокупность практических методов и приемов»*, т. е. сам инструментарий, при помощи которого осуществляются процедуры конкурсных закупок продукции.

Рынок госзакупок представляет собой макроэкономическую систему, тесно взаимосвязанную с производственно-экономическим комплексом страны (рис. 1).

Система госзакупок динамична, чрезвычайно важна при проведении закупок реализация *принципа ответственности*, который означает, что уполномоченные лица госзаказчика отвечают за контракт, который они заключили.



Рис. 1. Система государственных закупок

На рис. 2 представлены способы проведения государственных закупок в Российской Федерации в сравнении с международной классификацией Всемирного банка.

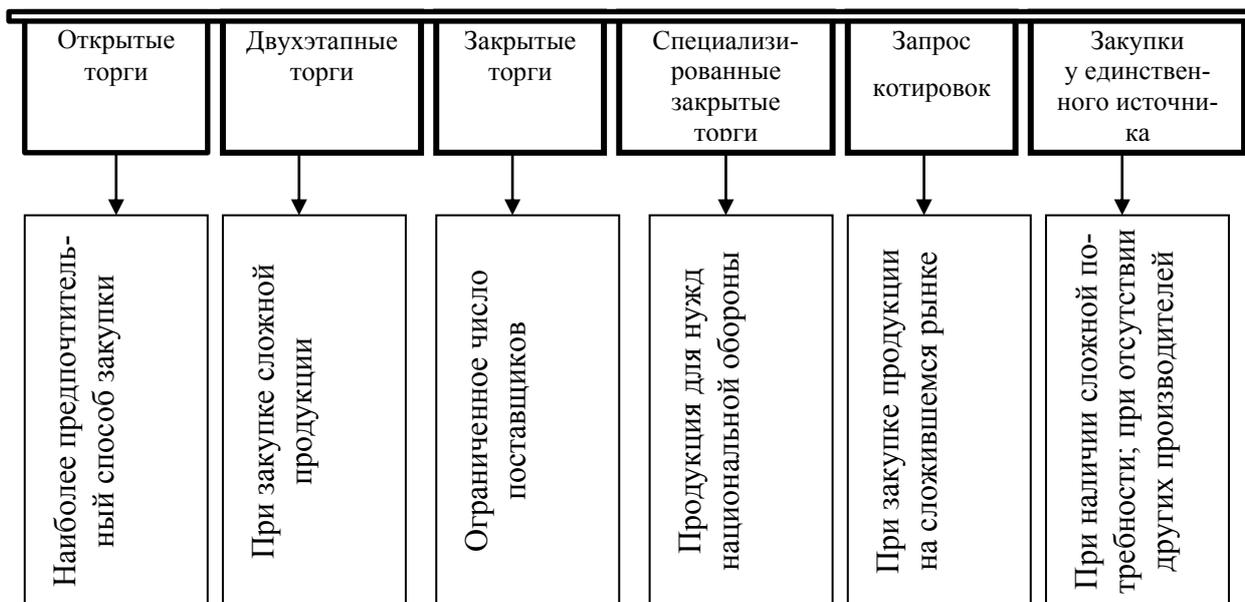


Рис. 2. Способы закупок продукции для государственных нужд

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью повышения военно-экономической эффективности системы материально-технического обеспечения при переходе Вооруженных сил на территориальное обеспечение, обеспечение горючим предлагается осуществлять через центры материально-технического обеспечения, которые в вопросах обеспечения округов и флотов повышают роль командующих округов и флотов, в том числе в формировании потребности войск и выполнении поставок нефтепродуктов непосредственно потребителю [1, 2].

Для сокращения промежуточных этапов перевалки и хранения ГСМ предусматривается: поставку горючего в районы Крайнего Севера осуществлять напрямую, силами и средствами нефтяных компаний, что позволит исключить его потери при промежуточном хранении, перевалке и транспортировке в пункты завоза (острова Новая Земля, Сахалин, полуострова Чукотка, Камчатка и др.); корабли ВМФ при выполнении задач в Мировом океане обеспечивать через российские нефтяные компании, способные организовать их бункеровку в иностранных портах; расширение практики заправки автомобильной техники Минобороны России горючим через сеть гражданских АЗС.

Цель снижения логистических затрат достигается формированием единовременных поставок, использованием общих складских и перевалочных помещений, сокращением складских перевалок нефтепродуктов и формированием новых хозяйственных связей.

Другим критерием является надежность поставщика, в качестве которого обычно принимается частота отгрузок продукции, а на оперативном уровне критерием при изменении объема партий груза может служить маршрут следования или наиболее подходящий вид транспорта для данной продукции [3, 4].

Рекомендуется при выборе поставщика ориентироваться не только на закупочную цену, качество продукции, гибкость и надежность поставок. Целесообразно учитывать такие аспекты, как продолжительность транспортировки, время нахождения на промежуточных и конечных складах, разницу в тарифах при использовании различных видов транспорта, так как все эти факторы влияют на общую, «скрытую» стоимость закупленной продукции в связи с необходимостью включения в нее страховых, рискованных и других платежей, а также на ритмичность поставки [5].

Материальные потоки нефтепродуктов сопровождаются значительным информационным потоком, который имеет многосторонний характер.

Информационные системы позволяют накапливать и анализировать большой объем информации, из которого нас интересует в первую очередь следующая информация:

- цены и ценообразование на рынке по интересующему нас виду продукции;
- обоснованность запросов на продукцию и на новые виды продукции;
- анализ ответов на запросы и анализ деятельности потенциального поставщика;
- обсчет закупочной деятельности;
- регистрация и анализ взаимоотношений с настоящими и потенциальными партнерами.

Особое место в нем занимает информация, необходимая для удостоверения параметров поставщика в соответствии с рядом критериев, к которым относятся:

- обладание необходимым уровнем технической оснащенности, необходимыми профессиональными и техническими квалификационными данными, управленческой компетентностью, опытом и репутацией, а также необходимыми трудовыми ресурсами для выполнения государственного контракта;
- правоспособность для заключения государственного контракта;
- не являться неплатежеспособным или банкротом, не находиться в процессе ликвидации, на имущество не должен быть наложен арест, а экономическая деятельность не должна быть приостановлена, а также он не должен являться объектом юридического производства в связи с упомянутым выше;
- выполнение своих обязательств по уплате налогов в бюджеты всех уровней и обязательных платежей в государственные внебюджетные фонды.

Экономическая информация крайне неоднородна; схема взаимосвязей отдельных ее видов отличается известной сложностью, к тому же отчетливо проявляется тенденция к их дальнейшему усложнению. Поэтому наряду с систематическим ростом объема информации ощущается нехватка ее для принятия управленческих решений при квалификационном отборе поставщиков.

Кроме того, для принятия объективного управленческого решения по выбору поставщика недостаточно только внутренней экономической информации, поэтому возникает дополни-

тельная потребность в получении внешней маркетинговой информации для сравнительной оценки поставщика внутри отрасли по следующим факторам:

- ценовым рискам;
- ограниченности природных ресурсов;
- государственному регулированию;
- диспропорции, обусловленной технологической структурой и географическим размещением предприятий отрасли;
- уровню износа основных фондов и удовлетворению потребности в капиталовложениях;
- экспортному потенциалу и внутреннему потреблению и т. д.

Прямой задачей закупочных подразделений органов управления является сбор информации о ценах, возможных сроках поставок, транспортных расходах и поиск их оптимального сочетания. Планируя закупку, государственный заказчик может и не рассчитывать составляющие цены поставщика, однако ориентироваться в вопросах ценообразования данного вида продукции необходимо. Владение методиками ценообразования проявится в работе конкурсной комиссии при оценке предложений поставщиков.

В настоящее время «существует несколько концепций логистики как науки, отличающихся как предметом изучения, так и узостью или, наоборот, универсальностью трактования и развития ее методологии, сфер, уровней приложения в экономике...» [1]. Среди них имеется пока еще не разработанная, а только намеченная концепция, согласно которой важное или даже центральное место в логистике должна занимать проблема согласования совместной деятельности различного рода и форм собственности предприятий.

*Система методов и моделей логистики* в области устойчивости и экономической безопасности нефтепродуктообеспечения в процессе военных поставок – это математическое описание процесса подготовки к выбору и выбор поставщиков нефтепродуктов с целью обеспечения устойчивости поставок и минимизации транзакционных издержек, а также затрат на транспортировку, хранение и перевалку нефтепродуктов в процессе доставки конечному потребителю [5].

К транзакционным относятся «издержки сбора и обработки информации, издержки проведения переговоров и принятия решений, издержки контроля и юридической защиты выполнения контракта» [6]. Поскольку предприятия принадлежат владельцам, то в условиях рынка их деятельность обусловлена экономической целесообразностью, а снижение неопределенности рыночной конъюнктуры уменьшает количество транзакций и, следовательно, минимизирует их транзакционные издержки.

Логистической сетью поставщиков будем называть группу действующих коммерческих предприятий, принадлежащих разным владельцам, каждое из которых стремится заключить договор на поставки нефтепродуктов МО РФ и в дальнейшем реализует свой этап процесса перемещения нефтепродуктов в конечный пункт назначения [5].

Специфика логистической сети как системы определяется добровольностью объединения в нее предприятий разных владельцев, взаимодействующих в условиях неограниченной рыночной конкуренции, и фирмой, возникающей, по словам Р. Коуза, «там и постольку, где и постольку нерыночный механизм эффективнее» [11]. Суммарные транзакционные издержки логистической сети меньше, чем в указанной группе, но больше, чем у фирмы. Поэтому при прочих равных условиях устойчивость логистических сетей обеспечивается минимизацией транзакционных издержек субъектов. Это утверждение согласуется со следующей точкой зрения Р. Коуза на роль транзакционных издержек в экономике: «Существование транзакционных издержек будет подталкивать желающих торговать к введению различных форм деловой практики, обеспечивающих сокращение транзакционных издержек в том случае, когда затраты по выработке таких форм оказываются меньше, чем экономия на транзакционных издержках» [8, 9].

В логистической сети действуют рыночные отношения. Однако они специфичны, так как обладают свойством самоорганизации, которая обеспечивает целостность логистической се-

ти как системы. Феноменологическое описание содержит информацию только о «входе» и «выходе» субъекта без указания «технологии» преобразования первого во второй, т. е. оно является производственной функцией, связывающей количество ресурсов и готовой продукции на «входе» и «выходе» субъекта [6].

Для логистических сетей характерны динамические вероятностные дискретные потоки. В зависимости от перемещаемой субстанции обычно рассматривают материальные (например, сырьевые), финансовые и информационные потоки. Естественно, что исходным пунктом материального потока является источник сырья, а завершающим – конечный потребитель, в нашем случае – МО РФ. Общим свойством конечного потребителя в лице МО РФ является то, что потребление им продукции (нефтепродуктов различного вида) направлено на обеспечение деятельности войск. При этом в логистической сети материальные, финансовые и информационные потоки взаимосвязаны.

*Логистические затраты* – это затраты на транспортировку, перевалку и стационарное хранение нефтепродуктов. В зависимости от конкретной ситуации значимость той или иной из перечисленных логистических операций различна, и, следовательно, затраты на нее сравнительно велики или малы.

*Балансовая прибыль логистической сети* – это разница между выручкой от реализации продукции конечным потребителем и суммой затрат всех ее субъектов.

Затраты, упомянутые в определении, подразделяются на производственные, логистические и транзакционные, а также издержки обращения, страховые выплаты (премии), проценты по кредитам и амортизационные отчисления, не включенные в производственные затраты, налоги и выплаты. Роль логистики в бизнесе имеет прежде всего «интегральный и оптимизационный характер» [6] и главной из ее научных проблем, рассматриваемой как «концептуальная», является «оптимизация потоковых процессов» [10]. Оптимизационный характер имеет отличия в том, что оптимизация функционирования логистической сети отличается от оптимизации собственно логистической сети. Первая относится только к функционированию, а вторая – еще и к инфраструктуре логистической сети, включающей в себя транспортные коммуникации, терминалы, склады и принятой неизменной.

Координация действий субъектов выражается в конечном счете в том, что они, заключая друг с другом договоры, по существу делят между собой балансовую прибыль. Очевидно, что каждый субъект стремится к максимизации своей прибыли, однако увеличить ее он может только за счет уменьшения прибыли других субъектов, так как сумма прибылей постоянна и равна балансовой прибыли логистической сети. Отсюда следует, что любое распределение балансовой прибыли логистической сети будет Парето-оптимальным [10], а Парето-оптимальность является ее свойством. Из него непосредственно следует первое условие оптимизации ее функционирования. Это условие заключается в максимизации балансовой прибыли логистической сети, так как чем она больше, тем при ее «дележе» выше возможность каждого субъекта увеличить свою прибыль.

Балансовую прибыль логистической сети можно максимизировать, оптимизируя объемы продаж, минимизируя сумму затрат, что достигается координацией субъектами своих действий путем их взаимных согласований, которые в основном касаются ценовых показателей, а также объемов и порядка продаж (поставок) нефтепродуктов.

Естественно, выполнение первого условия осуществимо только при устойчивом функционировании логистической сети, которое зависит от решений, принимаемых ее субъектами. Моделирование систем, взаимоотношения элементов которых представимы как конфликты, целесообразно выполнять, используя понятия теории игр. Согласно теории игр каждый набор решений всех субъектов логистической сети следует называть ситуацией, самих субъектов – игроками, а их решения – стратегиями. «Ситуация называется *равновесной*, если ни один из игроков не заинтересован в том, чтобы ее нарушить» [11–12]. «*Равновесные ситуации можно рассматривать как оптимальные совместные решения*, причем оптимальность равновесной ситуации проявляется в отношении ее устойчивости» [12]. Отсюда следует, что вторым усло-

вием оптимизации рассматриваемого функционирования является достижение равновесной ситуации, которая зависит от решений всех субъектов логистической сети.

Для конкретизации ответа вернемся к рассмотрению Парето-оптимальности логистических сетей. Очевидно, что все Парето-оптимальные наборы балансовых прибылей субъектов суть точки на поверхности Парето, которая (из-за линейности взаимозависимости этих прибылей) при числе субъектов, равном трем, – область на плоскости, а при большем трех – область на гиперплоскости. Координаты этих точек – балансовые прибыли субъектов. Среди них существует одна точка, координатами которой являются балансовые прибыли, соответствующие одинаковой доходности субъектов при производстве и реализации продукции. Под доходностью будем понимать отношение балансовой прибыли субъекта к сумме его логистических, транзакционных и производственных затрат (или издержек обращения). Эта точка соответствует «справедливой» прибыли: равные затраты капитала должны в рыночной экономике обеспечивать равные прибыли.

Оптимизация логистической сети включает в себя выполнение двух условий. Первое из них заключается в получении максимальной балансовой прибыли логистической сети, а второе – в реализации такого набора совместных решений всех ее субъектов, который обеспечит равновесную ситуацию. Первое условие базируется на Парето-оптимальности логистической сети, а второе условие связано с устойчивостью логистической сети, зависящей от равновесности ситуации в ней. Оба условия реализуются во взаимосвязи и взаимообусловленности: *лишь* достаточно высокая балансовая прибыль и *только* в устойчиво функционирующей логистической сети может обеспечить ее субъектам удовлетворительные прибыли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки устойчивости и экономической безопасности возникает необходимость разработки научно-методического аппарата для совершенствования экономических отношений в процессе материального обеспечения силовых структур в новых условиях функционирования [3].

В настоящее время продолжается процесс реформирования Вооруженных сил, в связи с этим растут предъявляемые к процессу закупок требования, возникают новые, более сложные задачи реформирования. Основу методологии исследования проблем строительства, подготовки и применения системы закупок составляет системный подход, который обеспечивает разработку практических вопросов строительства, подготовки и применения МТО ВС РФ и в первую очередь – основополагающих концептуальных документов научно обоснованного реформирования обеспечения войск горючим.

## Список используемых источников

1. *Топоров А.В., Коновалов В.Б., Бабенков А.В.* Обоснование военно-экономической эффективности процесса доставки материальных средств группировке войск (сил) // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2017. – № 2 (97). – С. 48–51.
2. *Козин М.Н., Ерин А.Е.* Оценки риска при реализации программ создания продукции военного назначения // Финансовая экономика. – 2018. – № 4. – С. 332–335.
3. *Бабенков В.И.* Концептуальные подходы к обоснованию военно-экономической безопасности системы материально-технического обеспечения // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-западного федерального округа России: сб. – СПб., 2017. – С. 26–30.
4. *Козин М.Н.* Методический подход к оценке экономической надежности предприятия исполнителя государственного контракта // Экономика и предпринимательство. – 2018. – № 7 – (96). – С. 1290–1294.

5. *Бабенков А.В.* Методологические подходы к военно-экономическому обоснованию и оценке параметров логистических процессов в системе материально-технического обеспечения войск // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук.* – 2016. – № 1 (91). – С. 2531.

6. *Сергеев В.И.* Предисловие научного редактора // *Бауэрсокс Д., Клосс Д.* Логистика: интегрированная цепь поставок. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2001 – С. 24.

7. *Коуз Р.* Фирма, рынок и право. – М.: Дело, 1993. – С.9, 35.

8. *Нуреев Р.М.* Курс микроэкономики: учебник для вузов. – М.: «Норма-Инфра-М», 2000. – С. 97, 128, 184, 195, 204, 536.

9. *Белоусов А.Г., Стаханов Д.В., Стаханов В.Н.* Коммерческая логистика. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. – С. 3, 71.

10. *Поудиновский В.В., Ногин В.Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – С. 5.

11. *Саймон Г.-А.* Науки об искусственном. – М.: Мир, 1972. – С. 80.

12. Современная логистика: пер. с англ. / Дж. Джонсон, Д. Вуд, Д. Вордлоу, П. Мерфи-мл. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – С. 22, 547.

А.И. Алтухов,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
В.Н. Калинин,  
*доктор техн. наук, профессор*

## **МУЛЬТИМЕДИЙНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ЛЕКЦИЙ КАК ВАЖНЕЙШАЯ ДИДАКТИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ФИЗИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ВОЕННОМ ВУЗЕ**

В статье рассмотрены основные формы мультимедийного сопровождения лекций на примере курса физики. Представлена краткая классификация этих форм, дана характеристика их содержания и принципов построения. Рассмотрены методические особенности практического применения основных форм мультимедийного сопровождения лекций, и приведены соответствующие примеры.

Ключевые слова: лекция, формы мультимедийной поддержки.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современный уровень и тенденции развития средств вооружения и военной техники, появление оружия на новых физических принципах выдвигают повышенные требования к квалификации военных инженеров. Это, в свою очередь, требует усиления фундаментальной подготовки в военных вузах, главным образом в области математики и физики [1]. Поэтому вопросы, связанные с разработкой теоретического обоснования и содержания новых методик, направленных на повышение качества преподавания, степени понимания и усвоения учебного материала обучающимися, понимания прикладного аспекта полученных знаний на основе внедрения элементов компьютерной дидактики [2–4] и в первую очередь мультимедийного сопровождения лекций, приобретают большое теоретическое и практическое значение [5, 6].

Вместе с тем разработке теоретических и прикладных аспектов компьютерной дидактики в настоящее время также уделяется особое внимание в контексте происходящих кардинальных изменений в высшей школе, направленных на переход к электронному образованию в рамках концепции «цифрового университета» [7].

В настоящей статье рассматриваются основные формы мультимедийного сопровождения лекций и некоторые методические особенности их реализации при визуальной поддержке лекций на примере курса физики.

### **ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЛЕКЦИЙ ПО ФИЗИКЕ**

Анализ многолетнего опыта чтения лекций по физике с использованием компонентов информационно-коммуникационных технологий позволил выделить шесть форм мультимедийного сопровождения лекции.

**1. Визуальное структурирование учебного материала.** В этом случае на экране отображается структура учебной дисциплины (или ее раздела, модуля) с указанием логических и временных связей между дидактическими единицами. Здесь же отображаются основные мероприятия текущего контроля и промежуточной аттестации. Это позволяет на начальном этапе изучения дисциплины (раздела или модуля) сформировать у обучающихся четкое представление о ее содержании, требованиях к результатам ее освоения, структуре и после-

довательности ее изучения, что является необходимым условием рационального планирования ими индивидуальной познавательной деятельности.

**2. Использование статических иллюстраций.** Это – аналог традиционного плакатного иллюстративного материала с широкими возможностями использования цветовой палитры, более качественного представления информации. Современные технические средства позволяют без существенных затрат труда педагога создавать и демонстрировать содержательные иллюстрации (схемы, графики, а также копии любых изображений, фотографии реальных устройств и систем и т. п.).

**3. Последовательное представление на экране текстового материала и статических иллюстраций.** В этом случае аудитории демонстрируется последовательно разворачиваемый необходимый текст (наиболее важные определения, формулы и т. п.) и соответствующий логически определенный ряд изображений (например, иллюстрации последовательных фаз рассматриваемого физического процесса) с необходимыми комментариями. Это позволяет сообщать обучающимся необходимую информацию дозированными порциями (квантами), что способствует более эффективному ее усвоению.

**4. Динамическая визуализация реальных физических процессов.** Изучение физики предполагает высокую степень наглядного восприятия учебного материала. Понимание физической сущности рассматриваемых явлений зачастую затруднительно на абстрактном уровне. В то же время это понимание может быть легко достигнуто при непосредственном визуальном восприятии соответствующих физических феноменов (например, броуновское движение, термодинамические процессы и т. п.), воспроизводимых на экране в виде специально подобранных фрагментов видеофильмов о физических процессах, протекающих в природе и технических системах.

**5. Анимация гипотетических физических моделей.** Некоторые разделы физики, такие как электродинамика, квантовая механика, физика твердого тела, атомная и ядерная физика, оперируют гипотетическими физическими моделями, понимание и запоминание которых при традиционном изложении лекции с использованием плакатов и демонстраций связаны с существенными трудностями у обучающихся. Так, например, при демонстрации на лекции физического процесса из электродинамики обучающиеся видят, как правило, результат его проявления (отклонение стрелки регистрирующего устройства, проскакивание электрического заряда между проводниками и т. п.). Однако процессы, происходящие в веществе, в поле и являющиеся причиной проявления этого физического явления, до недавнего времени продемонстрировать было сложно или невозможно. Эти дидактические трудности в значительной степени удается преодолеть путем построения анимационных моделей физических процессов, происходящих на атомарном и молекулярном уровнях в веществе (например, модель Бора, модели зонной теории твердого тела, модели контактных явлений и др.) и приводящих к тем проявлениям физическим процессов, которые мы наблюдаем. Современное программное обеспечение служит хорошим средством такой визуализации, средством создания наглядных физических полей и элементов микромира.

**6. Имитация физических экспериментов.** С использованием компьютерной дидактики на лекциях можно продемонстрировать имитацию наиболее существенных физических экспериментов (например, опыты Резерфорда, Холла, Комптона и др.), что, безусловно, способствует лучшему пониманию обучающимися соответствующих фундаментальных физических концепций и теорий.

Теперь рассмотрим более подробно некоторые методические особенности указанных выше общих форм мультимедийного сопровождения лекционного материала с примерами отображения информации и рекомендации по их реализации в образовательной деятельности.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВИЗУАЛЬНЫХ ФРАГМЕНТОВ ЛЕКЦИИ

Эта форма мультимедийного сопровождения лекции является наиболее часто применяемой в современной педагогической практике. Успех ее применения в значительной степени определяется тщательным отбором мультимедийного материала и алгоритмом его последовательного представления. Необходимый уровень понимания при этом достигается в результате последовательного рассмотрения относительно простых фрагментов изучаемого сложного физического явления. В таком случае необходимая информация доводится до обучающихся последовательными порциями (квантами), легко доступными пониманию. Кроме того, в сознании обучающегося складывается общая картина физического явления.

Так, например, при рассмотрении законов Максвелла, характеризующих электромагнитное поле, можно ограничиться одной довольно сложной иллюстрацией, показанной на рис. 1, отражающей фундаментальный закон природы: меняющееся во времени магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.



Рис. 1. Фундаментальный закон природы

Для лучшего понимания сути этого сложного закона природы целесообразно представить соответствующий физический процесс в виде последовательности более простых составляющих. На рис. 2 приведен пример графического квантованного отображения этого закона (поэтапное рисование, сопровождающееся необходимыми комментариями).

При этом слайд наполняется информацией по мере изложения рассматриваемого фундаментального свойства природы. Очевидно, что в этом случае степень восприятия графической информации и уровень понимания рассматриваемого физического явления будут повышаться. Возможен и такой вариант представления информации: вначале показать итоговый рисунок с комментарием, а затем перейти к поэтапному (квантованному) его рисованию с соответствующими пояснениями.

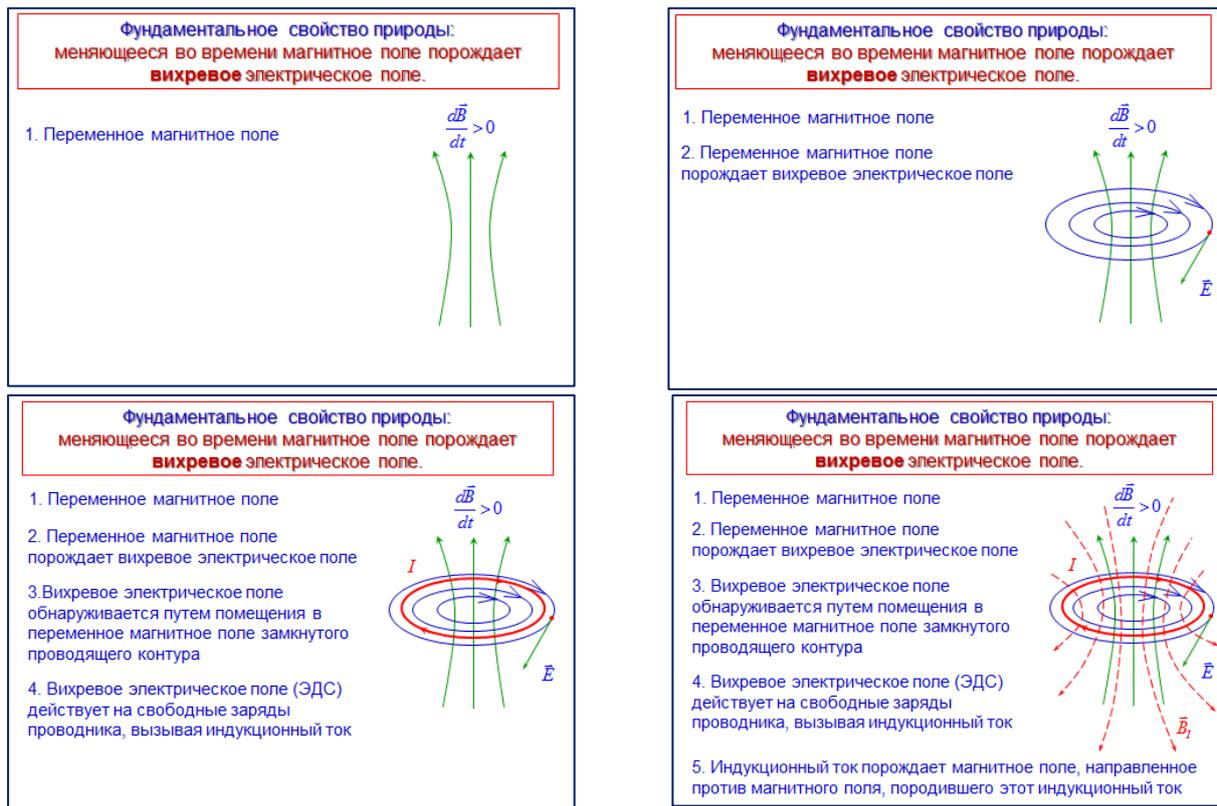


Рис. 2. Поэтапное отображение фундаментального свойства природы

Описанные логически взаимосвязанные последовательные статические изображения и необходимый текст (рубрики, определения, формулы) составляют основное содержание лекционного видеоряда. При этом должны соблюдаться эргономические нормы: оптимальный контраст между рисунками, текстом и фоном, оптимальный тип и размер шрифта, исключение перенасыщения видеоряда текстом и другой информацией и т. д. [8]. Вместе с тем видеоряд может быть дополнен динамическими компонентами: фрагментами видеофильмов, анимациями гипотетических моделей сложных физических процессов. Остановимся на последнем более подробно.

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

В современной физике многие реальные физические процессы и явления получили свое объяснение и математическое описание на основе гипотетических представлений и микромоделей молекулы, атома и т. п., недоступных непосредственному наблюдению.

Вместе с тем понимание соответствующих физических законов (например, законов электродинамики; молекулярной, квантовой, статистической, атомной физики и т. п.) требует высокого уровня абстрактных представлений и соответствующих виртуальных образов. Это обстоятельство всегда создавало определенные дидактические трудности в физическом образовании.

С появлением современных мультимедийных средств и соответствующего программного обеспечения положение дел в этой области кардинальным образом изменилось. Появились практически неограниченные дидактические возможности информационно-коммуникационных технологий, позволяющие создавать наглядные гипотетические физические микромиры, отражающие соответствующие представления о строении вещества и поля, а

также о механизмах их взаимодействия. Это обстоятельство позволяет существенно повысить эффективность образовательного процесса, обеспечить глубокое понимание всеми обучающимися законов современной физики на основе включения в лекционный видеоряд соответствующих виртуальных моделей.

Для примера рассмотрим такое физическое явление, как контакт двух полупроводников и возникновение между ними контактной разности потенциалов. В основе объяснения этого явления лежит гипотеза зонной теории вещества о распределении электронов по энергетическим уровням, переходе их из одного полупроводника в другой при контакте друг с другом. Это довольно сложное для понимания явление легче усваивается с использованием анимационной модели процессов, происходящих на уровне микромира и не видимых человеческим глазом, которые и приводят к возникновению контактной разности потенциалов. На рис. 3 показаны начальный и конечный кадры анимационной модели указанного процесса.

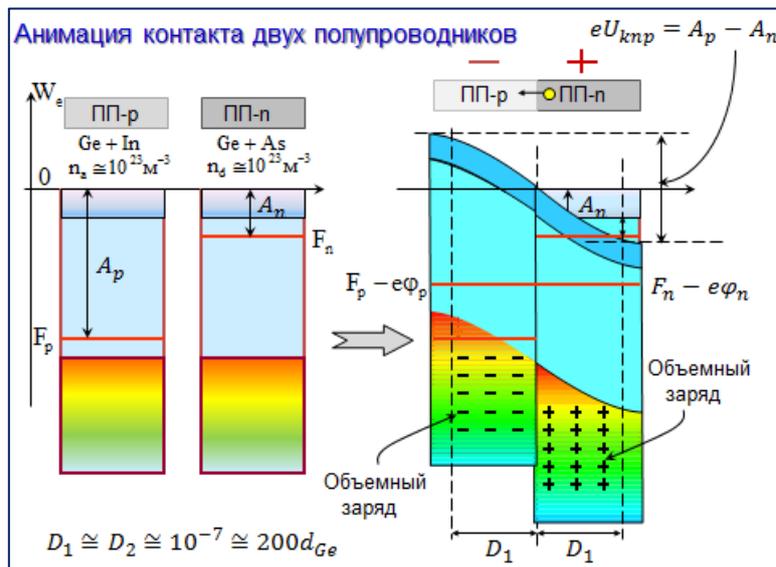


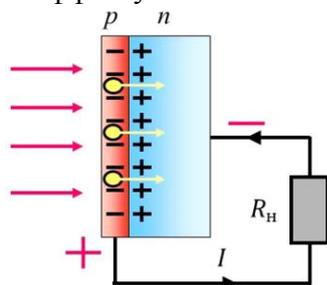
Рис. 3. Фрагмент анимации контакта двух полупроводников

Только после демонстрации и пояснения анимационной модели можно перейти к деталям описания рассматриваемого явления с выводом математических соотношений, позволяющих вычислить величину контактной разности потенциалов, толщину объемных зарядов по обе стороны контакта и т. п. Педагогический опыт показывает, что при этом наряду с глубоким пониманием физической природы наблюдаемого явления достигается и более уверенное владение обучающимися соответствующим аналитическим аппаратом, необходимым для решения конкретных физических задач.

Дидактические возможности мультимедийного сопровождения лекции этим не ограничиваются. Несомненное достоинство дидактического мультимедийного арсенала заключается в том, что средства визуальной поддержки лекции после рассмотрения того или иного физического процесса или явления позволяют продолжить соответствующий видеоряд, переходя от визуализации виртуальных моделей таких процессов и явлений к демонстрации их прикладного значения. Так, например, целесообразно завершить видеоряд, раскрывающий суть некоторого физического явления, демонстрацией конкретных примеров систем вооружения и военной техники, их компонентов, функционирование которых основано на этом физическом явлении.

Схематично структура и отдельные компоненты соответствующего видеоряда показаны на рис. 4.

Фрагмент анимации процессов микромира, приводящих к вентильному фотоэффекту



...

Набор слайдов с математическим описанием физического механизма вентильного фотоэффекта

...

Практическое применение вентильного фотоэффекта



Рис. 4. Компоненты видеоряда

В результате рассмотрения приведенного примера становится очевидным, что современные мультимедийные средства позволяют обеспечить глубокое понимание обучающимися сложного физического содержания учебного материала и наглядно показать его военно-прикладное значение. Такое представление информации способствует не только лучшему пониманию сути физического явления, но и пробуждает интерес к изучаемой дисциплине и образованию в целом.

Выше приведены лишь некоторые методические рекомендации и приемы визуального сопровождения лекционного материала. Данные приемы могут использоваться как по отдельности, так и в различных комбинациях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные мультимедийные средства предоставляют мощный дидактический инструментарий для организации и проведения образовательного процесса. В данной статье кратко рассмотрены некоторые направления применения мультимедийного сопровождения лекций по физике, приведена классификация основных форм такого сопровождения, и изложены методические особенности их практического применения. Опыт визуальной поддержки лекций по физике показал, что это способствует лучшему пониманию сути изучаемых физических явлений и процессов и более глубокому усвоению учебного материала.

Следует отметить, что подготовка лекции с мультимедийным сопровождением представляет собой трудоемкий, но вместе с тем увлекательный творческий процесс. Однако для его реализации от преподавателя требуется не только свободное владение учебным материалом, но и необходимый уровень подготовки в области современных информационно-коммуникационных технологий [9]. Современный преподаватель должен владеть навыками работы со специальными программными продуктами (*Easy GIF Animator, Creatoon, Aurora 3D Animation Maker, Blender* и др.) и мультимедийными средствами.

Материалы статьи могут быть полезны при подготовке и организации образовательной деятельности по другим дисциплинам естественнонаучного цикла.

## Список используемых источников

1. Алтухов А.И., Головина В.В., Калинин В.Н. Формирование и критерии оценивания общекультурных и профессиональных компетенций в цикле математических и естественнонаучных дисциплин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып.642. – С. 210–215.
2. Булекбаев Д.А., Морозов А.В. Формирование и развитие навыков вычислительного эксперимента у обучающихся на примере исследования динамической системы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып.659. – С. 202–209.
3. Захарова И.Г. Информационные технологии в образовании: учебник. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Академия», 2011. – 192 с.
4. Калинин В.Н., Коцкович А.В., Хохлова М.В. Методика промежуточного контроля уровня сформированности компетенций курсанта с использованием компьютерного тестирования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 647. – С. 198–204.
5. Васильева Н.В., Кунтурова Н.Б., Прокофьева А.Л. Образовательные средства информационно-коммуникационных технологий в учебном процессе военного вуза // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 661. – С. 207–214.
6. Пат. на изобретение. RUS 2664946 05.10.2015. Способ интерактивного обучения / Кулешов Ю.В., Алтухов А.И., Сквасников М.А. и др.
7. Национальные проекты РФ: целевые показатели и результаты до 2024 года. – URL: <http://static.government.ru> (дата обращения: 20.03.2019).
8. Иноземцева Л.А., Кужекин Н.С. Психолого-педагогические основания визуализации учебного контента при разработке электронных дидактических материалов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 657. – С. 173–177.
9. Меняйся или уходи. Цифровое образование бросает вызов преподавателям // Поиск: газ. – 2018. – № 1-2.

А.М. Андросов,

*кандидат педагогических наук*

Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург;

В.П. Сорокин,

*доктор педагогических наук, профессор*

Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ КУРСАНТОВ ВОЕННОЙ АКАДЕМИИ СВЯЗИ**

В статье рассматривается экспериментальная проверка модели физической подготовки курсантов Военной академии связи. Раскрываются основные теоретико-методологические подходы, используемые при проектировании педагогических и образовательных технологий в подготовке военных связистов по учебной дисциплине «Физическая подготовка». К ним относятся: трансдисциплинарность физической подготовки, преемственность образовательных программ; преемственность и доступность образовательных программ, их непрерывность на всем протяжении исполнения обязанностей военной службы; требования к профессиональной деятельности выпускников всех уровней образования с учетом карьерного роста, предусмотренного квалификационными требованиями программы обучения; дидактическо-информационная (электронная информационно-образовательная) среда.

Ключевые слова: физическая подготовка, военные связисты, теоретико-методологические основы проектирования образовательных технологий, педагогический эксперимент.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В рамках выполненной на кафедре физической подготовки Военной академии связи научно-исследовательской работы (шифр «Локатор») были определены главные теоретико-методологические основы (подходы) проектирования образовательных и педагогических технологий по физической подготовке, обеспечивающие сквозную подготовку специалистов на всех уровнях образования: трансдисциплинарность физической подготовки, преемственность образовательных программ; преемственность и доступность образовательных программ, их непрерывность на всем протяжении исполнения обязанностей военной службы; требования к профессиональной деятельности выпускников всех уровней образования с учетом карьерного роста, предусмотренного квалификационными требованиями программы обучения; дидактическо-информационная (электронная информационно-образовательная) среда. Многие из них не всегда и не в полном объеме применялись при определении и подборе содержания рабочих программ учебной дисциплины «Физическая подготовка» в высших военных учебных заведениях [1].

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Для проверки эффективности предложенной нами экспериментальной программы по учебной дисциплине «Физическая подготовка» по программам подготовки высшего профессионального образования уровень «специалитет» был проведен педагогический эксперимент с 1 сентября 2017 года по 30 июля 2018 года. К эксперименту привлекались курсанты 1-го и 3-го курса. По нашему мнению, привлечение именно курсантов учебных групп 1-го и 3-го курса с наибольшей степенью достоверности позволит проверить эффективность предложенной нами экспериментальной программы, построенной на выдвинутых нами теоретико-методологических основах построения физической подготовки в высшем военном учебном

заведении. На указанных курсах были сформированы две контрольных (КГ) и две экспериментальных группы (ЭГ). На 1-м курсе численность групп составила 25 человек каждая. На 3-м – по 30 человек каждая.

Морфофункциональные показатели, показатели физической подготовленности, внешнего дыхания, сердечно-сосудистой системы, функционального состояния центральной нервной системы, уровень теоретической и организаторско-методической подготовленности военнослужащих контрольных и экспериментальных групп по курсам не имели достоверных отличий.

В целом данные исследования характеризовались нами как естественный педагогический эксперимент, в ходе которого экспериментатор не вмешивается в ход действий испытуемых, а ведет наблюдение с ожиданием проявления изучаемого признака, факта или явления, играющего роль независимых переменных.

Морфофункциональные показатели и показатели внешнего дыхания военнослужащих контрольных и экспериментальных групп до педагогического эксперимента и по его итогам приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Морфофункциональные показатели и показатели внешнего дыхания  
военнослужащих экспериментальных и контрольных групп ( $\bar{X} \pm m$ )**

Показатель	1-й курс ВО		3-й курс ВО	
	ЭГ <sub>1</sub>	КГ <sub>1</sub>	ЭГ <sub>2</sub>	КГ <sub>2</sub>
Возраст (л)	<u>18,36±0,23</u>	<u>18,36±0,26</u>	<u>20,13±0,28</u>	<u>20,4±0,24</u>
	19,36±0,23	19,36±0,26	21,13±0,28	21,4±0,24
Рост (см)	<u>179,56±0,92</u>	<u>178,4±1,14</u>	<u>177,63±1,2</u>	<u>178,7±0,73</u>
	181,08±1,01	179,36±1,06	178,4±1,15	179,4±0,74
Масса тела (кг)	<u>72,20±1,49</u>	<u>71,9±1,81</u>	<u>68,86±1,24</u>	<u>72,1±1,05</u>
	73,24±1,6	73,68±1,68	70,9±1,2	73,7±1
ИМТ (усл. ед)	<u>22,45±0,54</u>	<u>22,52±0,46</u>	<u>21,84±0,38</u>	<u>22,55±0,27</u>
	22,97±0,61	22,6±0,48	22,3±0,37	23±0,28
Динамометрия (правая рука, daN)	<u>45,0±1,43</u>	<u>44,9±1</u>	<u>46,96±1,09</u>	<u>47,86±1,08</u>
	51,96±1,09* <sup>▲</sup>	47,8±0,9*	53,7±0,92* <sup>▲</sup>	50,9±0,71*
Динамометрия (левая рука, daN)	<u>43,28±1,32</u>	<u>43,8±1,42</u>	<u>41,03±1,14</u>	<u>41,26±1,14</u>
	50,08±1,17* <sup>▲</sup>	46,12±1,22	48,7±1,2* <sup>▲</sup>	45,1±1,1*
ЖЕЛ (мл.)	<u>3648±156</u>	<u>3744±134</u>	<u>3824,66±95</u>	<u>3886±95</u>
	4304±101* <sup>▲</sup>	3968±91,23	4390±72* <sup>▲</sup>	4170±78*
ЖИ (усл. ед.)	<u>50,73±2,06</u>	<u>52,95±2,31</u>	<u>56,42±1,83</u>	<u>54,33±1,68</u>
	59,35±1,7* <sup>▲</sup>	54,5±1,68	62,4±1,6* <sup>▲</sup>	56,9±1,41
Проба Штанге (с)	<u>46,92±1,42</u>	<u>46,16±1,5</u>	<u>51,66±1,34</u>	<u>52,06±1,24</u>
	54,08±1,15* <sup>▲</sup>	49,56±1,57	57,8±0,96* <sup>▲</sup>	55,2±0,8*
Проба Генче (с)	<u>28,56±0,96</u>	<u>28,52±0,83</u>	<u>34,13±0,78</u>	<u>35,8±0,76</u>
	38,76±1,01* <sup>▲</sup>	31,04±0,8*	42,1±0,53* <sup>▲</sup>	39,4±0,8*

**Примечания.** 1. В числителе – результаты исследований до начала педагогического эксперимента, в знаменателе – после окончания педагогического эксперимента.

2. \* – достоверные различия (при  $p \leq 0,05$ ) между результатами группы до и после окончания педагогического эксперимента; <sup>▲</sup> – достоверные различия (при  $p \leq 0,05$ ) между результатами контрольной и экспериментальной группой по окончании педагогического эксперимента – жизненный индекс (усл. ед.); ИМТ – индекс массы тела (усл. ед.).

Возраст педагогического эксперимента составлял в среднем 18 лет для 1-го курса и 20 лет для 3-го курса. Общее увеличение его показателя равнялось срокам проведения эксперимента – 1 год.

Показатели роста военнослужащих также не имели достоверных отличий как до эксперимента, так и по его итогам. Важно отметить, что по итогам года обучения во всех группах

наблюдался незначительный прирост данного показателя – от 0,7 до 1,4 см. Это обусловлено длительностью эксперимента и возрастом военнослужащих.

Не выявлены достоверные изменения до и после окончания педагогического эксперимента в показателях индекса массы тела. Это объясняется отсутствием достоверных различий в росте и массе тела военнослужащих контрольных и экспериментальных групп. В соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) показатели индекса массы тела для всех групп находятся в пределах значения «норма». В остальных показателях экспериментальные группы имеют лучшие результаты, достоверно отличающиеся не только от исходных, но и от итоговых результатов контрольных групп ( $p \leq 0,05$ )

Высокий прирост морфофункциональных показателей и показателей функции внешнего дыхания объясняется повышением в рамках трансдисциплинарности физической подготовки теоретических знаний в области физиологии организма и влияния физических упражнений на основные системы организма [2]. Это позволяет повысить не только сознательность военнослужащих при выполнении физических упражнений и качество их выполнения, но и улучшить обратную связь педагог – ученик – педагог [3]. В свою очередь, улучшение такой связи в сочетании со значительным качеством выполнения упражнений позволяет повысить плотность учебных занятий, задействовать и другие формы физической подготовки, в том числе и самостоятельную физическую тренировку, для активного развития функций внешнего дыхания. О правильности подобранных физических упражнений и эффективности использования предложенных методов при проведении занятий свидетельствуют и результаты исследования сердечно-сосудистой системы (табл. 2).

Таблица 2

**Показатели состояния сердечно-сосудистой системы военнослужащих экспериментальных и контрольных групп ( $\bar{X} \pm m$ )**

Показатель	1-й курс ВО		3-й курс ВО	
	ЭГ <sub>1</sub>	КГ <sub>1</sub>	ЭГ <sub>2</sub>	ЭГ <sub>1</sub>
Частота пульса до нагрузки (уд./мин)	$\frac{72,4 \pm 1,7}{65,56 \pm 1,03}^{\blacktriangle}$	$\frac{74,6 \pm 0,82}{71 \pm 0,5}^*$	$\frac{75,46 \pm 0,73}{68,3 \pm 0,81}^{\blacktriangle}$	$\frac{73,33 \pm 1,02}{71,5 \pm 0,8}$
Частота пульса после нагрузки (уд./мин)	$\frac{183 \pm 1,43}{165,9 \pm 1,68}^{\blacktriangle}$	$\frac{181,7 \pm 1,73}{172,3 \pm 1,5}^*$	$\frac{178,1 \pm 0,90}{166,3 \pm 0,5}^{\blacktriangle}$	$\frac{178,6 \pm 0,77}{171,1 \pm 0,86}^*$
Систолическое давление (мм рт.ст.)	$\frac{117,2 \pm 1,6}{117,2 \pm 1,1}$	$\frac{119,3 \pm 1,63}{119,72 \pm 1,4}$	$\frac{122,4 \pm 1,14}{122,06 \pm 0,8}$	$\frac{122,2 \pm 1,1}{122,5 \pm 0,98}$
Диастолическое давление (мм рт.ст.)	$\frac{66,08 \pm 1,59}{68,76 \pm 0,86}$	$\frac{67,8 \pm 1,4}{69,72 \pm 1,12}$	$\frac{72,44 \pm 0,84}{72,1 \pm 0,7}$	$\frac{71,4 \pm 0,84}{72,7 \pm 0,6}$
Пульсовое давление (мм рт.ст.)	$\frac{51,12 \pm 1,35}{48,5 \pm 0,5}$	$\frac{51,52 \pm 1,1}{50 \pm 1,08}$	$\frac{50,03 \pm 0,74}{49,9 \pm 0,48}$	$\frac{50,9 \pm 0,91}{49,76 \pm 1,03}$
Показатель двойного произведения (усл.ед)	$\frac{84,74 \pm 2,2}{76,79 \pm 1,2}^{\blacktriangle}$	$\frac{89 \pm 1,6}{85,01 \pm 1,2}$	$\frac{92,2 \pm 1,47}{83,5 \pm 1,32}^{\blacktriangle}$	$\frac{89,64 \pm 1,5}{87,7 \pm 1,34}$
Коэффициент выносливости Квааса (усл. ед)	$\frac{14,37 \pm 0,46}{13,54 \pm 0,22}^{\blacktriangle}$	$\frac{14,6 \pm 0,31}{14,35 \pm 0,31}$	$\frac{14 \pm 0,2}{13,67 \pm 0,17}^{\blacktriangle}$	$\frac{14,5 \pm 0,40}{14,6 \pm 0,42}$
Индекс Р.М. Баевского (усл. ед.)	$\frac{1,98 \pm 0,03}{1,94 \pm 0,02}^{\blacktriangle}$	$\frac{2,06 \pm 0,03}{2,06 \pm 0,03}$	$\frac{2,17 \pm 0,03}{2,09 \pm 0,02}^{\blacktriangle}$	$\frac{2,14 \pm 0,02}{2,16 \pm 0,02}$
Ударный объем сердца (мл)	$\frac{69,7 \pm 1,41}{66,1 \pm 0,5}^*$	$\frac{68,9 \pm 1,04}{66,42 \pm 0,99}$	$\frac{67,82 \pm 0,66}{63,96 \pm 0,51}^*$	$\frac{65,27 \pm 0,82}{63,27 \pm 0,74}$
Минутный объем крови (мл/мин)	$\frac{5058 \pm 171}{4342 \pm 90}^{\blacktriangle}$	$\frac{5150 \pm 109}{4717 \pm 81}^*$	$\frac{5123 \pm 81}{4371 \pm 65}^*$	$\frac{4779 \pm 76}{4521 \pm 69}^*$
Индекс степ-теста (усл.ед)	$\frac{52,9 \pm 1,24}{58,55 \pm 1}^{\blacktriangle}$	$\frac{52,3 \pm 1,1}{55,2 \pm 0,96}$	$\frac{53,3 \pm 0,51}{59,69 \pm 0,31}^{\blacktriangle}$	$\frac{52,3 \pm 0,43}{57,54 \pm 0,39}^*$

**Примечания.** 1. В числителе – результаты исследований до начала педагогического эксперимента, в знаменателе – после окончания педагогического эксперимента.

2. \* – достоверные различия (при  $p \leq 0,05$ ) между результатами группы до и после окончания педагогического эксперимента; ▲ – достоверные различия (при  $p \leq 0,05$ ) между результатами контрольной и экспериментальной группой по окончании педагогического эксперимента.

3.  $p > 0,05$

В экспериментальных группах результаты таких показателей, как частота пульса до нагрузки, частота пульса после нагрузки, показатель двойного произведения, коэффициент выносливости Квааса, индекс Д.Р. Баевского, минутный объем крови, индекс степ-теста значительно улучшились и имели достоверные различия с исходными данными и с итоговыми результатами контрольных групп ( $p \leq 0,05$ ). Улучшение результатов в частоте пульса до нагрузки составили: ЭГ<sub>1</sub> – 6,84 уд./мин, ЭГ<sub>2</sub> – 7,16 уд./мин. В среднем – 7 уд./мин. В контрольных группах улучшения составили: КГ<sub>1</sub> – 3,6 уд./мин, КГ<sub>2</sub> – 1,83 уд./мин.

Важным для педагогического эксперимента является улучшение показателей частоты пульса после нагрузки. В экспериментальных группах этот показатель улучшился, имел достоверные различия с исходными данными и с итоговыми результатами контрольных групп ( $p \leq 0,05$ ).

Одним из основных показателей эффективности предложенной нами экспериментальной программы по физической подготовке является индекс степ-теста. По итогам прохождения обучения в контрольных группах были следующие улучшения: в КГ<sub>1</sub> – 2,9 усл. ед., в КГ<sub>2</sub> – 5,2 усл. ед. Показатели индекса степ-теста по итогам эксперимента составили: в КГ<sub>1</sub> – 55,2±0,96 усл. ед., в КГ<sub>2</sub> – 557,54±0,39 усл. ед. В экспериментальных группах показатель индекса степ-теста улучшился: в ЭГ<sub>1</sub> – на 5,65 усл. ед., в ЭГ<sub>2</sub> – на 6,39 усл. ед. При этом во всех экспериментальных группах показатель индекса степ-теста имеет достоверные различия не только с исходными данными ( $p \leq 0,05$ ), но и с результатами контрольных групп. В контрольной группе 3-го курса также имеются достоверные различия с исходными показателями. Но в соответствующей ей экспериментальной группе полученные результаты достоверно лучше.

Закономерно на фоне улучшения основных физиологических показателей появляется улучшение результатов в выполнении физических упражнений, характеризующих развитие основных физических качеств (табл. 3). В сочетании с результатами морфофункциональных показателей, показателей внешнего дыхания и состояния сердечно-сосудистой системы результаты уровня физической подготовленности свидетельствуют об успешности проведенного нами педагогического эксперимента.

Таблица 3

**Показатели уровня физической подготовленности военнослужащих контрольных и экспериментальных групп ( $\bar{X} \pm m$ )**

Упражнение	1-й курс ВО		3-й курс ВО	
	ЭГ <sub>1</sub>	КГ <sub>1</sub>	ЭГ <sub>2</sub>	КГ <sub>2</sub>
Подтягивание на перекладине (кол-во раз)	$\frac{12,48 \pm 0,64}{19,56 \pm 0,84} \text{ * } \blacktriangle$	$\frac{12,36 \pm 0,68}{14,2 \pm 0,68}$	$\frac{14,7 \pm 0,5}{23,3 \pm 0,7} \text{ * } \blacktriangle$	$\frac{14,4 \pm 0,57}{19,7 \pm 0,61} \text{ *}$
Бег на 100 м (с)	$\frac{14,3 \pm 0,15}{13,4 \pm 0,08} \text{ * } \blacktriangle$	$\frac{14,4 \pm 0,1}{13,72 \pm 0,1} \text{ *}$	$\frac{13,7 \pm 0,11}{12,9 \pm 0,11} \text{ * } \blacktriangle$	$\frac{13,7 \pm 0,13}{13,36 \pm 0,11}$
ОКУ на ЕПП (с)	$\frac{152,4 \pm 2,37}{124,1 \pm 1,3} \text{ * } \blacktriangle$	$\frac{152,4 \pm 2,0}{136,1 \pm 1,29} \text{ *}$	$\frac{141,16 \pm 1,35}{119,2 \pm 1,18} \text{ * } \blacktriangle$	$\frac{139,8 \pm 2,0}{129,4 \pm 1,23} \text{ *}$
Бег на 3 км (с)	$\frac{763,08 \pm 9,4}{695,1 \pm 5,2} \text{ * } \blacktriangle$	$\frac{765,4 \pm 13,9}{713,0 \pm 6,3} \text{ *}$	$\frac{742,86 \pm 7,68}{683,1 \pm 6,4} \text{ * } \blacktriangle$	$\frac{734,26 \pm 8,5}{712,7 \pm 8,8}$

**Примечания.** 1. В числителе – результаты исследований до начала педагогического эксперимента, в знаменателе – после окончания педагогического эксперимента.

2. \* – достоверные различия (при  $p \leq 0,05$ ) между результатами группы до и после окончания педагогического эксперимента; ▲ – достоверные различия (при  $p \leq 0,05$ ) между результатами контрольной и экспериментальной групп по окончании педагогического эксперимента.

3.  $p > 0,05$

Результаты выполнения физического упражнения № 4 «подтягивание на перекладине» в экспериментальных группах имеют достоверные различия с исходными данными и с итоговыми результатами контрольных групп ( $p \leq 0,05$ ): ЭГ1 –  $19,56 \pm 0,84$  раз, ЭГ2 –  $23,3 \pm 0,7$  раза, КГ1 –  $14,2 \pm 0,68$  раз, КГ2 –  $19,7 \pm 0,61$  раза. Прирост результатов в выполнении упражнения № 4 «подтягивание на перекладине» составил: ЭГ1 – 7,12 раз, ЭГ2 – 8,6 раза, КГ1 – 1,84 раз, КГ2 – 5,3 раза. В контрольной группе 3-го курса результаты по итогам эксперимента имеют достоверные различия с исходными данными, что связано с большим количеством часов, предусмотренных на физическую подготовку.

Значительно в лучшую сторону изменились результаты в экспериментальных группах в сравнении с контрольными по выполнению упражнения № 41 «бег на 100 м». Они имеют достоверные различия как с исходными данными, так и с итоговыми результатами контрольных групп. Результаты выполнения упражнения «бег на 100 м» составили: ЭГ1 –  $13,4 \pm 0,08$  с, ЭГ2 –  $12,9 \pm 0,11$  с, в КГ1 –  $13,72 \pm 0,1$  с, КГ2 –  $13,36 \pm 0,11$  с. Прирост в результатах экспериментальных групп составил в среднем – 0,85 с. В контрольных группах прирост значительно меньше: он составлял 0,2 с.

В выполнении общего контрольного упражнения на единой полосе препятствий и в выполнении упражнения «бег на 3 км» в контрольной группе 1-го курса имеются достоверные различия с исходными данными. В контрольной группе 3-го курса достоверные различия с исходными данными имеются только в выполнении упражнения № 32 «общее контрольное упражнение на единой полосе препятствий». В экспериментальных группах результаты выполнения упражнений по итогам эксперимента значительно лучше и имеют достоверные различия с исходными результатами и с итоговыми результатами контрольных групп ( $p \leq 0,05$ ). По выполнению упражнения № 46 «бег на 3 км» по итогам эксперимента получены следующие результаты: ЭГ1 –  $695,1 \pm 5,2$  с, ЭГ2 –  $683,1 \pm 6,4$  с, КГ1 –  $713,0 \pm 6,3$  с, КГ2 –  $712,7 \pm 8,8$  с. Прирост составил: ЭГ1 – 67,9 с, ЭГ2 – 59,76 с, КГ1 – 52,1 с, КГ2 – 21,5 с. В среднем результат в экспериментальных группах улучшился на 63,83 с. В контрольных группах – на 36,8 с.

В выполнении упражнения № 32 «общее контрольное упражнение на единой полосе препятствий» результаты по итогам прохождения обучения следующие: ЭГ1 –  $124,1 \pm 1,3$  с, ЭГ2 –  $119,2 \pm 1,18$  с, КГ1 –  $136,1 \pm 1,29$  с, КГ2 –  $129,4 \pm 1,23$  с. В экспериментальной группе 1-го курса прирост результата на 12 с был лучше, чем в контрольной группе. В экспериментальной группе 3-го курса прирост результата на 10,4 с был лучше, чем в соответствующей контрольной группе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты уровня физической подготовленности, состояния сердечно-сосудистой системы, морфофункциональные показатели и показатели внешнего дыхания военнослужащих экспериментальных и контрольных групп высшего образования уровня «специалитет» позволяют сделать вывод об эффективности предложенной модели физической подготовки для курсантов высшего образования Военной академии связи.

## Список используемых источников

1. Сорокин В.П., Андросов А.М., Михаил И.И. Теоретико-методологические основы проектирования образовательных и педагогических технологий по учебной дисциплине «Физическая подготовка» в высших военных учебных заведениях // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур. – 2018. – № 4. – С. 116–119.

2. Сорокин В.П., Андросов А.М., Андросова Е.А. Трансдисциплинарность физической подготовки // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур. – 2018. – № 4. – С. 25–28.

3. Уровень межпредметных знаний биология – физическая культура у выпускников школ, поступающих в высшие военные учебные заведения / Е.А. Андросова, П.К. Кузнецов, Ю.В. Яковлев, А.П. Гайкалов, А.В. Горохов // Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгафта. – 2018. – № 10 (164). – С. 25–28.

С.А. Багрецов,  
доктор техн. наук, профессор;  
С.М. Молдованова

## МОДЕЛЬ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ КАДРОВ В ВУЗЕ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ВООРУЖЕНИЯ

Проведен качественный анализ динамической системы подготовки научно-педагогических и научных кадров в вузе в интересах формирования новых научных направлений исследования, вызванных появлением принципиально новых систем вооружения. Определены понятия спроса и предложения на научный потенциал вуза. Предложены определение и количественная оценка научного потенциала, учитывающая мотивационную направленность членов научных коллективов. Модель взаимодействия рассматривается как редуцированная модель динамической системы третьего порядка. Приводится аналитический анализ устойчивости особых точек.

Ключевые слова: научный потенциал, мотивационная направленность, синергетика, динамические системы, релаксация, характеристическое уравнение, устойчивость, особые точки.

Для решения задач по обеспечению военной безопасности государства Министерство обороны Российской Федерации (МО РФ) осуществляет подготовку военнослужащих в рамках системы подготовки кадров, одним из ведущих элементов которой являются вузы. В свою очередь вузы, решая прямую задачу, опосредованно влияют на уровень боевой способности войск, который определяет способность государства противостоять внешним и внутренним угрозам (рис. 1). В вузах работает значительная часть ученых, сформированы и продолжают формироваться учебно-материальная и научно-исследовательская базы. Вклад вузов в научный потенциал Вооруженных сил РФ, упрочение фундамента интеллектуального потенциала, являющегося важнейшим фактором обороноспособности страны, отмечал в своих работах В.Д. Рябчук [1, 2, 3].



Рис. 1. Интеграция образования и военной науки

В целях развития военной науки, укрепления научного и научно-педагогического потенциала в вузах МО РФ создаются и осуществляют работу военно-научные школы (ВНШ). ВНШ являются неотъемлемой частью национальных научных школ РФ и представляют собой сложившиеся на добровольной основе коллективы ученых и специалистов разных возрастных групп и научной квалификации, докторантов, адъюнктов, лиц, прикрепленных для

подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук без освоения образовательной программы в адъюнктуре, и обучающихся (курсантов, слушателей), связанных с проведением актуальных научных исследований в одной из областей науки в интересах обороны Российской Федерации и объединенных совместной деятельностью по подготовке научно-педагогических и научных кадров по профильному для образовательной (научной) организации МО РФ направлению на основе единых методологических подходов под руководством авторитетного ученого (ученых), имеющие признанные и реализованные на практике научные результаты [4].

Современная динамика научно-технического прогресса, особенно в сфере вооружения, приводит к необходимости оперативного формирования новых ВНШ и, следовательно, развития новых научных направлений исследования, парирующих угрозы появления принципиально новых систем вооружения, нарушающих паритетные отношения в сферах их разработки, производства и боевого применения для решения стратегических и оперативно-тактических задач. Решение этих вопросов неразрывно связано с необходимостью оперативного изменения системы подготовки научно-педагогических и научных кадров в плане изменения целевых задач дальнейшей деятельности для отдельных ученых вуза в интересах выполнения приоритетных, на настоящий период времени, научных исследований и в дальнейшем формирования новых ВНШ или развития уже действующих ВНШ. Иницирующими факторами начала необходимого формирования нового научного направления в вузе в этом случае будут являться, например, данные о соответствующих разработках научных направлений за рубежом, появление или планирование производства образцов техники, реализуемых на основе применения новых принципов функционирования, и т. д.

Необходимость решения новых научных задач определяет появление локального спроса на научные кадры, обладающие соответствующим научным потенциалом в сфере научных знаний нового направления. Вуз или научная организация удовлетворяет этот спрос, выделяя часть научных специалистов для решения научных проблем нового направления исследований. Прежде чем рассмотрим основную задачу исследования, определим физическое значение спроса и предложения. В данном случае под спросом ( $D(t)$ ) будем понимать взвешенную сумму числа научных специалистов, научно-педагогических и научных кадров вуза (НПК), а также НПК, необходимых для решения поставленной (возникшей как результат научно-технического развития систем вооружения) научно-технической проблемы и решения связанных с ней научно-педагогических задач, т. е.

$$D(t) = \sum_i^3 g_i w_i(t),$$

где  $g_i$  – весовые коэффициенты значимости научных специалистов, кандидатов и докторов наук в решении научных и научно-педагогических задач рассматриваемой научно-технической проблемы;

$w_i(t)$  – число научных специалистов, кандидатов и докторов наук ( $i = 1-3$ ), необходимых в данный момент времени  $t$  для решения указанных задач и формирования ВНШ в данном направлении исследовательской деятельности.

Конкретное численное выражение спроса на специалистов в первичном порядке может быть определено на основе ретроспективного анализа решения подобных научных задач в вузе. По мере уточнения возникшей проблемы количественный состав параметров  $w_i(t)$ , а следовательно, и спрос изменяются. В определении этого параметра принимается во внимание, что формально все научные специалисты, кандидаты и доктора наук, определяющие спрос на научный потенциал вуза, обладают полным объемом знаний по решаемой научной проблеме в отличие от реального предложения вуза, специалисты которого не обладают полным объемом знаний по этой проблеме на настоящий момент времени (иначе она не была бы проблемой). На основе анализа дефицита знаний о проблеме далее составляются

планы научных исследований и определяется стратегия их решения. Однако предложение вуза не ограничивается только лишь выполнением требований численного состава специалистов научных групп и оценкой дефицита их знаний по решаемой проблеме, важной составной частью их научного потенциала является мотивация. Мотив их деятельности может способствовать повышению эффективности научных исследований или, в другом крайнем случае, нивелировать ее результаты. Многочисленные примеры реальной практики доказывают справедливость этого вывода.

Таким образом, предложение вуза в ответ на спрос, формируемый внешней средой, на необходимость организации новых научных исследований реализуется в форме выделения части научного потенциала вуза в виде определенной структуры научных сотрудников, кандидатов и докторов наук, обладающих определенным объемом знаний в сфере предполагаемых исследований и имеющих достаточный для данного вида деятельности уровень мотивации. В этом случае численное выражение для оценки предложения вуза, т. е. локально выделяемого им научного потенциала, может быть определено следующим образом [5]:

$$S(t) = \sum_{i=1}^3 g_i \left\{ \sum_{j=1}^{w_i} k_{ij} \left[ \alpha_{ij} \frac{Q_{ij}^*(t)}{Q_{ij}} + (1 - \alpha_{ij}) F_{ij}(t) \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $Q_{ij}$  – требуемый объем знаний  $j$ -го специалиста  $i$ -й группы научных сотрудников;

$Q_{ij}^*(t)$  – реальный объем знаний специалиста на текущий момент времени;

$k_{ij}$  – значимость  $j$ -го специалиста  $i$ -й группы научных сотрудников;

$F_{ij}(t)$  – степень соответствия мотивационного комплекса  $j$ -го специалиста требованиям научной деятельности в составе  $i$ -й группы научных сотрудников;

$(1 - \alpha_{ij})$  – значимость мотивационной составляющей в профессиональной деятельности  $j$ -го специалиста, являющейся составной частью его индивидуального научного потенциала.

В основу оценки мотивационного комплекса специалиста требованиям научной деятельности положена классификация мотивов-смыслов Л.Г. Лаптева [6, 7]. В качестве последних рассматриваются внутренние мотивы, определяющие предрасположенность к труду; внешние положительные мотивы, вызывающие положительную реакцию и побуждающие к труду, и внешние отрицательные мотивы, определяющие смысловое содержание деятельности как возможность избежать наказания. Различные сочетания выраженности этих мотивов и структура их внутренних соотношений образуют строковые образы мотивационных комплексов сотрудников. Их требуемые значения определяются целями и задачами деятельности научного коллектива на настоящий момент времени. Степень их соответствия целям и задачам организации для каждого специалиста определяется как функция расстояния между векторами комплексов мотивов деятельности  $j$ -го специалиста с учетом структуры их взаимных отношений и их требуемых значений. Для оценки расстояния между подобными образами описания анализируемых объектов в работах [8] и [9] авторами предложено использовать алгоритм оценки расстояний Левенштейна. В этом алгоритме учитывается не только значение атрибута степени выраженности мотивов  $j$ -го специалиста, но и их место в ранжированном ряду комплексов мотивов его деятельности. Полная методика решения этих задач представлена в работах [6] и [7]. Понятно, что мотивационные комплексы специалистов оказываются весьма чувствительными к воздействию управляющих административных ресурсов. В этом отношении они являются важным регулятором научного потенциала вуза.

Таким образом, можно сделать вывод, что как спрос на соответствующую часть научного потенциала вуза со стороны внешних факторов, инициирующих начало необходимого формирования нового научного направления в исследовательской и научно-педагогической деятельности, так и предложение его удовлетворения со стороны вуза в форме предлагае-

мого научного потенциала его НПК, обладающих необходимой совокупностью (возможно, неполной на данный момент времени) знаний в данной сфере научных исследований, подвержены определенной динамике их взаимосвязанных изменений. Она определяется:

- во-первых, неизбежной релаксацией спроса и предложения;
- во-вторых, динамикой изменения управляющих воздействий на систему подготовки НПК в вузе и способностью самой системы адекватно реагировать на эти воздействия;
- в-третьих, динамикой изменения спроса на научный потенциал вуза, связанной с динамикой роста сложности и объемов научных исследований по мере выявления новых факторов, закономерностей и явлений в формируемом направлении научной и научно-педагогической деятельности вуза.

Указанная динамика взаимодействия взаимосвязанных как положительными, так и отрицательными связями переменных спроса, предложения и управления требует тщательного анализа устойчивости всей системы подготовки НПК вуза в интересах формирования новых научных направлений исследований и подготовки специалистов по управлению и эксплуатацией новых систем вооружения. Нарушение устойчивости опасно прежде всего тем, что в этом состоянии нарушается координация научных исследований и подготовки НПК, усиливается их стохастичность, что приводит к нерациональному распределению ресурсов и в конечном итоге к потере централизованного управления научной и научно-педагогической деятельностью, по крайней мере, в данном направлении научной и научно-педагогической деятельности.

Таким образом, приходим к необходимости изучения и оценки параметров устойчивости трехмерной динамической модели взаимосвязанных изменений спроса и предложения на научный потенциал вуза и управляющих воздействий на его формирование, образующих в целом самоорганизующуюся модель системы подготовки НПК вуза в интересах формирования новых актуальных, на данный момент времени, научных направлений исследований и подготовки специалистов. Для этого рассмотрим пространственно однородную модель подготовки НПК в вузе в интересах выполнения требований по формированию нового научного направления исследования и решения сопутствующих этому направлению учебных задач подготовки специалистов соответствующего профиля.

Для пространственной однородной модели подготовки научных и научно-педагогических кадров вуза с учетом взаимовлияния указанных выше факторов система уравнений будет иметь вид

$$\begin{cases} \frac{dD}{dt} = -a_1 D + a_2 S, \\ \frac{dS}{dt} = -b_1 S + b_2 DU, \\ \frac{dU}{dt} = -c_1 (U - U_e) - c_2 S. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $D(t)$  – функция спроса на НПК вуза в интересах формирования нового научного направления исследований и подготовки специалистов;

$S(t)$  – объем предложения вуза в форме предлагаемого потенциала его НПК, обладающих соответствующей мотивацией и необходимой совокупностью знаний (возможно, неполной на данный момент времени) в рассматриваемой сфере научных исследований;

$U(t)$  – управляющий параметр (административный ресурс воздействия), определяющий силу воздействия на систему подготовки НПК вуза в интересах формирования нового научного направления исследований и подготовки специалистов в вузе. Административный ресурс включает в себя все многообразие механизмов воздействия на систему подготовки НПК в вузе, а именно: институциональные, организационные, педагогические, психологические и мотивацион-

ные меры воздействия (меры морального и материального стимулирования). Их оценка не имеет объективной основы их измерения в существующих шкалах отображения силы их воздействия на изучаемые процессы подготовки НПК в вузе. Поэтому наиболее эффективной шкалой оценки административного ресурса является порядковая шкала оценок, отражающая субъективные (нечеткие) представления руководства вуза о степени воздействия на систему подготовки НПК. В качестве основы далее будем рассматривать пятибалльную шкалу оценок.

Первые члены динамической системы являются релаксационными и связаны с затуханием спроса, предложения и управляющего параметра административного воздействия на систему подготовки НПК по мере завершения процесса формирования и внутреннего осознания (формирования его научного и мотивационного базисов) нового научного направления исследований и подготовки специалистов в вузе. В данном случае коэффициенты  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  определяют интенсивность процессов затухания указанных параметров. Релаксационные изменения этих параметров определяются новизной, значимостью и степенью предшествующей разработки нового научного направления в вузе. Их численные значения могут быть определены на основе ретроспективного анализа процессов организации подобных исследований и последующего становления ВНШ.

Коэффициент  $a_2$  второго члена первого уравнения системы (2) определяет интенсивность роста части научного потенциала вуза в интересах удовлетворения его спроса в связи с возникшей необходимостью формирования нового научного направления исследований в научно-исследовательской и научно-преподавательской деятельности в вузе. Он может быть также определен экспертно на основе ретроспективного анализа процессов организации подобных исследований и формирования научных подразделений в вузе. Второй член второго уравнения системы (2) отражает наличие положительной обратной связи между спросом специалистов  $D(t)$  и уровнем их качества. В данном случае  $b_2$  есть интенсивность относительного изменения качества научного потенциала специалистов, реализующих данное направление научной деятельности, под воздействием административного ресурса, определяемого параметром  $U(t)$ . В третьем уравнении управляющий параметр релаксирует к стационарному значению  $U_e$ , отражающему фоновый (не возбужденный новыми задачами) характер управленческого административного ресурса, используемого в системе управления подготовкой НПК в вузе в условиях отсутствия возмущений со стороны внешней среды, т. е. отсутствия необходимости реализации инноваций в сфере научных исследований. Наконец, второй член третьего уравнения системы (2) отражает наличие отрицательной обратной связи ( $c_2$  – интенсивность обратной связи), обусловленной естественным противодействием формирующегося научного объединения воздействию извне со стороны административного ресурса. Это противодействие возрастает по мере роста процессов самоорганизации рассматриваемой научной группы. Этот вывод в целом подтверждается реальной практикой формирования организаций в различных сферах деятельности.

Таким образом, в модели (2) на количественно-качественном уровне могут быть определены все ее составляющие. При этом учитываются данные ретроспективного анализа формирования новых научных направлений в вузе, научный потенциал существующих ВНШ, доминирующий характер мотивационной направленности деятельности НПК и эффективность применения административного ресурса в интересах их развития и совершенствования. Такой подход к анализу рассматриваемой динамической модели процессов формирования новых научных направлений в вузе позволяет не только дать оценку качественных характеристик устойчивости такой системы, но и оценить динамику ее развития с учетом всей системы воздействующих на нее факторов внешней среды. Все величины, входящие в модель (2), характеризуют поведение системы как целого, т. е. представляют значения, усред-

ненные по объему системы (ансамблю всех подсистем и процессов). Наличие положительной обратной связи переменных  $D(t)$ ,  $U(t)$  с переменными  $U(t)$  и  $S(t)$ , зависящими от времени, с одной стороны, приводит к самоорганизации системы, а с другой – является основой их синергетической взаимосвязи [10, 11, 12].

В целом динамическая система (2) представляет собой однородную систему второго порядка и по форме совпадает с редуцированной системой уравнений Лоренца [13]. Запись уравнений Лоренца в форме (2) обусловлена выделением в явном виде параметра  $U_e$ , определяющего по величине фоновый (не возбужденный новыми задачами) характер применения административного ресурса в системе управления подготовкой НПК в вузе. Этот параметр, с одной стороны, задает образовательной системе вуза определенные критерии качества подготовки НПК, а с другой – определяет связь такой системы с внешней средой и оказывает существенное влияние на ее самоорганизацию.

Рассмотрим более подробно динамическую систему (2). Так как это линейная система с постоянными коэффициентами, то она всегда может быть проинтегрирована по крайней мере в квадратурах [14]. В этом случае особые (равновесные) точки динамической модели (2) могут быть найдены из решения следующей алгебраической системы уравнений [14, 15, 16]:

$$\begin{cases} -a_1 D + a_2 S = 0, \\ -b_1 S + b_2 D U = 0, \\ -c_1 (U - U_e) - c_2 S D = 0. \end{cases}$$

Решая эту систему, получим следующие выражения для определения особых точек:

$$(D^*, S^*, U^*) = (0, 0, U_e); (D^*, S^*, U^*) = \left( \sqrt{\frac{c_1 a_2 (U_e - U_c)}{c_2 a_1}}, \frac{a_1}{a_2} \sqrt{\frac{c_1 a_2 (U_e - U_c)}{c_2 a_1}}, U_c \right),$$

где  $U_c$  – реализуемый в настоящее время в вузе административный ресурс в управлении подготовкой НПК,  $U_c < U_e$ ;  $U_c = a_1 b_1 / a_2 b_2 > 0$ .

Заметим, что для второй особой точки фактически прописывается условие, что административный ресурс начинает воздействовать на систему подготовки НПК с уровня ниже его фонового значения, т. е. до появления «спроса» на научные кадры. В связи с развитием новых научных направлений исследований и подготовкой специалистов в вузе ее организация базировалась на текущих (накатанных) организационных и институциональных механизмах ее регуляции. В этом случае отставание и инерционность административного ресурса могут быть связаны с недопониманием возникшей проблемы или с недостатком ресурсов научных кадров, что в любом случае связано в первую очередь с необходимостью опережающего планирования и реализации подготовки НПК в вузе, исходя из анализа процессов научно-технического развития систем вооружения.

Структура фундаментальной системы решений динамической модели (2) зависит от вида корней характеристического уравнения [9, 14]. Характеристическое уравнение для динамической системы (2) будет иметь вид

$$|A - \lambda I| = \begin{vmatrix} -a_1 - \lambda & a_2 & 0 \\ b_2 U^* & -b_1 - \lambda & b_2 D^* \\ -c_2 S^* & -c_2 D^* & -c_1 - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

Тогда для первой особой точки это уравнение будет иметь вид

$$\begin{aligned} |A - \lambda I| &= \begin{vmatrix} -a_1 - \lambda & a_2 & 0 \\ b_2 U_e & -b_1 - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & -c_1 - \lambda \end{vmatrix} = (-c_1 - \lambda)[(-b_1 - \lambda)(-a_1 - \lambda) - a_2 b_2 (U_c - U_e)] = \\ &= (-c_1 - \lambda)[\lambda^2 + (a_1 + b_1)\lambda + (U_c - U_e)a_2 b_2] = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Корни кубического характеристического уравнения (4) будут равны соответственно

$$\lambda_1 = -c_1 < 0; \lambda_{2,3} = -\left(\frac{a_1 + b_1}{2}\right) \pm \sqrt{\frac{(a_1 + b_1)^2}{4} - a_2 b_2 (U_c - U_e)}.$$

Их анализ позволяет сделать следующие выводы [15]:

1) если  $U_c > U_e$ ,  $\frac{(a_1 + b_1)^2}{4} \geq a_2 b_2 (U_c - U_e)$ , то  $\lambda_2 < 0, \lambda_3 < 0$ . Эти условия соответствуют устойчивому узлу (при  $U_c = U_e$  имеем  $\lambda_2 < 0, \lambda_3 = 0$ );

2) если  $U_e > U_c$ ,  $\frac{(a_1 + b_1)^2}{4} < a_2 b_2 (U_c - U_e)$ , то  $\lambda_{1,2}$  имеют комплексно-сопряженный вид с отрицательной действительной частью, что соответствует устойчивому фокусу;

3) если  $U_c < U_e$ , то  $\lambda_2 > 0, \lambda_3 < 0$ , что соответствует седлу. Для второй особой точки характеристическое уравнение (3) примет вид

$$|A - \lambda I| = \begin{vmatrix} -a_1 - \lambda & a_2 & 0 \\ b_2 U_e & -b_1 - \lambda & b_2 \bar{A} \\ -(a_1 c_2 / a_2) \bar{A} & -c_2 \bar{A} & -c_1 - \lambda \end{vmatrix} = (-a_1 - \lambda) \begin{vmatrix} -b_1 - \lambda & b_2 \bar{A} \\ -c_2 \bar{A} & -c_1 - \lambda \end{vmatrix} - a_2 \begin{vmatrix} b_2 U_e & b_2 \bar{A} \\ -(a_1 c_2 / a_2) \bar{A} & -c_1 - \lambda \end{vmatrix} =$$

$$= -\lambda^3 - (a_1 + b_1 + c_1)\lambda^2 - (a_1 b_1 + a_1 c_1 + b_1 c_1 - b_2 c_2 \bar{A}^2 + a_2 b_2 U_c)\lambda - 2a_1 b_2 c_2 \bar{A}^2 - a_1 b_1 c_1 + a_2 b_2 c_1 U_c = 0, \quad (5)$$

где  $\bar{A} = \sqrt{\frac{c_1 a_2 (U_e - U_c)}{c_2 a_1}}$ .

В окончательном виде уравнение (5) может быть представлено следующим образом:

$$\lambda^3 + (a_1 + b_1 + c_1)\lambda^2 + [2a_1 b_1 + a_1 c_1 + b_1 c_1 - \frac{c_1 c_2 b_2}{a_1} (U_e - U_c)]\lambda + 2b_2 a_2 c_1 (U_e - U_c) = 0. \quad (6)$$

В этом уравнении свободный член больше нуля  $U_e > U_c$  и изменять знак может только коэффициент при  $\lambda$ . Применим к уравнению (6) условия Рауса – Гурвица [14]. Согласно этим условиям, для того чтобы все корни любого произвольного кубического уравнения

$$a_0 \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0 \quad (7)$$

с действительными коэффициентами имели отрицательные действительные части, необходимо и достаточно, чтобы все главные диагональные миноры матрицы Гурвица для уравнения (7)

$$G = \begin{pmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

были положительны:

$$\begin{vmatrix} a_2 & 0 \\ a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_2 a_3 > 0, \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 a_3 > 0, \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \quad (9)$$

В рассматриваемом случае эти условия для второй особой точки примут вид:

$$\begin{cases} 2a_1 b_1 + a_1 c_1 + b_1 c_1 - (c_1 c_2 b_2 / a_1) (U_e - U_c) > 0, \\ (a_1 + b_1 + c_1)(2a_1 b_1 + a_1 c_1 + b_1 c_1) - \\ -(c_1 b_2 / a_1) (U_e - U_c) (a_1 c_2 + b_1 c_2 + c_1 c_2 - 2a_1 a_2) > 0. \end{cases} \quad (10)$$

Рассмотрим в этой связи два частных случая:

1)  $a_1 = b_1 = c_1 = a_2 = b_2 = c_2 = 1$ , откуда следует, что  $U_c = 1$ . В этом случае система неравенств (10) приводится к виду  $1 < U_e < \frac{17}{5}$ ;

2)  $a_1 = b_1 = a_2 = b_2 = 1$ ,  $c_1 = c_2 = c$ . В этом случае система неравенств (9) будет иметь вид

$$\begin{cases} c^3(U_e - 1) - 2c^2(2 - U_e) + 2c(U_e - 4) - 4 < 0, \\ 0 < c < \frac{1 + \sqrt{1 + 2(U_e - 1)}}{U_e - 1}. \end{cases} \quad (11)$$

Рассмотрим, как изменится первое неравенство этой системы при выполнении граничных условий второго неравенства этой же системы. Легко видеть, что при  $c = 0$  оно удовлетворяется. Подставляя значение нижней границы второго неравенства системы (11) в первое неравенство этой системы, получим

$$\left( \frac{1 + \sqrt{1 + 2(U_e - 1)}}{U_e - 1} \right)^3 (U_e - 1) - 2 \left( \frac{1 + \sqrt{1 + 2(U_e - 1)}}{U_e - 1} \right)^2 (2 - U_e) + 2 \left( \frac{1 + \sqrt{1 + 2(U_e - 1)}}{U_e - 1} \right) (U_e - 4) - 4 < 0. \quad (12)$$

В случае, когда  $U_e$  стремится к единице, левая часть неравенства (12) стремится к минус бесконечности, а при возрастании  $U_e$  она быстро возрастает. Например, при  $U_e = 2$  условие (12) уже не выполняется. Следовательно, в интервале  $1 < U_e < 2$  существует некоторое пороговое значение параметра  $U_e$ , разделяющее области устойчивости и неустойчивости второй особой точки во втором частном случае. Например, если взять значение  $U_e = 3/2$ , то неравенство (12) примет заведомо выполняющийся вид  $(1 + \sqrt{2})(-10 - 4\sqrt{2}) - 4 < 0$ . Таким образом, в этом случае вторая особая точка будет являться устойчивым узлом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье выполнено качественное исследование развития системы подготовки научно-педагогических и научных кадров в вузе с учетом динамично изменяющегося спроса на их количественные и качественные параметры, определяемые необходимостью формирования в вузе новых научных направлений. Динамика системы подготовки научно-педагогических и научных кадров в вузе во многом определяется динамикой формирования новых научно-технических направлений развития и совершенствования систем вооружения. При этом важной задачей в этом процессе является задача согласования динамических характеристик с системы отбора и подготовки НПК и последующей организации их деятельности в интересах решения новых научных задач, с одной стороны, а с другой – требований, определяемых динамикой появления и развития новых научных направлений совершенствования систем вооружения. Несогласованность динамических характеристик указанных систем может привести к нарушению устойчивости их взаимодействия и, следовательно, к невыполнению планов научных исследований, к нерациональному использованию людских, административных и материально-технических ресурсов.

В работе рассмотрены пространственно-однородная модель подготовки НПК в вузе в интересах выполнения требований по формированию нового научного направления исследования и решения сопутствующих этому направлению частных учебных задач подготовки специалистов соответствующего профиля, а также динамические характеристики системы подготовки НПК в вузе. Применение различных форм, способов и методов организации взаимодействия отдельных элементов системы подготовки НПК в вузе позволяет решить задачу оптимального распределения ресурсов между направлениями научных исследований в вузе.

### Список используемых источников

1. *Рябчук В.Д.* Увеличивать вклад военно-учебных заведений в научный потенциал Вооруженных Сил // *Военная мысль*. – 1986. – № 5. – С. 54–59.
2. *Рябчук В.Д.* Наука, образование, реформа // *Военная мысль*. – 1994. – № 2. – С. 33–39.
3. *Рябчук В.Д.* Военное науковедение и методология военной науки // *Военная мысль*. – 2001. – № 6. – 80 с.
4. Методические рекомендации по организации деятельности военно-научных школ в Министерстве обороны Российской Федерации: утв. статс-секретарем – заместителем МО РФ 1 августа 2016 года. – М., 2016. – С. 1–2.
5. *Багрецов С.А., Воробьев Н.Н., Шалашаа З.И.* Интеллектуальные ресурсы организации: учеб. пособие. – М.: Илекса, 2011. – 360 с.
6. *Багрецов С.А., Львов В.М., Петров В.Е.* Методы и средства обеспечения гомеостатичности индивидуальной деятельности оператора в человеко-машинных комплексах. – СПб.: Издательский дом «Петрополис», 2012. – 340 с.
7. Диагностика социально-психологических характеристик малых групп с внешним статусом: учеб. пособие / С.А. Багрецов, В.М. Львов, В.В. Наумов и др. – СПб.: Лань. Изд-во С-Пб. ун-та МВД России, 1999. – 640 с.
8. *Шашлюк Ю.А., Багрецов С.А., Добрынин В.Н.* Управление безопасностью эксплуатации железнодорожных транспортных систем: моногр. – М.: ВНИИГеосистем, 2018. – 390 с.
9. *Булаличев В.А., Серков Л.А.* Модельный подход к функционированию вузов как самоорганизующихся систем // *Информационные технологии*. – 2006. – № 3. – С. 68–73.
10. *Серков Л.А.* Синергетические аспекты моделирования социально-экономических процессов. – Екатеринбург: ИЭУРО РАН. Изд-во АМБ, 2008. – 216 с.
11. *Хакен Г.* Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
12. *Lorenz E.N.* Deterministic Non-periodic Flow // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1963. – Vol. 20. – P. 130.
13. *Матвеев Н.М.* Дифференциальные уравнения. – 3-е изд., доп. – Минск: Высш. шк., 1968. – 348 с.
14. *Андреев А.Ф.* Особые точки дифференциальных уравнений. – Минск: Высш. шк., 1979. – 136 с.
15. *Беллман Р.* Введение в теорию матриц. – 2-е изд. / пер. с англ. под ред. В.В. Лидского. – М.: Наука, 1976. – 352 с.

С.А. Багрецов,  
доктор техн. наук, профессор;  
С.М. Молдованова

## МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКОЙ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ КАДРОВ В ВУЗЕ

В статье исследуются вопросы математического моделирования процессов функционирования системы подготовки научно-педагогических и научных кадров (НПК) в вузе, в частности, анализируются процессы динамики изменений состояния системы подготовки НПК с помощью аналитических и стохастических моделей с учетом проводимой в вузе политики назначений, оттока кандидатов, реализуемых пропорций их перемещений по уровням подготовки и наличия вакантных мест в системе.

Ключевые слова: система подготовки научно-педагогических и научных кадров, разностные уравнения, стационарность, линейность, переходная матрица, дифференциальные уравнения, собственный вектор матрицы, определитель матрицы.

### ВВЕДЕНИЕ

Базовой основой эффективного функционирования и дальнейшего развития вуза является постоянное совершенствование системы подготовки НПК. Целевая задача подготовки НПК состоит в удовлетворении потребностей вуза в сохранении и наращивании научного потенциала как для повышения качества образовательного процесса, так и для проведения научных исследований в перспективных направлениях развития систем вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ). Система формирования НПК в вузе в силу динамики процесса их отбора и подготовки, развития личностных и профессиональных характеристик кадров высшей научной квалификации и ряда других факторов постоянно находится в непрерывном движении и должна рассматриваться как динамический объект [7, 8]. Вместе с тем в отдельные моменты времени она может быть представлена как систематический объект. Например, при учете фактического состояния, прогноза и планирования процесса формирования научного потенциала вуза с учетом необходимых изменений направлений подготовки НПК и решения научных задач, связанных с последующим прогнозируемым развитием систем ВВСТ. Ниже в статье будем рассматривать систему подготовки НПК по отдельным направлениям научной и образовательной деятельности именно с этих позиций, представляя ее в виде последовательности отдельных уровней подготовки в адъюнктуре и военной докторантуре с последующим переходом на уровни научно-педагогической деятельности на кафедрах или в научных подразделениях вуза с возможной дальнейшей конкретизацией продвижения специалистов высшей научной квалификации по служебной лестнице внутри этих подразделений. В частности, уровнями подготовки являются:

– для системы подготовки кадров высшей квалификации в адъюнктуре по очной форме обучения – первый, второй и третий годы подготовки, далее назначение на преподавательскую или научную должность;

– для системы подготовки кадров высшей квалификации в адъюнктуре по заочной форме обучения – первый, второй, третий и четвертый годы подготовки, далее продолжение прохождения службы на занимаемой должности либо перемещение на другую должность, например, с должности инженерно-технического состава назначение на преподавательскую или научную должность;

– для системы подготовки научных кадров – первый, второй и третий годы подготовки в военной докторантуре, далее перемещение на должности профессорско-преподавательско-го или научного состава.

Переходы с одного уровня на другой определяются рядом факторов, связанных с качеством отбора кандидатов, с организацией, обеспечением и контролем их научной деятельности, с психологической атмосферой в научных коллективах и т. п. Очевидно, что эти же факторы во многом будут определять и состав механизмов управления подготовкой НПК.

### МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ КАДРОВ В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Для данного вида моделей подготовки НПК будем считать неизменными на данном периоде наблюдения коэффициенты пропорциональности перехода индивидов с одного уровня подготовки на другой (например, переход с первого года подготовки в адъюнктуре на второй и т. д. путем перевода адъюнкта на ускоренное обучение по индивидуальному учебному плану в порядке, установленном нормативно-правовыми документами). Кроме того, на этом этапе анализа будем считать, что они не зависят также от предыстории состояния уровней подготовки НПК, и каждое направление научной подготовки на этом этапе будем считать как самостоятельное независимое направление подготовки НПК.

Указанные предположения довольно сильны, однако простота моделей, которые получаются при этом, и те возможности, которые они дают для более глубокого анализа кадровых систем, вполне оправдывают их введение.

В моделях перемещения кандидатов по уровням подготовки НПК, т. е. продвижения по этапам подготовки, промежуточные потоки будем отображать как части числа индивидов соответствующих уровней. Пусть  $U_{ij}(t)$  – число индивидов, перешедших из  $i$ -го уровня в  $j$ -й в течение  $t$ -го периода пребывания в адъюнктуре или докторантуре, которое представляет собой некоторую часть числа индивидов  $x_i(t)$ , находящихся на  $i$ -м уровне подготовки НПК в  $t$ -м периоде функционирования всей системы подготовки НПК в вузе. Эту часть можно выразить соотношением пропорциональности

$$U_{ij} = q_{ji} x_i(t), \quad (1)$$

где  $x_i(t)$  – число индивидов, имеющих на  $i$ -м уровне к началу  $t$ -го периода;

$q_{ji}$  – коэффициент пропорциональности, который указывает, какая часть числа кандидатов  $j$ -го уровня подготовки НПК к началу  $t$ -го периода перешла на  $i$ -й уровень в течение того же периода времени;

$U_{ij}$  – число кандидатов, перешедших из  $i$ -го уровня на  $j$ -й уровень в течение  $t$ -го периода.

Коэффициент пропорциональности  $q_{ji}$  показывает, какая часть индивидов  $i$ -го уровня к началу  $t$ -го периода осталась в нем до конца того же периода. Рассматривая эту ситуацию в отношении системы подготовки кадров высшей квалификации в адъюнктуре, можно говорить о том, что  $q_{ji}$  – это часть адъюнктов, например, первого года подготовки ( $i = 1$ ), которая не смогла в полном объеме отчитаться за проделанную работу в отличие от числа обучающихся  $(1 - q_{ji})$ , перешедших на последующий  $j$ -й уровень подготовки. Очевидно, что  $0 \leq q_{ji} \leq 1$  для всех  $i, j = \overline{1, n}$ , при этом  $q_{ij} = 0$  означает, что с  $i$ -го уровня на  $j$ -й индивиды не переходят. Например, очевидно, что должен быть запрещен переход с уровня назначения на преподавательские или научные должности на уровни подготовки НПК первого, второго или третьего годов обучения.

В дальнейшем, как уже указывалось выше, в интересах допустимого упрощения модели будем считать, что коэффициенты пропорциональности  $q_{ji}$  переходов с уровня на уровень остаются постоянными во времени в течение установленного периода адекватного отражения моделью реальной действительности (стационарность) и не зависят от состояния всей системы подготовки НПК (линейность). В каждом конкретном случае, конечно, гипотезу о стационарности и линейности следует проверять или считать такое упрощение модели возможным.

Число индивидов  $x_j(t+1)$  на  $j$ -м уровне подготовки к началу  $(t+1)$ -го периода определяется числом индивидов  $q_{ij}x_j(t)$ , которые остались в нем в течение  $t$ -го периода, и числом индивидов  $q_{ij}x_i(t)$ , перешедших в него в  $t$ -м периоде из всех связанных с ним уровней ( $i=1, n$ ) подготовки НПК, а также числом индивидов  $r_j(t)$ , поступивших (назначенных) на этот уровень в течение  $t$ -го периода из внешних для системы подготовки НПК вуза источников. Например, для первого уровня подготовки адъюнктов внешним источником является система набора в адъюнктуру по данному направлению и (или) направленности подготовки (научной специальности). Внешних источников для второго и третьего уровней, как правило, нет, т. е. назначения  $r_i(t)=0$  ( $j=2,3$ ). Однако могут быть исключения при переходе с одной направленности подготовки на другую. Все эти особенности отражаются в матрице  $Q=[q_{ij}]$  пропорций перемещения с уровня на уровень и матрице-столбце  $r(t)$  внешних назначений  $r_j(t)$ :

$$X_j(t+1) = q_{jj}x_j(t) + \sum_{i=1, j \neq i}^n q_{ij}x_i(t) + r_j(t), j=1, n. \quad (2)$$

Систему разностных уравнений (2) удобно записать в матричной форме:

$$X(t+1) = QX(t) + r(t), t=1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

где  $X(t)$  – состояние системы подготовки НПК по уровням к началу  $t$ -го периода,  $X(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t)\}^T$ ;

$r(t)$  – матрица назначений из внешнего источника на  $j$ -й уровень в  $t$ -м периоде [например, для первого уровня  $r_1(t)$  – это количество определенных мест для поступления в адъюнктуру (докторантуру) в  $t$ -м периоде],  $r(t) = \{r_1(t), r_n(t)\}^T$ ;

$Q$  – матрица пропорций перемещения кандидатов по уровням в системе подготовки НПК по рассматриваемому направлению научных исследований [например, определенные по статистическим данным доли кандидатов (адъюнктов, соискателей, докторантов), успешно выполнивших план первого (второго, третьего и т. д.) года обучения и перешедших на следующий уровень подготовки],  $Q=[q_{ij}]$ .

Заметим, что элементы матрицы пропорций перехода с уровня на уровень неотрицательны, т. е. матрица  $Q$  неотрицательна ( $Q \geq 0$ ). Свойство неотрицательности матрицы  $Q$  будет использовано далее при анализе моделей пропорций перемещения кандидатов.

Систему разностных уравнений (2) или (3) будем называть основной моделью пропорций перемещения кадров в системе подготовки НПК. Если известны матрица пропорций перемещения, состояние системы подготовки НПК к началу  $t$ -го периода и назначения из внешнего источника в систему за тот же  $t$ -й период, то, используя выражение (3), можно определить состояние этой системы к началу следующего  $(t+1)$ -го периода. Следует отметить, что, исходя из упомянутых ранее утверждений на первом этапе анализа модели о линейности и стационарности функционирования системы подготовки НПК в вузе, для определения состояния системы к началу какого-то периода нужно располагать информацией, относящейся только к предыдущему периоду.

Будем считать, что принятая ранее политика назначений, вся предыстория системы подготовки НПК до начала  $t$ -го периода находят отражение в ее состоянии  $X(t)$ . Основная модель (3) является простым и удобным средством исследования поведения кадровых систем любого уровня. Пусть начальный момент  $t=0$  системы подготовки НПК находится в состоянии  $X(0)$ . Рассмотрим последовательность состояний системы подготовки НПК в последовательные периоды времени  $t=1, 2, 3, \dots$  и т. д. Из выражения (3) имеем:  $X(1)=QX(0)+r(0)$ ;  $X(2)=Q^2X(0)+Qr(0)+r(1)$ ;  $X(3)=Q(Q^2X(0)+Qr(0)+r(1)+r(2))$  и т. д. Последовательное применение рекуррентного выражения (3) позволяет определить ее состояние в любой другой период времени:

$$X(t) = Q^t X(0) + \sum_{k=0}^{t-1} Q^{t-1-k} r(k), t \in T. \quad (4)$$

Таким образом, если известны начальное состояние и назначения, то по формуле (4) можно однозначно определить состояние системы подготовки НПК в любой момент  $t \in [0, T]$ . Матрицу  $\Phi(t, 0) = Q^t$  назовем переходной матрицей. Ее второй аргумент означает, что развитие системы начинается с нулевого момента. Используя это обозначение, выражение (4) можно записать в следующем виде:

$$X(t) = \Phi(t, 0)X(0) + \sum_{k=0}^{t-1} \Phi(t, k+1)r(k). \quad (5)$$

Заметим, что формула (5) аналогична формуле Коши для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений [1].

Поставим простейшую задачу управления системой подготовки НПК, воспользовавшись основной моделью пропорций перемещения для управления кадрами этой системы. Пусть задана желаемая последовательность состояний  $X(0), X(1), X(2), \dots, X(T)$  системы подготовки НПК за конечный горизонт планирования развития научного потенциала вуза с длиной  $T$ . Требуется определить назначения, т. е., допустим, набор в адъюнктуру  $r(0), r(1), r(2), \dots, r(T-1)$ , которые обеспечат получение желаемой последовательности состояний системы подготовки НПК. Безусловно, что это только один из механизмов управления этим процессом, хотя и наиболее важный. При исследовании этой задачи в первую очередь возникает вопрос о существовании политики управления процессом подготовки НПК путем назначений. Очевидно, поскольку набор должен быть неотрицательным  $\{r(t) \geq 0\}$ , то политика назначений, обеспечивающая получение заданной последовательности состояний системы подготовки НПК, существует только в том случае, если выполняется система линейных неравенств  $X(t+1) \geq QX(t)$ . При этом квота на поступление кандидатов (т. е. управление системой назначений) определяется однозначно:  $r(t) = X(t+1) - QX(t)$ ,  $t = \overline{1, (T-1)}$ .

Далее рассмотрим модели систем подготовки НПК, общее число мест в которых сохраняется неизменным во времени, т. е.  $\hat{N}(t+1) = \hat{N}(t)$ ,  $\Delta \hat{N}(t) = 0$ ,  $t \in [0, T]$ . Такие системы можно назвать системами постоянного размера [3]. В отношении систем подготовки НПК это утверждение может быть справедливо в случае неизменности устоявшихся направлений и направленностей подготовки НПК в вузе. В целом этот случай носит идеализированный характер, так как возможно изменение направления или направленности подготовки НПК. Кроме того, реально существует «текучесть» кадров, а она также определяет необходимость появления вакантных должностей в системе подготовки НПК. Эти случаи будут рассмотрены ниже. Если в системе постоянного размера не допускается наличие вакантных должностей, то общее число индивидов в системе равно общему числу мест на всех уровнях, т. е.  $X(t) = N(t)$ , и сохраняется также постоянным во времени, т. е.  $X(t+1) = N(t)$ .

Основное внимание в рассматриваемой модели далее будем уделять проблеме управления системой подготовки НПК на базе основной модели пропорции перемещения. В качестве управляющих воздействий приняты поступления (назначения) в систему из внешнего источника, которым управляется состояние системы подготовки НПК в вузе. Для организационных систем постоянного размера это управление сводится к изменению распределения индивидов в системе, т. е. к увеличению или уменьшению числа индивидов в некоторых или во всех уровнях подготовки НПК при сохранении общего числа НПК в вузе. Подобная ситуация часто возникает на практике в связи с постановкой новых задач перед организационной системой в условиях наличия ресурсных ограничений.

## МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ КАДРОВ В ВУЗЕ С УЧЕТОМ ПОЛИТИКИ НАЗНАЧЕНИЙ

Важнейшим механизмом управления системой подготовки НПК является управление назначениями, в первую очередь приемом в адъюнктуру и военную докторантуру вуза, а именно: управление качеством отбора кандидатов и определением их численности по направлениям и направленностям подготовки с учетом потребностей вуза в специалистах в обеспечении образовательного процесса, проведения научных исследований и в целом поддержания научного потенциала вуза. Примем условие, что поступления в систему подготовки НПК соответствуют основной модели пропорций перемещений кандидатов (3). Представим их описание в терминах некоторого линейного преобразования от наблюдаемых состояний системы  $X(t)$  на всех уровнях:

$$r(t) = BX(t), r(t) \geq 0. \quad (6)$$

Таким образом, кадровая система будет замкнута обратной связью, что отражено на рис. 1.

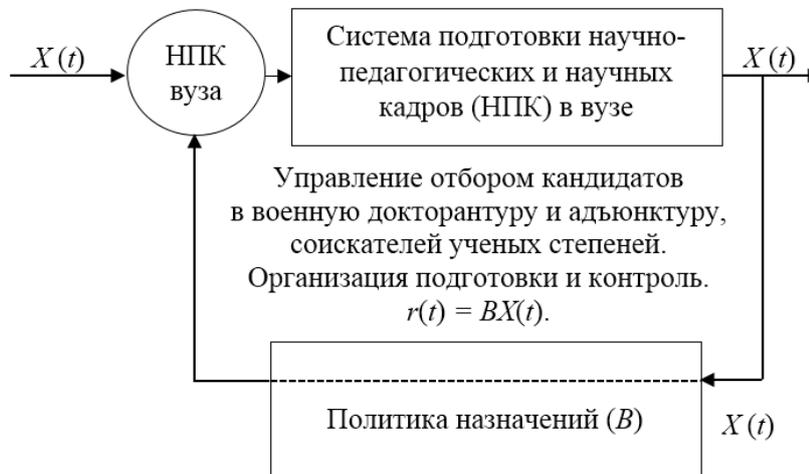


Рис. 1. Управление системой подготовки НПК в вузе с обратной связью

По наблюдаемому (измеренному) состоянию  $X(t)$  системы подготовки НПК к началу временного периода на основе принятой политики формирования НПК (6) формируется решение о назначениях, которое осуществляется к концу того же периода. Результаты решения наблюдаются в изменении состояния системы подготовки к началу следующего периода. Далее схема повторяется по замкнутому контуру от периода к периоду. Выбирая различные политики назначений, можно достичь разных целей управления, т. е. добиться разных распределений состава кандидатов по уровням подготовки. Изложенная схема управления с обратной связью является, конечно, достаточно общей и относится не только к моделям организаций постоянного размера.

Представив теперь выражение (6) в форме выражения (3), получим

$$X(t+1) = (Q + B)X(t). \quad (7)$$

Введем обозначение  $P = Q + B$ . Тогда в матричной форме выражение (7) можно переписать так:

$$X(t+1) = PX(t). \quad (8)$$

Напомним, что в данном разделе статьи основное внимание будет уделено моделям систем подготовки НПК постоянного размера, в которых  $\hat{N}(t) = \hat{N}(t+1)$ , где  $\hat{N}(t)$  – размер системы в момент времени  $t$  (общее число мест по уровням подготовки).

Вначале предположим, что в системе подготовки НПК не допускается наличие вакантных мест (должностей) на всех уровнях подготовки кандидатов, включая в том числе и последние

уровни – результаты распределения кандидатов по должностям на кафедрах и в научных подразделениях в данный период времени  $t$ , т. е.  $X(t) = \hat{N}(t)$  (в этом случае в рассматриваемой модели общее число индивидов в системе равно общему числу в ней вакантных должностей), тогда

$$X(t+1) = X(t). \tag{9}$$

Суммируя уравнения системы (8) и учитывая выражение (9), получим

$$X(t+1) = \sum_{i=1}^n x_i(t+1) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} x_j(t) = \sum_{j=1}^n x_j(t) \sum_{i=1}^n P_{ij}.$$

Очевидно, что для сохранения размера численного состава кандидатов системы подготовки НПК, т. е. выполнения условия (9), необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие  $\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1$ . Отсюда можно получить и ограничения на выбор матрицы  $B$ , т. е. выбор линейных законов управления системой подготовки НПК: *во-первых*, матрица  $B$  должна гарантировать неотрицательность  $r(t)$  при неотрицательных состояниях уровней  $X(t) \geq 0$ , *во-вторых*, при заданной матрице  $Q$  элементы  $b_{ij}$  матрицы  $B$  должны удовлетворять условию

$$\sum_{i=1}^n b_{ij} = 1 - \sum_{i=1}^n q_{ij}, \quad j = \overline{1, n}. \tag{10}$$

Пусть теперь рассматриваемая организационная система подготовки НПК сохраняет постоянный размер, т. е.  $N(t) = \text{const}$ , но вместе с тем допускает наличие вакантных должностей на отдельных уровнях подготовки кандидатов, т. е.  $X(t) = \hat{N}(t)$ .

Обозначим  $x_{n+1}(t)$  число вакантных должностей в системе подготовки НПК к началу  $t$ -го периода и расширим пространство состояний системы. Состояние системы опишем вектором  $X(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t), x_{n+1}(t)\}^T$ , где, как и ранее,  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  – число индивидов на  $i$ -м уровне к началу  $t$ -го периода.

Обозначим  $r_{n+1}(t)$  число вакантных должностей, не заполненных в течение  $t$ -го периода, а  $\tilde{r}(t) = \{r_1(t), \dots, r_n(t), r_{n+1}(t)\}^T$  – расширенный вектор поступления кандидатов в систему, где, как обычно,  $r_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  – число поступлений в  $i$ -й уровень системы подготовки НПК в течение  $t$ -го периода (они отнесены к концу периода). В расширенном пространстве состояний системы подготовки НПК основная модель пропорций перемещения кандидатов между уровнями матричной формы (3) может быть записана так:

$$\tilde{X}(t+1) = \tilde{Q}\tilde{X}(t) + \tilde{r}(t), \quad X(t) \geq 0, \dots, \tilde{r}(t) \geq 0, \dots, t \in [0, T]. \tag{11}$$

Если назначения формируются опять как линейное преобразование от измеряемого расширенного состояния, т. е.  $\tilde{r}(t) = \tilde{B}X(t)$ , то уравнение для состояний в расширенном пространстве приобретает вид, аналогичный выражению (8):

$$\tilde{X}(t+1) = \tilde{P}\tilde{X}(t), \tag{12}$$

где  $\tilde{P} = \tilde{Q} + \tilde{B}$ .

Складывая уравнения системы (12) и учитывая, что  $\sum_{i=1}^{n+1} x_i(t) = \hat{N}(t)$ , аналогично получаем

$$\hat{N}(t+1) = \sum_{i=1}^{n+1} x_i(t+1) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} \tilde{P}_{ij} x_j(t) = \sum_{i=1}^{n+1} x_i(t) \sum_{j=1}^{n+1} \tilde{P}_{ij}.$$

Условие  $\sum_{i=1}^{n+1} \tilde{P}_{ij} = 1$  опять является необходимым и достаточным для того, чтобы система

сохранила постоянный размер. Ясно, что если  $\sum_{j=1}^{n+1} \tilde{P}_{ij} = 1$ , то  $\hat{N}(t+1) = \hat{N}(t)$ . И в этом случае

выбор законов управления системой подготовки НКВК ограничивается двумя обстоятельствами: *во-первых*, матрица  $\tilde{B}$  должна обеспечивать не отрицательность  $r_i(t)$  при неотрицательных состояниях  $x_i(t) \geq 0$  и, *во-вторых*, при заданной матрице  $\tilde{Q}$  элементы матрицы  $\tilde{B}$  должны удовлетворять следующим условиям:

$$\sum_{i=1}^{n+1} \tilde{b}_{ij} = 1 - \sum_{i=1}^{n+1} \tilde{q}_{ij}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (13)$$

### МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ КАДРОВ С УЧЕТОМ ОТТОКА КАНДИДАТОВ И НАЛИЧИЯ ВАКАНТНЫХ МЕСТ

Рассмотрим отдельное научное направление подготовки НПК. Будем также считать, что в данном направлении научной и образовательной деятельности вуза институционально определен состав научных сотрудников и сотрудников из числа профессорско-преподавательского состава. В этом отношении в данном направлении подготовки НПК предписанный состав научных сотрудников в течение определенного периода времени (связанного, например, с динамикой смены научных задач, направлений подготовки слушателей и т.п.) остается неизменным.

Будем полагать, что распределение индивидов, поступивших в систему подготовки НПК  $r_i(t)$  из внешнего источника на  $i$ -й уровень (например, из систем отбора адъюнктов и докторантов или в результате профессионального отбора специалистов из внешних источников), пропорционально числу ( $x_{n+1}(t)$ ) вакантных мест этого направления подготовки с коэффициентом пропорциональности  $\alpha_i$ :

$$r_i(t) = \alpha_i x_{n+1}(t). \quad (14)$$

Следует заметить, что для отдельных уровней подготовки НПК коэффициент пропорциональности  $\alpha_i = 0$ , так как  $q_{ij} = 0, \forall j=1, n; j \neq i$ , т. е. переход на этот уровень запрещен (например, распределение кандидатов на уровни второго или третьего года обучения адъюнктов и т. п.). Предположим, что число вакантных должностей, которые остаются в системе подготовки НПК к концу  $t$ -го периода, также пропорционально числу свободных мест, имеющих в системе к началу того же  $t$ -го периода, т. е.

$$r_{n+1}(t) = \alpha_{n+1} x_{n+1}(t) \quad (15)$$

Все коэффициенты пропорциональности  $\alpha_i, i = \overline{1, n+1}$ , будем считать неотрицательными, постоянными во времени (в течение определенного периода формирования научного направления, научного потенциала вуза и т. д.) и не зависящими от состояний уровней подготовки НПК. Пересмотр этих коэффициентов может также являться следствием институциональных изменений в системе управления подготовкой НПК.

Таким образом, на основе изменения (воздействия на них) коэффициентов пропорциональности (14) и (15) может быть построена политика управления системой подготовки НПК с обратной связью по расширенному ее состоянию  $\tilde{r}(t) = \tilde{\beta} \tilde{X}(t)$ , где для рассматриваемого случая матрица  $\tilde{\beta}$  есть матрица пропорций назначений кандидатов:

$$\tilde{\beta} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \alpha_1 \\ 0 & \dots & 0 & \alpha_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \alpha_n \\ 0 & \dots & 0 & \alpha_{n+1} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Запишем основную модель пропорций перемещения и назначений в расширенном пространстве состояний (11) с учетом (15):

$$x_j(t+1) = \sum_{i=1}^n \tilde{q}_{ij} x_i(t) + r_j(t), j = \overline{1, n};$$

$$x_{n+1}(t+1) = \sum_{i=1}^n \gamma_i x_i(t) + r_{n+1}(t), \tag{17}$$

или (в матричной форме)  $\tilde{X}(t+1) = \tilde{Q}\tilde{X}(t) + r(t)$ .

Вместе с тем неизбежен отток кандидатов из рассматриваемой организационной системы по различным причинам. Такая динамика определяет появление в системе подготовки вакантных должностей. Пусть число индивидов ( $\omega_i(t)$ ), покинувших систему подготовки НПК в течение  $t$ -го периода с  $i$ -го уровня, пропорционально числу индивидов ( $x_i(t)$ ), находящихся на  $i$ -м уровне к началу того же периода:

$$\omega_i(t) = \gamma_i x_i(t), i = \overline{1, n}, \gamma_i \leq 1. \tag{18}$$

Предположим, что пропорции уходов  $\gamma_i$  неотрицательны, постоянны во времени и не зависят от состояний отдельных уровней  $x_i(t)$ . Очевидно, что указанные предположения весьма строги и их необходимо проверять при каждом применении модели для описания конкретной системы подготовки НПК вузе. Тогда число вакантных должностей  $x_{n+1}(t)$ , которое будет иметься в системе к началу  $(t+1)$ -го периода, образуется из числа вакантных мест  $r_{n+1}(t)$  в системе в момент  $t$ , не заполненных до конца  $t$ -го периода, и числа индивидов, покинувших систему в  $t$ -м периоде, т. е.

$$x_{n+1}(t) = r_{n+1}(t) + \sum_{i=1}^n \omega_i(t) = r_{n+1}(t) + \sum_{i=1}^n \gamma_i x_i(t). \tag{19}$$

В целом пропорции уходов индивидов из системы в матрице перемещения их по уровням оказывают влияние только на ее диагональные элементы  $q_{ii}$ , уменьшая число индивидов на этом уровне, оставшихся на нем, т. е.  $\hat{q}_{ii} = q_{ii} \hat{\gamma}_i$ , где  $\hat{\gamma}_i = 1 - \gamma_i$ . Здесь  $\gamma_i$  – относительное число уходов кандидатов с  $i$ -го уровня подготовки. Тогда матрица перемещений кандидатов по уровням подготовки с учетом возможных их уходов с этого уровня в матричной форме может быть записана следующим образом:

$$\hat{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} & \alpha_1 \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} & \alpha_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n1} & q_{n2} & q_{nn} & \alpha_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\gamma}_1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{\gamma}_{22} & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \hat{\gamma}_{nn} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11}\hat{\gamma}_1 & q_{12} & \dots & q_{1n} & \alpha_1 \\ q_{21} & q_{22}\hat{\gamma}_{22} & \dots & q_{2n} & \alpha_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n1} & q_{n2} & q_{nn}\hat{\gamma}_{nn} & \alpha_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Введем обозначение  $\hat{q}_{ii} = q_{ii} \hat{\gamma}_i$ . Так как  $\tilde{r}(t) = \tilde{B} \hat{X}(t)$ , то модель (11) трансформируется в выражение  $\tilde{X}(t+1) = \tilde{P}\tilde{X}(t)$ , где матрица  $\tilde{P} = \tilde{Q} + \tilde{B}$ . Если ввести векторы  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)^T$  и  $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$ , то матрицу  $\tilde{P}$  можно записать так:

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} Q & \alpha \\ \gamma & \alpha_{n+1} \end{bmatrix}. \tag{20}$$

Каждый элемент матрицы  $\tilde{P}$  неотрицателен, т. е.  $\tilde{P}_{ij} \geq 0$ . Более того, поскольку рассматривается система подготовки постоянного размера, то справедливо равенство

$$N(t+1) = \sum_{j=1}^{n+1} x_j(t) \sum_{i=1}^{n+1} \tilde{P}_{ij} = N(t).$$

Очевидно, что выполнение условия  $\sum_{j=1}^{n+1} \tilde{P}_{ij} = 1$  необходимо и достаточно для сохранения постоянства общей численности организационной системы подготовки НПК. Аналогично, как и в предыдущем случае, выполнение данного условия неизбежно влечет за собой обязательное выполнение следующих равенств:

$$\sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n \hat{q}_{ij} + \hat{\gamma}_j, \quad j=1, n. \quad (21)$$

Таким образом,  $\tilde{P}_{ij} \geq 0$  и  $\sum_{i=1}^{n+1} \tilde{P}_{ij} = 1$ , следовательно,  $\tilde{P}$  – стохастическая матрица [2]. Тогда из выражения (19) можно определить состояние системы подготовки НПК в любой момент времени  $t$ :

$$\tilde{X}(t) = \tilde{P}^t \tilde{X}(0). \quad (22)$$

Если разделить обе стороны последнего уравнения на общее число мест в системе подготовки  $\hat{N}(t) = \text{const} = \hat{N}$ , то (22) примет вид:

$$\hat{X}(t) = \tilde{P}^t X(0). \quad (23)$$

Здесь  $\hat{X}(t)$  – относительное распределение индивидов по уровням системы подготовки НПК в вузе,  $\hat{X}(t) = \tilde{X}(t)/N$ , где  $\hat{x}(t) \geq 0$  и  $t \geq 0$ .

Известно, что если стохастическая матрица  $\tilde{P}$  правильная, т. е. среди собственных чисел  $\tilde{P}$  нет отличных от единицы и одновременно равных по модулю единице, то существует предел  $\tilde{P}^t \rightarrow \tilde{P}^\infty$  при  $t \rightarrow \infty$  и, следовательно, существует предельный вектор  $\hat{X}(t)$  [2], т. е.

$$\lim_t \hat{X}(t) = \tilde{P}^\infty \hat{X}(0) = \hat{X}_{\text{пред}}. \quad (24)$$

Этот предельный вектор неотрицателен, сумма его компонент равна единице, он удовлетворяет уравнению [2, 4]

$$\tilde{P} \hat{X}_c = \hat{X}_{\text{пред}}, \quad (25)$$

где  $\hat{X}_c$  – собственный вектор матрицы  $\tilde{P}$ .

Тогда, если матрица  $\tilde{P}$  регулярна, т. е. правильна, и ее собственное число является простым, то предельный вектор  $\hat{X}_{\text{пред}}$  не зависит от начального вектора  $\hat{X}(0)$  и может быть однозначно определен из (25) с учетом условия  $\sum_{i=1}^{n+1} \hat{x}_i = 1$ .

Условия регулярности матрицы  $\tilde{P}$  обычно выполняются на практике в задачах управления распределением специалистов в организационных системах управления. Таким образом, после относительно небольшого числа периодов в системе подготовки НПК устанавливается стационарное распределение индивидов  $\hat{X}(t) \approx \hat{X}$ , не зависящее от начального распределения  $\hat{X}(0)$ , т. е. в установившемся состоянии число индивидов на всех уровнях подготовки НПК останется неизменным и не зависит от начальной численности кандидатов в систему подготовки НПК. Это – естественное свойство затухания переходных процессов для организационных систем самой различной природы [3, 5]. Однако оно получено в рамках предположений о постоянстве численного состава научных сотрудников и сотрудников высшей научной квалификации в системе обеспечения конкретного направления научной деятельности в вузе и неизменной матрицы пропорций  $\tilde{P}$  их перемещения по уровням подготовки.

Следует заметить, что из  $n+1$  уравнений системы (19) только  $n$  уравнений линейно независимы. Если к любым  $n$  уравнениям этой системы добавить уравнение,  $\sum_{i=1}^{n+1} \hat{x}_i = 1$ , то из полученной системы можно однозначно определить вектор  $\hat{X}$ . Исходя из (25), в установившемся режиме  $\hat{X} = \tilde{P} \hat{X}$  или  $\hat{X} (E - \tilde{P}) = 0$ , где  $E$  – единичная матрица.

Например, возьмем первые  $n$  уравнений. Тогда установившееся распределение индивидов по уровням подготовки  $\hat{X}$  будут определяться из следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1-\hat{q}_{11} & -q_{12} \dots & -q_{1n} & -\alpha_1 \\ -q_{21} & 1-\hat{q}_{22} \dots & -q_{2n} & -\alpha_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n1} & -q_{n2} & 1-\hat{q}_{nn} & -\alpha_n \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \\ \dots \\ \hat{X}_n \\ \hat{X}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{26}$$

Если стационарный режим для  $\hat{X}$  определен и известно общее число вакантных должностей  $N$  в системе подготовки НПК, то можно подсчитать установившееся число индивидов на всех уровнях (т. е.  $x_i$   $i = \overline{1, n}$ ) и установившееся число вакантных должностей  $x_{n+1}$  по формуле

$$x_i = \hat{x}_i \cdot N, i = \overline{1, n}. \tag{27}$$

Очевидно, что установившиеся состояния уровней подготовки зависят как от пропорций перемещений  $q_{ij}$  и уходов  $\gamma_i$ , так и от принятой политики распределений вакантных должностей  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1})^T$ . Изменением коэффициентов  $\alpha_i$  можно добиться желаемого установившегося состояния системы. Для иллюстрации вышеизложенного рассмотрим пример из реальной структуры.

Рассмотрим систему подготовки НПК в вузе, состоящую из двух уровней.

*Первый уровень* – адъюнктура по данному научному направлению и направленности подготовки.

*Второй уровень* – преподавательский состав на кафедрах (научный состав – в научных подразделениях). Предположим, что общее число индивидов в системе подготовки НПК остается неизменным и в системе сохраняется некоторое количество вакантных должностей. Пусть в систему можно поступить только на первый уровень через систему набора в адъюнктуру, т. е.  $\alpha = (\alpha_1, 0, \alpha_3)^T$ , а переходы со второго уровня на первый не происходят, т. е.  $q_{21}=0$ . Будем также полагать, что наблюдается отток кандидатов с уровней подготовки в

пропорциях  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . При этих двух предположениях  $\tilde{P} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & \alpha_1 \\ q_{12} & q_{22} & 0 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix}$ .

Предположим также, что  $\tilde{P}$  удовлетворяет условиям регулярности стохастических матриц. Тогда установившееся распределение индивидов не зависит от их начального распределения по уровням. Его можно определить из системы линейных уравнений (27), которая для конкретной рассматриваемой структуры матрицы  $\tilde{P}$  приобретает вид

$$\begin{bmatrix} 1-\hat{q}_{11} & 0 & -\alpha_1 \\ q_{21} & 1-\hat{q}_{22} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Решив эту систему линейных уравнений, получим:

$$x_1 = \frac{\alpha_1(1-\hat{q}_{22})}{\Delta}; x_2 = \frac{\alpha_1}{\Delta} \hat{q}_{21}; x_3 = \frac{(1-\hat{q}_{22})(1-\hat{q}_{11})}{\Delta},$$

где  $\Delta = \alpha_1 (1+ q_{21} - q_{22}) (1 - \hat{q}_{11})(1 - \hat{q}_{22})$ .

Полученные значения позволяют выявить зависимости установившегося распределения индивидов от изменения пропорций переходов с первого уровня на второй уровень при фиксированных уходах и пропорциях назначений и числа вакантных должностей в системе подготовки научно-педагогических и научных кадров вуза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье последовательно рассмотрен характер взаимовлияния основных механизмов управления системой подготовки научно-педагогических и научных кадров в вузе. В их числе в первую очередь рассматриваются механизмы управления назначениями, предусматривающие решение таких основных задач, как управление качеством отбора кандидатов и определение их численности по направлениям и направленностям подготовки с учетом потребностей вуза в кадрах высшей научной квалификации для обеспечения эффективного функционирования образовательного процесса, проведения научных исследований и в целом поддержания научного потенциала вуза. Реализация этого механизма в вузе осуществляется в рамках проводимой вузом политики назначений. В целом оценка ее влияния на систему подготовки НПК в статье осуществляется на основе применения моделей линейных преобразований, представленных в виде последовательности отдельных уровней подготовки кандидатов в адъюнктуру и докторантуру с последующим переходом на уровни научно-преподавательской деятельности на кафедрах или в научных подразделениях вуза с возможной дальнейшей конкретизацией продвижения кадров высшей научной квалификации по служебной лестнице внутри этих подразделений. В рамках такого подхода рассмотрено влияние на итоговое состояние системы подготовки НПК моделей изменения пропорций перемещений кандидатов по уровням и динамики изменения состава и структуры вакантных должностей в системе. В целом, несмотря на определенные допущения, рассмотренные модели позволяют определить общие тенденции изменения состояния системы в зависимости от изменений указанных факторов и на основе их анализа принять обоснованное решение по управлению подготовкой НПК в вузе.

## Список используемых источников

1. Матвеев Н.М. Дифференциальные уравнения. – 3-е изд., доп. – Минск: Высш. шк., 1968. – 348 с.
2. Беллман Р. Введение в теорию матриц / пер. с англ.; под ред. В.В. Лидского. – 2-е изд. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
3. Артюхов В.Г., Куличков Е.Н., Скубрий Е.В. Инновационные аспекты управления кадрами и математическое моделирование кадровых систем предприятий России. – М.: ФГУП ЦНИИ «ЦЕНТР», 2009. – 248 с.
4. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений: учеб. пособие. – М.: Изд-во «Проспект», 2014. – 176 с.
5. Экономико-математические методы и прикладные модели: учеб. пособие для вузов / В.В. Федосеев, А.Н. Гармаш, Д.М. Дайитбегов и др.; под ред. В.В. Федосеева. – М.: ЮНИТИ, 1999. – 391 с.
6. Левин В.И. Математическое моделирование процессов подготовки научно-педагогических кадров // Вестн. ТГУ. – 2013. – Т. 18, вып. 5. – С. 2950–2953.
7. Московкин В.М., Биаль Н.Е., Сулейман Н.М. Математическое моделирование спроса и предложения на рынке образовательных услуг // Физико-математические науки. – 2011. – №1. – С. 34–41.
8. Буланичев В.А., Серков Л.А. Модельный подход к функционированию вузов как самоорганизующихся систем // Информационные технологии. – 2006. – № 3. – С. 68–73.

А.А. Баранов,

*кандидат педагогических наук*

Университет Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург;

Г.Б. Свидзинская,

*кандидат химических наук, доцент*

Университет Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург;

В.К. Шифф,

*кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

## **ФОРМИРОВАНИЕ ОБРАЗА ПРОФЕССИИ У БУДУЩИХ ОФИЦЕРОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МЧС РОССИИ**

Методом семантического дифференциала изучено влияние условий учебно-профессиональной деятельности на формирование отношения к профессии пожарного курсантов и слушателей Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. Проведен сравнительный анализ представлений о будущей профессии курсантов 1, 3 и 5-го курсов и слушателей заочного факультета университета. Обработка результатов осуществлена методом факторного анализа. Выявлена динамика ценностных ориентаций в процессе обучения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что целостное представление о профессии и дифференцированное восприятие ее особенностей обеспечиваются путем последовательного становления профессионального самосознания курсантов на всех этапах обучения и во многом связано с эмоциональным восприятием условий обучения в вузах ГПС МЧС России.

Ключевые слова: будущие специалисты МЧС России, этапы профессионального становления, образ профессии, курсанты, военное образование, метод семантического дифференциала.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Проблемы обеспечения национальной безопасности и стабильности государства в условиях происходящих изменений военно-политической обстановки в мире и реализации прорывных национальных проектов внутри страны требуют повышения качества профессионального образования. Главными задачами вузов, готовящих специалистов для Вооруженных Сил Российской Федерации, органов МВД и МЧС, являются выведение образования на инновационно новый и качественный уровень, подготовка профессионалов, стремящихся к самореализации в выбранной профессии, обладающих знаниями, которые обеспечат успешное выполнение поставленных задач в экстремальных условиях боевой обстановки или чрезвычайных ситуаций с использованием новых систем вооружения и спасения людей. Инновационность, т.е. способность предоставлять образовательные услуги на основе самых современных разработок и технологий, является для военного образовательного учреждения залогом его конкурентоспособности, а соединение военного образования и военной науки должно обеспечить его устойчивое развитие за счет выявления будущих факторов успеха и создания интеллектуального продукта.

Современная педагогическая парадигма обеспечения качества высшего образования включает в себе переход от пассивного формирования совокупности знаний, навыков и умений профессиональной деятельности к компетентностному подходу, развитию ситуационного мышления обучающихся, от курсанта как объекта обучения, к курсанту как субъекту данной системы, его профессиональному личностному развитию в вузе. Именно человеческий фактор рассматривается сегодня как ключевой ресурс, когда расходы на подготовку кадров являются не издержками, а долгосрочными инвестициями в развитие страны [1, 2].

За последнее десятилетие в Российской Федерации активно велась модернизация практически всех видов вооружений, обновлялись технические средства спасения, внедрялись новые технологии, резко вырос престиж военного образования. В настоящее время будущие офицеры наряду с интенсивной физической подготовкой получают в высших учебных заведениях серьезное инженерное образование, позволяющее эффективно разрабатывать и использовать новые системы и оборудование. Однако исследования, проведенные в вузах силовых структур, выявили ряд противоречий, влияющих на процесс обеспечения качества подготовки и формирования специалиста-профессионала. Основными проблемами, с которыми сталкиваются обучающиеся, являются следующие: противоречия между теоретическими и практическими положениями обеспечения качества профессиональной подготовки; между сложностью учебного материала в вузе и уровнем знаний абитуриентов; между уровнем мотивации к изучению дисциплин и пониманием их роли в процессе формирования специалиста военного профиля, спасателя или пожарного; между групповой формой организации обучения и важностью индивидуального подхода к развитию личности офицера. В результате авторы проведенных исследований отмечают снижение интереса к учебе и будущей практической деятельности и недостаточную эффективность формирования и развития мотивации обучающихся к предстоящей службе. Так, у выпускников вузов силовых структур стремление к учебе связано зачастую с осознанием значимости получения высшего образования как такового и является инструментом для реализации личных целей, а не будущей профессиональной деятельности [1,3]. Досрочный переход молодых специалистов на гражданскую службу – это не только потеря квалифицированных военных кадров, но и серьезные финансовые потери для государства, которое затрачивает значительные суммы на подготовку офицерского состава. Задачей педагогов, обучающихся и воспитывающих будущих офицеров, является формирование у молодых людей любви к своей будущей профессии, обоснование важности сделанного выбора, стремления стать высококлассным специалистом. В этой связи особую значимость приобретает изучение динамики мотивационно-смыслового отношения курсантов к выбранной профессии с момента поступления в высшее учебное заведение до его окончания.

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫБОР ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Задачей настоящего исследования была разработка эффективного метода мониторинга формирования профессионального самосознания в процессе обучения в вузе с целью повышения качества образования.

В качестве объекта исследования были выбраны курсанты Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, обучающиеся по очной и заочной формам по специальностям «Пожарная безопасность» и «Судебная экспертиза». В исследовании участвовало 302 человека, проходящих обучение на первом, третьем и пятом курсах. Из них 20% составляли девушки и 80% – молодые люди (табл. 1). Выбор данных респондентов для исследования объяснялся тем, что именно эти две специальности наряду с направлением подготовки «Техносферная безопасность» являлись основными при обучении специалистов пожарного профиля в университете.

Процесс формирования профессионала охватывает длительный период обучения и практической деятельности индивида, однако его эффективность зависит от мотивации к освоению профессии. Именно во время нахождения в высшем учебном заведении у молодого человека формируются мотивы, способствующие профессиональному становлению личности, осуществляется постепенный переход от учебно-познавательной к учебно-профессиональной деятельности, к осознанию роли и места офицера, сотрудника МЧС в системе обеспечения безопасности страны. То, насколько успешно формируется в этот период профессиональное самосознание, развиваются профессионально важные личностные качества и способности,

определяет в конечном итоге успех и результат профессиональной деятельности будущего офицера [4, 5].

*Таблица 1*

**Распределение респондентов по специальностям, форме обучения и гендерному признаку (количество обучающихся)**

Курс	Специальность					
	Пожарная безопасность				Судебная экспертиза	
	Форма обучения – очная		Форма обучения – заочная		Форма обучения – очная	
	Молодые люди	Девушки	Молодые люди	Девушки	Молодые люди	Девушки
1	57	4	–	–	27	4
3	51	13	50	1	4	14
5	42	8	–	–	10	17

Отмечается, что процесс воспитания ценностного отношения к будущей профессии включает три уровня:

- процесс получения знаний, связанный с внешними факторами, социальными или личностными мотивами (привычкой учиться, финансовой или карьерной заинтересованностью);
- формирование внутренней «опредмеченной потребности» (обучающийся осознает связь получаемых знаний с будущей профессиональной деятельностью);
- сформированность внутреннего ценностного отношения (обучающийся ощущает потребность в профессиональной самореализации, совершенствовании личного мастерства) [4].

Поскольку профессия всегда персонифицирована, а профессионализм является формой личностного самовыражения, процесс обучения и воспитания ценностного отношения к будущей профессии должен учитывать индивидуальные особенности обучающихся. Важно отслеживать эмоциональное состояние курсантов, связанное как с изменением условий жизни молодого человека при поступлении в военный вуз, где специфической особенностью обучения является интегрированный характер деятельности, совмещающий в себе учебную, служебно-боевую и хозяйственную деятельность наряду с жесткими требованиями дисциплины, так и с престижем выбранной профессии, ее востребованностью на рынке труда, ситуацией в стране. Все эти факторы оказывают на молодых людей существенное влияние и меняют мотивацию к овладению выбранной профессией, а значит, и к процессу получения новых знаний.

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Серьезные исследования, посвященные формированию профессионального самосознания и влиянию условий учебно-профессиональной среды на формирование представлений о профессии будущих специалистов ГПС МЧС России, уже несколько лет ведутся в Уральском институте ГПС МЧС России. О.Ю. Демченко и Ю.С. Газизова в своих работах показали, что представления о профессии пожарного у первокурсников сформированы на уровне внешнего житейски романтического восприятия и сконцентрированы на таких характеристиках этого образа, как героизм, уважение окружающих, работа с современной пожарно-спасательной техникой, форма одежды. Формирование профессиональной идентичности начинается со второго курса и достигает своего максимума к четвертому курсу. На третьем курсе у обучающихся формируется интерес к профессионально-личностным качествам офицера-пожарного и профессиональному саморазвитию, а четверокурсники демонстрируют

положительное отношение к будущей профессии и осознают значимость профессионального мастерства [5, 6].

Исследования, проведенные в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России методом семантического дифференциала с помощью графической обработки данных, зафиксировали более сложные зависимости, связанные как с объективными, так и с субъективными факторами, возникающими в ходе обучения. Было показано, что психосемантические методы, в частности метод семантического дифференциала, позволяют контролировать динамику изменения эмоционального состояния обучающихся [7, 8, 9].

Указанный метод, предложенный в 1957 году Ч.Е. Осгудом, дает возможность выявить личностное отношение респондента к объекту или явлению за счет большого количества переменных, описывающих предмет. Испытуемому предлагается заполнить бланк, содержащий набор антонимов, и оценить степень соответствия исследуемого объекта тому или иному полюсу шкалы. Метод рекомендован для исследования в различных сферах деятельности, связанных с восприятием и поведением человека. Он построен таким образом, что респондент не может представить конечный результат опроса, что особенно актуально при анкетировании в силовых структурах, где субординация зачастую препятствует получению объективной картины в ходе исследования. В образовательных учреждениях системы МЧС метод семантического дифференциала в последние годы применяется для оценки отношения к риску, изучаемым предметам, формированию самосознания курсантов и отношению к выбранной профессии в период нахождения в вузе [8].

Достоинством рассматриваемого метода является возможность не только качественной, но и количественной оценки эмоционального отношения респондента к объекту. Данные, полученные в результате анкетирования, обрабатываются графически или методами математической статистики. Как правило, для обработки результатов психосемантических исследований применяется метод факторного анализа, который интегрирует в себе качественный и структурно-количественный анализ предмета исследования и позволяет выявить внутренние, скрытые, не наблюдаемые непосредственно характеристики объекта.

Факторный анализ основан на предположении, что при согласованном изменении нескольких признаков, измеренных на группе индивидов, существует одна общая причина этой совместной изменчивости, названная фактором. Данный метод позволяет перейти от большого числа исходных переменных к существенно меньшему количеству новых переменных – факторов. При этом фактор интерпретируется как скрытая причина совместной изменчивости исходных переменных. Проведение факторного анализа с целью определения влияния факторов, сравнения их структуры для разных выборок обучаемых и оценки эффективности действия переменных, обуславливающих различия (или идентичность) структуры факторов в этих выборках, рекомендуется в сравнительном педагогическом эксперименте [10].

Для оценки отношения курсантов к выбранной профессии и динамики изменения этого отношения в период обучения авторами был разработан бланк семантического дифференциала, содержащий 23 пары антонимов, которые, будучи непосредственно связанными с эмоциональной стороной работы пожарных и спасателей, отражают наиболее важные профессиональные характеристики будущего сотрудника МЧС. Бланки были отпечатаны на отдельных листах, которые анонимно заполнялись респондентами вручную. Время, выделенное на заполнение бланка, составляло 5–10 мин. Основываясь на паре противоположных эмоционально-оценочных характеристик, курсанты должны были отметить на семибалльной шкале свое отношение к предмету. Значение на шкале изменялось через ноль от +3 до –3. Антонимы (дескрипторы) характеризовали объект от положительного к отрицательному значению и наоборот, что исключало позиционный стиль ответов.

Результаты анкетирования обрабатывались методом факторного анализа в программе SPSS Statistics. Метод выделения факторов – метод главных компонент. Метод вращения – Varimax с нормализацией Кайзера. Положительное значение факторной нагрузки означало, что объект воспринимается респондентом в большей степени как первый антоним, а отрица-

тельное – как второй (табл. 2,3,4). Факторные нагрузки – это аналоги коэффициентов корреляции. Они показывают степень взаимосвязи исследуемых переменных и факторов: чем больше абсолютная величина факторной нагрузки, тем больше данный антоним обусловлен действием соответствующего фактора.

Значение  $\alpha$  Кронбаха оказалось выше рекомендованного на 0,7 для всех факторов. Тест Кайзера – Мейера – Олкина (КМО) и тест Бартлетта показали, что факторный анализ осуществим (табл. 2). Суммарная доля воспроизводимой дисперсии для всех групп испытуемых составила более 55%, что является приемлемым. Пороговое значение факторной нагрузки выбиралось больше или равным 0,5, однако для осуществления сравнительного анализа в тех случаях, когда факторные нагрузки по некоторым переменным не достигали 0,5, указывалось значение меньше порогового.

Таблица 2

### Результаты критерия Кайзера – Мейера – Олкина и критерия сферичности Бартлетта

Курсы	Первый	Второй	Пятый	Третий (заочное обучение)
Количество респондентов	92	82	77	51
Мера адекватности выборки (КМО)	0,894	0,739	0,744	0,574
Хи-квадрат ( $\chi^2$ )	1537,231	1010,490	793,841	530,982
Степень свободы (df)	253	253	253	253
p-уровень	0,000	0,000	0,000	0,000

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интерпретация факторов – одна из основных задач факторного анализа. С учетом структуры взаимосвязей было выделено три основных фактора, характеризующих профессиональное самосознание и отношение курсантов университета ГПС МЧС России к выбранной профессии: фактор 1 – «Образ профессии пожарного», факторы 2 и 3 можно охарактеризовать как «Образ себя как представителя профессии». Однако видение себя в профессии согласно факторам 2 и 3 у будущих специалистов пожарного дела принципиально отличается. Фактор 2 «Образ себя как представителя профессии пожарного-спасателя» отражает представление молодого человека о будущей службе как деятельности по тушению пожаров, непосредственному участию в ликвидации чрезвычайных ситуаций, спасению людей. Фактор 3 «Образ себя как представителя профессии пожарного-инженера-эксперта» характеризует представление курсанта о своей работе как офисной в научно-исследовательских и испытательных лабораториях, пожарных инспекциях, службах по предупреждению чрезвычайных ситуаций. В процессе обучения в вузе структура факторов претерпевает изменения, переходя от формально-атрибутивного отношения, характерного для первокурсников, к практико-ориентированному представлению себя как субъекта профессиональной деятельности с сформированными навыками самоидентичности (табл. 3 и 4).

Рассмотрение структуры первого фактора однозначно указывает на то, что первокурсники имеют весьма поверхностное представление о будущей специальности. Они характеризуют ее как интересную, востребованную, престижную, мужественную, героическую, сложную, требующую высокой квалификации, большого физического и нервного напряжения, честную и увлеченную. Без сомнения, это – те критерии, по которым вчерашние школьники сделали выбор будущей профессии, то, что соответствует внешней атрибутике героической профессии пожарного и спасателя. Образ себя как представителя профессии еще практически не сформирован, поэтому наряду с высокой оценкой профессии в целом факторная нагрузка по

переменной «любимая» имеет невысокое значение. Работа по ликвидации пожара представляется как нечто хаотичное и малопонятное (фактор 2).

Более четко сформировано представление о роли пожарного специалиста-инженера, следователя или эксперта. Часть первокурсников видит свою будущую деятельность как творческую, теоретическую, индивидуальную и безопасную работу в офисе или лаборатории, что соответствует представлению абитуриента о работе судебного эксперта (табл. 3).

Таблица 3

**Результаты факторного анализа отношения курсантов первого и пятого курсов  
Университета ГПС МЧС России к будущей профессии критерия**

Факторы	1		2		3	
	Первый	Пятый	Первый	Пятый	Первый	Пятый
Курсы						
Объясненная совокупная дисперсия, %	44,43	23,06	7,72	13,52	11,05	19,89
Антонимы	–	–	–	–	–	–
Увлеченная/равнодушная	0,816	0,702	–	–	–	–
Престижная/непрестижная	0,862	0,702	–	–	–	–
Интересная/скучная	0,913	0,713	–	–	–	–
Выгодная/невыгодная	0,729	–	–	-0,558	–	–
Любимая/ненавистная	0,573	0,530	–	–	–	–
Востребованная/ненужная	0,864	0,644	–	–	–	–
Многогранная/односторонняя	0,531	0,597	–	–	–	–
Честная/неискренняя	0,781	0,567	–	–	–	–
Радостная/печальная	0,585	–	–	–	–	0,649
Самостоятельная/ведомая	0,473	–	–	–	–	–
Мужественная/женственная	0,806	–	–	–	–	-0,592
Безопасная/рискованная	–	–	–	–	0,627	0,776
Деятельная/пассивная	0,880	0,698	–	–	–	–
Спокойная/нервная	-0,640	–	–	–	–	0,679
Творческая/рутинная	–	–	–	-0,543	0,586	–
Сложная/простая	0,801	–	–	0,698	–	–
Квалифицированная/неквалифицированная	0,910	0,404	–	–	–	–
Эмоциональная/уравновешенная	0,595	0,613	0,494	–	–	–
Героическая/обыденная	0,772	0,554	–	–	–	–
Упорядоченная/хаотичная	–	–	-0,811	-0,448	–	–
Теоретическая/практическая	–	–	–	–	0,700	0,469
Физическая/умственная	0,617	–	–	0,505	–	-0,560
Индивидуальная/коллективная	–	–	–	–	0,800	0,621

К третьему курсу представления курсантов о будущей профессии не только меняются, но и персонализируются. Во-первых, будущая деятельность теряет ореол романтизма. Практически все факторные нагрузки, характеризующие привлекательность профессии, резко падают. Некоторые курсанты начинают сомневаться в правильности своего выбора (крайне

низкий показатель по переменной «любимая»). При этом резко возрастает доля фактора 2, что свидетельствует о развитии профессионального самосознания в ходе обучения (табл. 4).

Курсанты университета, выезжая на реальные пожары, проходя практическое обучение в пожарных подразделениях, начинают ощущать личностную включенность в боевые расчеты. У них формируется осознание своей принадлежности к определенной профессиональной общности. В результате большинство третьекурсников достаточно высоко оценивают свою будущую деятельность именно в пожарных подразделениях, связанных с непосредственным тушением пожаров (по переменным «увлеченная» и «востребованная» факторные нагрузки выше, чем по отношению к профессии в целом).

Таблица 4

**Результаты факторного анализа отношения курсантов третьего курса очной и заочной формы обучения Университета ГПС МЧС России к будущей профессии**

Факторы	1		2		3	
	Очная	Заочная	Очная	Заочная	Очная	Заочная
Объясненная совокупная дисперсия, %	18,2	12,48	24,02	26,93	13,29	18,1
Антонимы	–	–	–	–	–	–
Увлеченная/равнодушная	0,549	–	0,606	0,842	–	–
Престижная/непрестижная	0,634	0,825	–	–	–	–
Интересная/скучная	0,569	–	0,559	0,787	–	–
Выгодная/невыгодная	0,727	0,738	–	–	–	–
Любимая/ненавистная	0,429	–	–	0,663	–	–
Востребованная/ненужная	0,541	0,683	0,643	–	–	–
Многогранная/односторонняя	-0,441	–	–	0,822	–	–
Честная/неискренняя	0,458	–	–	0,392	–	–
Радостная/печальная	0,540	0,577	–	–	–	–
Самостоятельная/ведомая	0,527	–	–	–	–	0,676
Мужественная/женственная	–	–	0,576	0,683	–	–
Безопасная/рискованная	–	–	–	–	0,572	0,512
Деятельная/пассивная	–	–	0,703	0,592	–	–
Спокойная/нервная	–	–	-0,474	–	0,528	-0,562
Творческая/рутинная	–	–	–	0,48	0,697	-0,447
Сложная/простая	–	–	0,562	–	–	0,881
Квалифицированная/неквалифицированная	–	–	0,638	0,497	–	–
Эмоциональная/уравновешенная	–	–	0,591	0,855	–	–
Героическая/обыденная	–	–	0,737	0,609	–	–
Упорядоченная/хаотичная	–	–	–	–	0,438	0,796
Теоретическая/практическая	–	–	-0,412	–	–	0,823
Физическая/умственная	–	–	0,549	0,861	-0,534	–
Индивидуальная/коллективная	–	–	–	–	0,642	0,811

С другой стороны, курсанты первого – третьего курсов большую часть времени заняты в университете служебной и хозяйственной деятельностью, несением нарядов и редко интересуются научной работой. Это приводит к тому, что показатели по фактору 3 также снижаются, а представление о работе пожарного как теоретической области деятельности практически исчезает (табл. 4).

Курсанты пятого курса – это молодые люди с практически законченным высшим инженерным образованием, имеющие теоретические знания в профессии и зачастую опыт ликвидации чрезвычайных ситуаций. Хотя значения факторных нагрузок по их отношению к профессии несколько ниже, чем у первокурсников, они выше, чем у третьекурсников. Имея практический опыт по тушению пожаров, пятикурсники не воспринимают свою работу как героическую, эмоциональную, хаотичную. Наоборот, они отмечают ее рутинный характер, понимая при этом сложность и драматичность своей будущей деятельности (табл. 3).

Выпускники университета, выбирающие по окончании университета работу в офисе или лаборатории, характеризуют ее как спокойную, безопасную, приносящую удовлетворение (самый высокий показатель по дескриптору «радостная»), хотя и считают, что она больше подходит для девушек (положительное значение по переменной «женственная»).

Интересно отметить, что факторные нагрузки по дескриптору «физическая/умственная» имеют практически одинаковые значения у курсантов третьего и пятого курсов, но по фактору 2 они характеризуют деятельность пожарного специалиста как физическую, а по фактору 3 – как умственную.

Наряду с исследованием, проведенным среди курсантов университета, бланки семантического дифференциала было предложено заполнить слушателям третьего курса заочного факультета. Результаты факторного анализа по данной группе респондентов приведены в табл. 4. Все испытуемые в этой группе работают в разных подразделениях пожарной охраны, поэтому их отношение к профессии максимально персонифицировано.

Сотрудники МЧС, пришедшие в университет повысить свой уровень образования, высоко оценивают престижность и востребованность профессии пожарного, считают, что она обеспечивает хороший уровень дохода. Поскольку большинство из них работает в пожарных частях, характеризуя профессию, они прежде всего описывали отношение к своей ежедневной деятельности, в результате самый большой вес оказался у фактора 2. Слушатели отметили увлеченность работой, интерес к ней, многогранный и эмоциональный характер деятельности, именно в этой группе самая большая факторная нагрузка по дескриптору «любимая». А вот работу в офисе (фактор 3) практические работники, в отличие от курсантов, описывают как нервную, сложную и требующую самостоятельности в принятии решений (табл. 4).

Следует отметить, что по результатам факторного анализа корреляция между факторами 1 и 2 и 1 и 3 находилась в пределах от  $-0,36$  до  $+0,31$ , причем корреляция между факторами 1 и 3 всегда имела отрицательное значение. Полученные значения указывают, с одной стороны на то, что факторы достаточно независимы друг от друга, а с другой – что общее видение профессии пожарного не соответствует представлению о работе в офисе. Корреляция между факторами 2 и 3 составляла от  $-0,48$  до  $-0,08$ , причем наибольшее по модулю значение было у слушателей заочного факультета, а наименьшее – у курсантов первого курса, что подтверждает совершенно противоположное представление о себе как о профессионале у специалистов пожарной безопасности, принадлежащих к разным направлениям (боевая и офисная работа).

Отмечая положительные тенденции по формированию профессиональной идентичности и самосознания обучающихся в период нахождения в вузе, нельзя не обратить внимание на проблемы, которые отразили результаты анализа. От первого к пятому курсу и у курсантов, и у слушателей неуклонно снижались значения факторных нагрузок по переменной «квалифицированная», что говорит о недостаточной укомплектованности как учебных классов и лабораторий, так и пожарных частей современным оборудованием и средствами пожаротушения. Крайне низкие показатели факторных нагрузок по дескриптору «практическая», что свиде-

тельствует о необходимости увеличения количества часов, отведенных на практическое освоение профессии. Низкие значения факторных нагрузок зафиксированы и по дескриптору «самостоятельная». Невзирая на то что офицер должен уметь выполнять приказ, в работе спасателя и пожарного эксперта необходимо уметь проявлять творчество и инициативу, к которой выпускники вуза, по-видимому, не готовы. Ни одна из групп респондентов не отметила коллективный характер работы пожарных, что вызывает большую тревогу, так как в чрезвычайной ситуации умение работать в команде имеет решающее значение.

Один из самых тревожных показателей – резкое падение факторных нагрузок по переменной «честная», причем у слушателей заочного отделения его значение самое низкое из всех групп респондентов, что свидетельствует о наличии коррупционных рисков в работе пожарных служб. Кроме того, выпускники университета, в отличие от слушателей заочного факультета, отмечая престижность выбранной специальности, не считают, что она может обеспечить им финансовое благополучие, что неизбежно приводит к потере интереса к выбранной профессии и досрочному уходу молодых специалистов из системы МЧС. Вес фактора 2 у пятикурсников крайне низок и сопоставим с показателем первокурсников. Но если для курсантов первого курса это связано с недостаточным представлением о профессии, то столь резкое падение веса фактора 2 для студентов третьего курса указывает на нежелание выпускников связывать свою судьбу со службой в боевых подразделениях пожарных и спасателей. Полученный результат свидетельствует о накопившихся в пожарной охране за последние годы проблемах, требующих незамедлительного решения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Эффективность деятельности государственной противопожарной службы и спасательных формирований в структуре МЧС зависит не только от уровня их технической оснащенности, но и от степени подготовки сотрудников. Профессиональная успешность будущего специалиста определяется не только его способностями и личностными качествами, но и тем, насколько человек соответствует выбранной специальности, степени сформированности его профессионального самосознания. Отношение к профессии является важным фактором, влияющим на качество обучения и обеспечивающим эффективность процесса формирования готовности к профессиональной деятельности. Этот процесс включает в себя как объединение различных сведений о профессии, так и развитие у обучающихся представлений о роли и значении получаемых знаний в выбранной области деятельности.

2. Динамику изменения мотивационно-ценностной структуры профессионального самосознания в процессе обучения в вузе следует рассматривать с учетом эмоциональных факторов в рамках поведенческого компонента. Этот компонент, базирующийся на когнитивной составляющей, отражает регулятивно-действенные факторы, определяемые мотивацией на совершение каких-либо поступков как в процессе обучения, так и в профессиональной деятельности. Именно психологическое состояние, являясь для индивида одним из важнейших интегрирующих показателей удовлетворенности своей деятельностью, обуславливает успешность протекания познавательных процессов и развития профессионально важных качеств. Психосемантические методы, в частности метод семантического дифференциала, дают возможность качественно и количественно оценить эмоциональное отношение человека к изучаемому объекту, оперативно выявить возникновение и развитие как положительных, так и негативных тенденций в отношении к будущей профессии как для групп испытуемых, так и для отдельных респондентов.

3. Результаты исследования отношения курсантов и слушателей к профессии пожарного, проведенные в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России, свидетельствуют, что в период обучения в вузе происходят формирование самоидентичности и рост профессионального самосознания будущих специалистов, при этом процесс этот не носит линейного

поступательного характера. Отношение к профессии меняется от формально-атрибутивного периода героизации, характерного для обучающихся на первом курсе, проходит процесс персонализации и снижения интереса на третьем курсе и выходит на новый уровень сформированного профессионального самосознания на пятом курсе, что необходимо учитывать при подготовке квалифицированных офицерских кадров, оперативно устраняя развивающиеся негативные тенденции.

4. Метод семантического дифференциала, охватывающий широкий спектр показателей, влияющих на отношение человека к объекту исследования, позволяет оперативно провести педагогическую диагностику и получить объективную картину эмоционального отношения испытуемого к объекту. Обработка результатов, полученных при анкетировании, методом факторного анализа детерминируют непосредственно наблюдаемые переменные и может быть использована для объяснения комплексных явлений, возникающих в ходе формирования профессионального самосознания будущих офицеров.

### Список используемых источников

1. *Ларина Т.В.* Оценка качества образования курсантов: моногр. – Воронеж: «ВУНЦ ВВС ВВА», 2014. – 243 с.
2. *Баскин Ю.Г., Ефремов О.Ю., Осипов Д.Л.* Инновационное образование в вузах силовых ведомств: тенденции становления и развития // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2012. – № 4. – С. 97–104.
3. *Засыткин И.В.* Мотивация учебной деятельности как фактор, определяющий процесс начала профессиональной адаптации курсантов в период их обучения в образовательных организациях МВД России // Вестн. экон. безопасности. – 2016. – № 3. – С. 355–358.
4. *Коноваленко Е.П.* Роль мотивации в процессе воспитания ценностного отношения к будущей профессии курсантов вузов МЧС России // Науч. поиск. – 2012. – № 22. – С. 60–63.
5. *Демченко О.Ю., Газизова Ю.С.* Особенности формирования образа профессионала у будущих специалистов Государственной противопожарной службы МЧС России // Теория и практика общественного развития. – 2015. – № 22. – С. 329–332.
6. *Демченко О.Ю., Газизова Ю.С.* Развитие образа профессии у курсантов ГПС МЧС России // Актуальные проблемы психологии личности: сб. науч. тр. – Екатеринбург, 2017. – Вып. 14. – С. 51–56.
7. *Баскин Ю.Г., Свидзинская Г.Б.* Анализ отношения учащихся вузов МЧС России к своей будущей профессии с использованием метода семантического дифференциала // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур. – 2017. – № 4. – С. 3–12.
8. *Баскин Ю.Г., Свидзинская Г.Б., Свидзинская А.С.* Использование метода семантического дифференциала в психолого-педагогических исследованиях в вузах МЧС России // Вестн. С-Пб. ун-та ГПС МЧС России. – 2018. – № 1. – С. 93–100.
9. *Свидзинская Г.Б., Свидзинская А.С.* Применение метода семантического дифференциала для оценки уровня сформированности профессионального самосознания у будущих специалистов пожарной безопасности // Подготовка кадров в системе предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Международной научно-практ. конф. – СПб., 2018. – С. 174–178.
10. *Лебедева И.П.* О специфике применения факторного анализа в педагогическом исследовании // Образование и наука. – 2003. – № 2. – С. 10–25.

А.В. Ерофеев,  
*кандидат военных наук, доцент;*  
Л.В. Покидов  
*кандидат военных наук*

## **МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА УЧЕБНОГО КОМАНДНОГО ПУНКТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ У ОБУЧАЮЩИХСЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ПО ТАКТИКО-СПЕЦИАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ**

В статье рассматривается процесс формирования профессиональных компетенций у специалистов в области тактики сил управления космическими аппаратами на практических занятиях по дисциплине «Тактика сил запуска и управления космическими аппаратами» с использованием специального программного комплекса учебных командных пунктов.

Ключевые слова: компетенции, учебно-материальная база, сеанс управления космическим аппаратом, технические средства обучения, специальный программный комплекс, боевой расчет, учебный командный пункт.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Практическая сторона выработки профессиональных компетенций у военных специалистов воинских частей управления космическими аппаратами (КА) имеет свои особенности. Эти особенности обусловлены спецификой вооружения, находящегося в частях управления КА, необходимостью сложной заблаговременной подготовки к выполнению задач по предназначению, многообразием циркулирующей информации в звеньях структуры воинских частей управления, необходимостью тесного взаимодействия с воинскими частями сил запуска КА, а также с различными организациями, в ведении которых находятся специальные комплексы космических систем.

Кроме того, необходимо учитывать, что некоторые операции по управлению КА жестко привязаны к дискретным моментам времени с невозможностью их повторения при ошибочных действиях боевых расчетов.

В связи с перечисленными особенностями выполнять задачи по управлению КА способны лишь те специалисты, которые в совершенстве владеют твердыми знаниями, навыками и умениями, формами и способами применения привлекаемых воинских частей и подразделений в многозвенной структуре управления орбитальными группировками космических аппаратов космических комплексов и систем.

### **КОМПЕТЕНЦИИ, ФОРМИРУЕМЫЕ У СПЕЦИАЛИСТОВ ЧАСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ**

В заказе на специалиста-выпускника академии в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами и квалификационными требованиями определена следующая компетенция: «Способен управлять действиями подразделений при выполнении задач по предназначению в мирное и военное время, организовывать и осуществлять руководство мероприятиями, направленными на поддержание боевой готовности, боевого обеспечения и восстановление боеспособности подчиненного подразделения». Наиболее качественное развитие этой компетенции у военных специалистов частей управления КА достигается в ходе их работы с боевыми документами, на пунктах управления частями и подразделений, на средствах наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) КА в

составе боевого расчета и в органах управления, а также в составе различных временных формирований. Поэтому формирование у обучающихся профессиональных компетенций по дисциплине «Тактика сил запуска и управления КА» осуществляется последовательно на занятиях, проводимых в форме практических занятий, групповых упражнений, тактико-специального занятия и тактико-специального учения с использованием оборудования учебного командного пункта, учебных пособий и специализированных методических материалов. При этом обучающиеся исполняют специальные обязанности в различных должностях из состава боевого расчета частей управления КА и к завершению обучения способны:

- выполнять обязанности номера в составе боевого расчета средства НАКУ при несении дежурства с целью управления КА;
- планировать подготовку и проводить сеансы управления КА на основе исходных данных, получаемых из Главного испытательного космического центра (ГИКЦ);
- принимать решения на выполнение поставленной командиром задачи или при изменении тактической обстановки;
- управлять действиями боевого расчета подразделения при выполнении поставленной задачи;
- разрабатывать боевые документы по управлению частью (подразделением) в различных условиях обстановки, представлять установленным порядком доклады на вышестоящий КП;
- организовывать действия подразделения по поддержанию боевой готовности и всестороннему обеспечению.

Все занятия проводятся на оборудованных учебных командных пунктах, составляющих основу материально-технической базы кафедры «Оперативное искусство и тактика».

Центральное место среди занятий занимают практические занятия по тематике, посвященной подготовке и проведению сеансов управления КА в различных условиях обстановки.

### **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА УЧЕБНОГО КОМАНДНОГО ПУНКТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЗАНЯТИЙ ПО ТАКТИКО-СПЕЦИАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ**

Приведем сокращенную модель действий обучающихся для одного из практических занятий на тему: «Действия помощника командира дежурных сил по выполнению задач управления КА, начальников боевых расчетов подразделений при несении боевого дежурства и выполнении задач в боевой готовности "Постоянная"».

Одной из учебных целей занятия является формирование у обучающихся компетенции «Способен управлять действиями подразделений при выполнении задач по предназначению в мирное и военное время, организовывать и осуществлять руководство мероприятиями, направленными на поддержание боевой готовности, боевого обеспечения и восстановление боеспособности подчиненного подразделения».

Занятие проводится на учебном командном пункте (УКП) частей управления КА 101-й кафедры по взятому из войск и адаптированному к учебному процессу сценарию подготовки и проведения сеанса управления КА. На УКП развернуты командные пункты (КП) и боевые посты номеров боевого расчета 1-го и 9-го учебных отдельных командно-измерительных комплексов (окик) и КП учебного Главного испытательного космического центра.

Все действия обучающихся осуществляются на оперативно-тактическом фоне и точно привязываются к оперативному времени. С общей и частной обстановками, которые обуславливают соответствующий сценарию занятия оперативно-тактический фон, со специальными обязанностями должностных лиц боевого расчета окик (ГИКЦ) обучающиеся знакомятся в часы самостоятельной подготовки при изучении «Тактического задания» на данное практическое занятие. Вместе с тем каждый обучающийся должен быть готовым действовать на любом боевом посту (БП).

В начале занятия обучающиеся, в зависимости от состава учебной группы, распределяются преподавателем по одному-два человека на боевые посты УКП согласно схеме (рис. 1), указанной в «Тактическом задании» на данное практическое занятие.

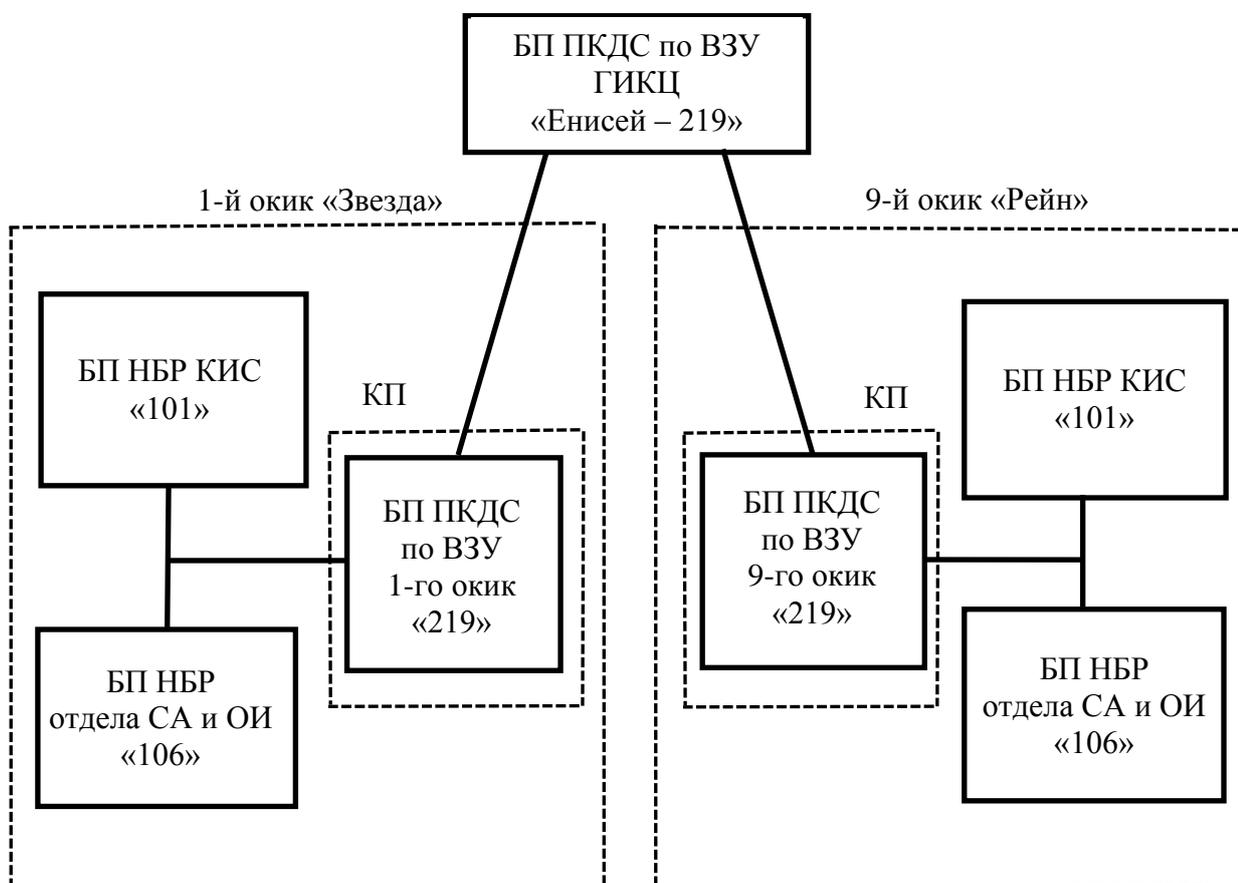


Рис. 1. Схема распределения обучающихся на УКП для проведения сеанса управления КА: БП – боевой пост; НБР – начальник боевого расчета; ПКДС по ВЗУ – помощник командира дежурных сил по выполнению задач управления КА; СА и ОИ – средства автоматизации и обработки информации; КИС – командно-измерительная система; «Енисей», «Звезда», «Рейн» – позывные узлов связи: соответственно ГИКЦ, 1-го оика и 9-го оика; 101, 106, 219 – позывные номеров боевого расчета

Согласно предложенному сценарию обучающиеся, используя средства связи, учебные документы и автоматизированные рабочие места (АРМ) боевых постов УКП, выполняют практические действия направленные на подготовку и представление докладов по средствам связи, разработку различных учебных документов по несению дежурства и выполнению задач по предназначению, подготовку и проведение сеансов управления КА и др.

Для отработки практических вопросов по подготовке и проведению сеансов управления КА на базе вычислительной техники УКП, на боевых постах развернуты следующие АРМ: АРМ начальника боевого расчета командно-измерительных систем (НБР КИС) 1-го и 9-го оика, АРМ начальника боевого расчета отдела средств автоматизации и обработки информации (НБР отдела СА и ОИ) 1-го и 9-го оика; АРМ помощника командира дежурных сил по выполнению задач управления КА (ПКДС по ВЗУ) КП 1-го и 9-го оика; АРМ ПКДС по ВЗУ КП ГИКЦ.

Все АРМ должностных лиц боевого расчета объединены локальной сетью, и на них установлено программное обеспечение, составляющее специальный программный комплекс, позволяющий создавать соответствующую сценарию практического занятия динамичную учебную обстановку для каждого должностного лица боевых расчетов учебных 1-го и 9-го оика и учебного ГИКЦ.

Специализированный программный комплекс был разработан обучающимися под руководством преподавателей 101-й кафедры в рамках военно-научной работы, проводимой на кафедре по дисциплине «Тактика сил запуска и управления КА». Данный программный комплекс представляет собой совокупность взаимодействующих специальных программ, каждая из которых, в свою очередь, является программным обеспечением вышеуказанных АРМ должностных лиц боевого расчета и АРМ преподавателя. Ниже рассмотрим более детально возможности программного обеспечения каждого АРМ.

Программное обеспечение АРМ НБР КИС предназначено для имитации динамики подготовки и проведения сеанса управления КА в звеньях НБР КИС – ПКДС по ВЗУ КП ОКИК – ПКДС по ВЗУ КП ГИКЦ. Оно позволяет практически в полном объеме имитировать работу БР КИС в ручном режиме – набирать и выдавать команды на борт КА, контролировать правильность набора команд, а также отражает факт получения «квитанции» о прохождении команд и привязывает действия обучающихся к единому времени.

Программное обеспечение АРМ ПКДС по ВЗУ КП ОКИК позволяет осуществлять информационный обмен в процессе своей работы в звеньях ПКДС по ВЗУ КП ОКИК – ПКДС по ВЗУ КП ГИКЦ следующей информацией:

- распоряжением на применение средств НАКУ ОКИК на очередные сутки;
- распоряжениями на проведение внеплановых сеансов управления КА;
- распоряжениями об изменении оперативно-тактической обстановки;
- распоряжениями о пролете иностранных разведывательных КА;
- докладами из ОКИК на КП ГИКЦ о потерях личного состава и средств НАКУ в ходе боевых действий;
- докладами в ГИКЦ о приведении ОКИК в заданную боевую готовность и изменениях оперативно-тактической обстановки и др.

Программное обеспечение АРМ НБР отдела СА и ОИ позволяет осуществлять визуальный контроль выполнения операций по приему и обработке телеметрической информации (ТМИ), т. е. оценивать полноту и качество приема, обработки и передачи ТМИ в ГИКЦ.

Программное обеспечение АРМ преподавателя предназначено для управления сценарием проведения практического занятия. Оно позволяет изменять динамику оперативно-тактической обстановки, а также повышать или понижать степень сложности решаемых задач НБР отдела СА и ОИ и НБР КИС путем введения или устранения «ошибок» в любую из указанных выше для этих номеров операций, имитируя аппаратные и программные сбои.

Дополнительным компонентом специального программного комплекса является тестирующая программа, которая позволяет проводить проверку усвоения обучающимися пройденного учебного материала с выставлением им оценки и выводить результаты тестирования на АРМ преподавателя. Эта программа дает возможность проверить знания по широкому спектру вопросов, сократить временные затраты на проверку ответов и практически исключить субъективизм преподавателя в оценке уровня знаний.

В ходе отработки «Тактического задания» на данную практическую задачу предусматривается ротация обучающихся на боевых постах. Кроме того, весь динамический процесс отработывается, как правило, дважды, что позволяет закрепить полученные навыки в действиях должностных лиц.

Отработка других практических задач с использованием оборудования учебного командного пункта кафедры осуществляется согласно содержанию соответствующей темы и целевой установки на практическое занятие. Эти особенности отражены в «Методических указаниях» по каждой практической задаче.

Дополнительным техническим средством на учебных командных пунктах является локальная сеть связи на основе автоматической телефонной станции с установленными на боевых постах телефонами. Телефонная сеть является открытой, поэтому для имитации передачи закрытых сообщений используются учебные документы кодированной связи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная методика использования элементов учебно-материальной базы 101-й кафедры для выработки профессиональных компетенций на практических занятиях успешно работает только при наличии тщательно отработанных дидактических материалов. На всех практических занятиях они представлены учебными пособиями, начиная от инструкций на боевых постах до списка литературы, указанной в тематическом плане изучения учебной дисциплины «Тактика сил запуска и управления КА».

### Список используемых источников

1. Методические рекомендации по проведению практического занятия № 10 / А.В. Ерофеев и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015.
2. *Ерофеев А.В., Покидов Л.В.* Методика подготовки и проведения практических занятий по дисциплине «Тактика сил запуска и управления КА»: инструкторско-метод. занятие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017.
3. Тактика сил запуска и управления космическими аппаратами: рабочая прогр. учеб. дисциплины. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019.
4. Приказ министра обороны Российской Федерации № 670 от 15 сентября 2014 года «О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 года». – М., 2014.

А.Н. Иванов,  
Н.В. Селихина,  
кандидат военных наук

## **СИСТЕМА РАБОТЫ ДОЛЖНОСТНЫХ ЛИЦ ВУЗОВ МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ, УЧЕТУ И РАЗВИТИЮ ИНДИВИДУАЛЬНО- ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИЧНОСТИ КУРСАНТА В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ**

В публикации обоснована необходимость разработки и внедрения системы работы должностных лиц вузов Министерства обороны Российской Федерации по выявлению, учету и развитию индивидуально-психологических свойств личности курсантов, дано структурно-функциональное представление системы. Приведены условия и особенности функционирования системы, отмечены основные положения по учету и контролю результатов деятельности должностных лиц вузов.

Ключевые слова: система работы, индивидуально-психологические свойства личности, развитие личности обучающихся, повышение успешности обучения.

Каждая система представляет собой целостное образование, состоящее из частей (подсистем). Целостность – важнейшее ее свойство, которое достигается определенной взаимосвязью и взаимодействием элементов внутри данной системы. Система всегда имеет цель (цели), для выполнения которой она и существует [1]. Всякая система при таком подходе рассматривается как совокупность структурных и функциональных элементов (компонентов), взаимосвязанных между собой и подчиненных определенным целям.

В рассматриваемом случае система работы должностных лиц вузов Министерства обороны Российской Федерации по выявлению, учету и развитию индивидуально-психологических свойств личности курсантов направлена на развитие в личности обучающихся необходимых для успешного обучения качеств [2].

Таким образом, здесь рассматриваем процесс развития личностных качеств курсантов как целостную сложно организованную систему, имеющую свою структуру и содержащую определенное количество взаимосвязанных компонентов, объединенных общей целью функционирования.

Предлагаемая система работы должностных лиц военного вуза является подсистемой по отношению к общей системе образовательной деятельности. Однако, являясь подсистемой, она представляется относительно самостоятельной по отношению к системе высшего порядка. С точки зрения функционирования данная система работы приводит к возникновению свойств личности более высокого уровня [3,4]. На этом основании можно сделать заключение о том, что процесс развития личностных качеств курсантов, от которых зависит успешность обучения, может быть обеспечен с помощью специальной системы работы должностных лиц, являющейся подсистемой образовательной системы военного вуза. Только системный подход в развитии названных свойств личности курсантов может обеспечить нужный результат – повысить успешность обучения [5].

Необходимость разработки и внедрения предлагаемой системы работы обусловлена тем, что образовательной программой вуза не предусмотрено систематическое целенаправленное развитие необходимых для повышения успешности обучения личностных качеств курсантов.

В основу функционирования рассматриваемой системы были заложены следующие принципы:

- объективной оценки индивидуально-психологических свойств личности курсантов, от которых зависит успешность их обучения;
- единства и согласованности действий всех должностных лиц, от которых зависит процесс развития данных индивидуально-психологических свойств;
- комплексного задействования имеющихся средств развития индивидуально-психологических свойств личности курсанта;
- опоры на сознательное устремление курсантов к личностному совершенствованию.

Система работы должностных лиц вузов Министерства обороны Российской Федерации по выявлению, учету и развитию индивидуально-психологических свойств личности курсанта при обучении реализуется поэтапно.

Первый этап – оценка исходного уровня развития индивидуально-психологических свойств личности курсантов, от которых зависит успешность обучения.

Второй этап – учет и развитие индивидуально-психологических свойств личности курсантов.

Третий этап – оценка эффективности системы работы должностных лиц по показателям учебной успеваемости и изменению показателей личностных свойств обучающихся.

Система работы должностных лиц вузов Министерства обороны Российской Федерации по выявлению, учету и развитию индивидуально-психологических свойств личности курсанта в процессе обучения показана на рис. 1.

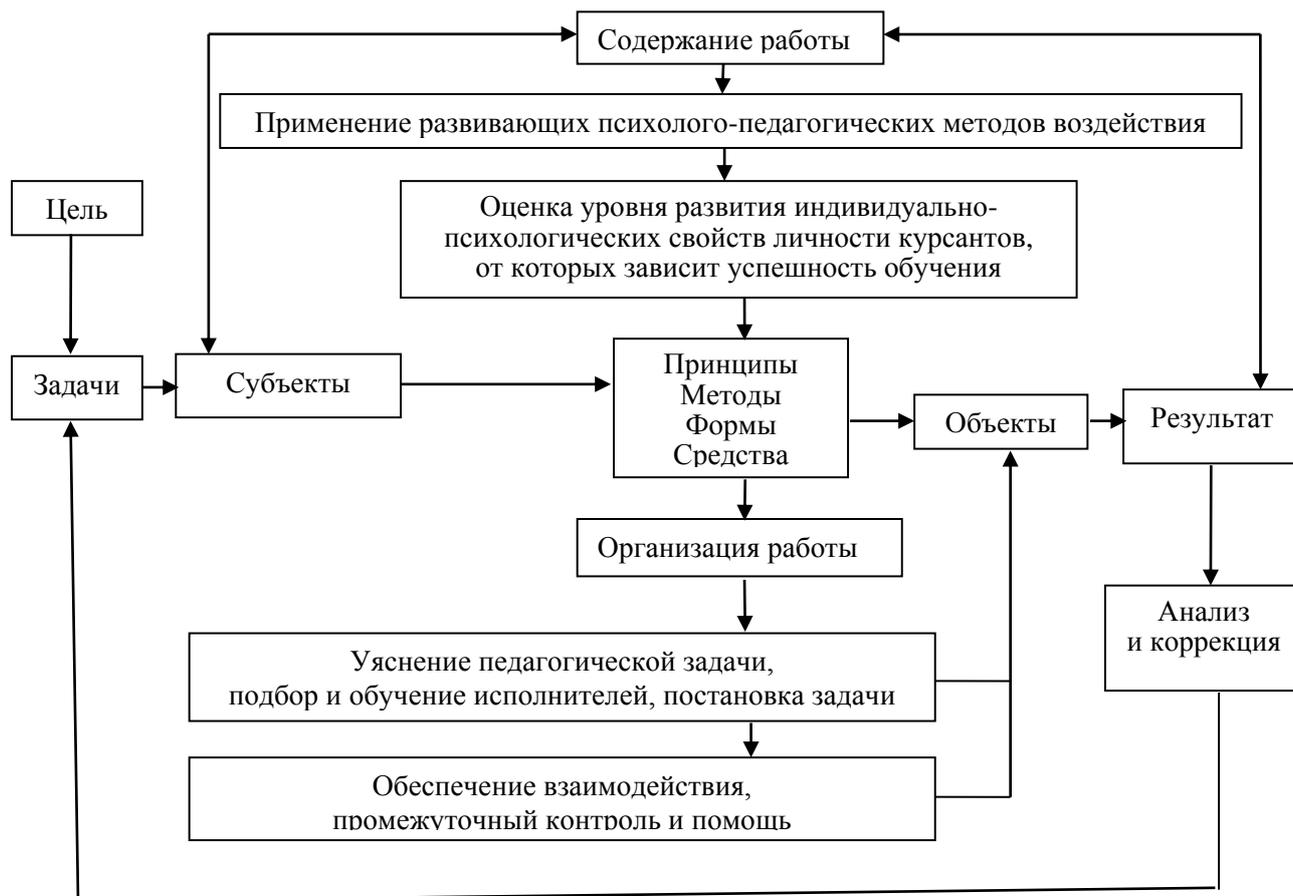


Рис. 1. Система работы должностных лиц вузов МО РФ по выявлению, учету и развитию индивидуально-психологических свойств личности курсанта в процессе обучения

Как видно из рис. 1, система работы должностных лиц вузов Министерства обороны Российской Федерации по выявлению, учету и развитию индивидуально-психологических

свойств личности курсанта в процессе обучения и военно-политической работы структурно представляет собой взаимосвязанные компоненты, базирующиеся на общих требованиях и подходах к содержанию, функциям и методам обучения, воспитания и развития.

Таким образом, предлагаемая система работы должностных лиц вузов включает: цель, задачи, субъекты, объекты; обеспечивающие принципы, методы формы и средства.

Исходными данными являются:

- требования руководящих документов к уровню обученности курсантов и слушателей вуза;
- индивидуально-психологические свойства личности курсантов, от которых зависит успешность обучения.

Основная цель системы работы должностных лиц вузов – повышение успешности обучения курсантов с учетом их личностных возможностей. Данная цель реализуется путем внедрения в учебный и воспитательный процесс разработанного и научно обоснованного комплекса методик выявления, учета и развития индивидуально-психологических свойств курсантов.

С учетом цели определяется главная задача системы работы должностных лиц вузов, которая заключается в выявлении, учете и развитии индивидуально-психологических свойств личности курсантов при решении задачи повышения успешности обучения. Указанная цель служит исходным моментом, обуславливающим функционирование всей системы.

Цели и задачи системы работы определяют взаимосвязанную и взаимообусловленную деятельность субъектов и объектов этой системы.

К субъектам системы работы должностных лиц вузов следует отнести руководящий и преподавательский состав вуза, командиров курсантских подразделений, специалистов групп психологической работы, специалистов структурных подразделений.

Объектами системы работы должностных лиц вузов являются курсанты и коллективы учебных подразделений.

При разработке системы работы должностных лиц вуза были использованы основные положения, а именно:

- а) в целенаправленном развитии свойств личности, обеспечивающих успешность обучения, нуждаются практически все курсанты вуза, обучающиеся на 1-м и 2-м курсах;
- б) психолого-педагогическое воздействие в целях развития личностных качеств курсантов должно осуществляться дифференцированно, в зависимости от исходного уровня развития данных качеств;
- в) нужных результатов в развитии личностных свойств курсантов можно добиться при умелом использовании рекомендованных комплексом методик методов, упражнений, приемов и средств воздействия.

Надежность функционирования предлагаемой системы работы обеспечивается соблюдением ряда условий, которыми являются:

- планомерное изучение уровня развития индивидуально-психологических свойств личности курсантов, от которых зависит успешность обучения;
- целенаправленное обучение должностных лиц практике учета индивидуально-психологических качеств личности курсантов, от которых зависит успешность обучения и применения специальных методов развития данных качеств;
- согласованная практическая работа всех задействованных в реализации Системы должностных лиц вуза на основе выбора и применения рекомендуемых методов и средств развития личностных качеств обучающихся;
- своевременная коррекция содержания работы по учету и развитию индивидуально-психологических свойств, обучающихся;
- анализ и обобщение достигнутых результатов в развитии личностных качеств обучающихся и выработке предложений по совершенствованию данного процесса.

Целенаправленное функционирование системы работы должностных лиц по развитию у курсантов качеств личности, от которых зависит успешность обучения, обеспечивается должным контролем, оценкой и учетом результатов деятельности.

Схема реализации целей системы работы должностных лиц показана на рис. 2. В данной схеме оценка уровня развития свойств личности курсантов осуществляется на основе объективных критериев в целях коррекции применяемых методов воздействия и поиска наиболее результативных. Соответственно этому оценка результатов деятельности субъектов системы работы должностных лиц осуществляется по динамике показателей уровня развития, необходимых для успешного обучения качеств личности курсантов.

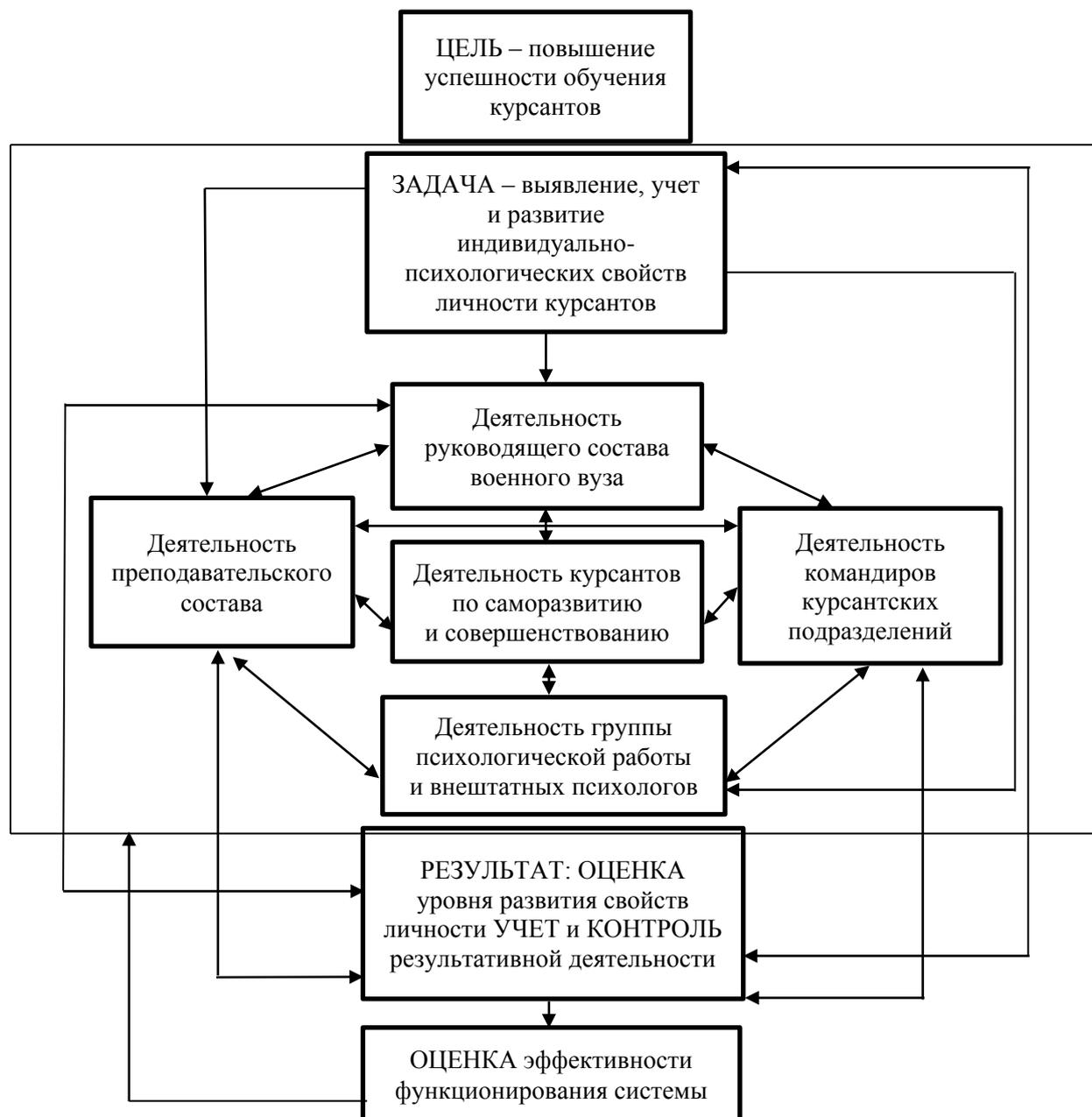


Рис. 2. Схема реализации целей системы работы должностных лиц по развитию у курсантов личностных качеств, от которых зависит успешность обучения

В целом оценка эффективности функционирования системы работы осуществляется по уровню повышения учебной успеваемости курсантов 1-го и 2-го курсов обучения.

Учет результатов деятельности осуществляется путем сбора, обработки, анализа и систематизации фактов и данных о состоянии процесса развития личностных качеств курсантов, выраженных в количественной или содержательной форме, и предполагает следующее:

- использование конкретных форм количественного (цифрового) и качественного (аналитического) учета;
- использование формализованных документов (в частности, карты учета динамики развития личностных качеств курсантов).

Контроль результатов деятельности осуществляется системой методов и средств контроля и проверки качества психолого-педагогических воздействий. При этом контролируются:

- правильность использования рекомендованного комплексом методик арсенала приемов и средств психолого-педагогического воздействия на курсантов;
- согласованность практической работы всех задействованных в реализации Системы должностных лиц вуза;
- действенность как отдельно взятых мероприятий, так и всей работы, проведенной за определенный период времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, система работы должностных лиц вузов Министерства обороны Российской Федерации обеспечивает организацию выявления, учета и развития индивидуально-психологических свойств личности курсанта в процессе обучения и военно-политической работы. Этим достигается основная цель исследования – организационно-методическое обеспечение развития индивидуально-психологических свойств личности курсантов военного учебного заведения при решении задачи повышения успешности обучения.

## Список используемых источников

1. *Вентцель Е.С.* Исследования операций. Задачи. Принципы. Методология. – 2-е изд. – М.: Наука, 1988. – 207 с.
2. *Марков К. В.* Индивидуально-психологические особенности будущих специалистов военного профиля // Инновационные педагогические технологии: материалы Междунар. науч. конф, г. Казань, октябрь 2014 года. – Казань: Бук, 2014. – С. 297–300. – URL <https://moluch.ru/conf/ped/archive/143/6050/> (дата обращения: 16.07.2019).
3. *Бодалев А.А.* Психология личности. – М.: ВЛАДОС, 2008. – 346 с.
4. *Борбот А.Ю.* Психология профессиональной деятельности. – Минск: Асвета, 2009. – 179 с.
5. *Емельяненко А.А., Петровская М.В.* Успешность учебной деятельности курсантов военных вузов и некоторые ее детерминанты // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8. – С. 1692–1700. – URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35279> (дата обращения: 16.07.2019).

И.Е. Калмычков,  
кандидат техн. наук;  
А.М. Рахматулин,  
кандидат техн. наук, доцент;  
Д.Н. Смирнов

## **ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ ОСВОЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ**

В статье обобщен опыт обучения программированию специалистов в области обработки радиосигналов. Накопленный опыт позволяет успешно формировать компетенции в области программирования при обучении специалистов, для которых этот вид деятельности не является основным.

Ключевые слова: обучение программированию, обработка радиосигналов, языки программирования, средства программирования.

Важным элементом любой современной радиотехнической системы является программное обеспечение, используемое как для решения задач управления системой, так и непосредственно для реализации процедур формирования и обработки радиосигналов. Это обусловило необходимость формирования компетенции в области программирования при подготовке специалистов, одним из основных видов деятельности которых является обработка радиосигналов. Основу этой компетенции составляет изучение языков и систем программирования [1].

Следует отметить, что в настоящее время существует большое количество средств программирования. Некоторые из них являются универсальными и позволяют решать широкий класс задач, другие – узкоспециализированными, разработанными для определенных целей. При этом бюджет времени, выделяемый непосредственно на их изучение при освоении общеобразовательных программ, является ограниченным. Это обуславливает типичное для современной педагогической науки противоречие между большим объемом знаний и ограниченным временем обучения [2].

В работах [3] и [4] предложены технологии обучения, позволяющие разрешить сформулированное противоречие применительно к специальностям, для которых программирование является основным видом профессиональной деятельности. Однако эти технологии не могут использоваться при подготовке специалистов в области обработки радиосигналов, вследствие их ориентации на другие цели обучения.

Цель обучения программированию специалистов в области обработки радиосигналов состоит в формировании знаний, навыков и умений, позволяющих самостоятельно разрабатывать прикладные программы, необходимые для решения задач основной профессиональной деятельности.

В настоящее время существуют два основных метода обучения программированию [5]:

1. Классический метод, подразумевающий формирование алгоритмического стиля мышления в сочетании с поэтапным изучением средств и способов программирования на основе перехода от решения простых задач к более сложным.

2. Метод обучения программированию на основе демонстрации и разбора готовых текстов программ.

В работе [5] показано, что первый метод существенно повышает качество обучения в сравнении со вторым. Применение этого метода целесообразно при отсутствии у обучаемых первичных навыков программирования, а также с целью развития алгоритмического мышле-

ния. Однако его реализация возможна только при значительном бюджете времени на обучение программированию.

В условиях ограниченного бюджета времени, а также при развитых навыках программирования может использоваться второй метод. В частности, его применение оправдано при изучении новых средств программирования, подобных ранее изученным.

Опыт подготовки специалистов в области радиотехники на выпускающей кафедре показал, что знаний, полученных обучаемыми в рамках изучения общего курса информатики, недостаточно для самостоятельного применения средств программирования в целях решения задач обработки радиосигналов, составляющих основное содержание практических занятий специальных учебных дисциплин. Использование при этом метода обучения программированию на основе демонстрации и разбора готовых текстов программ не повысило степень самостоятельности обучаемых при разработке программ.

Таким образом, существует противоречие, суть которого состоит в необходимости обеспечить требуемое качество обучения программированию при подготовке специалистов в области обработки радиосигналов в отсутствие научно обоснованного подхода, позволяющего реализовать применение классического метода обучения программированию в условиях ограниченного бюджета времени. В данном случае под требуемым качеством обучения подразумевается способность обучаемых самостоятельно разрабатывать прикладные программы, реализующие процедуры обработки радиосигналов.

Разрешить сформулированное противоречие позволило решение следующих задач:

- 1) выбора языков и систем программирования, позволяющих эффективно решать задачи моделирования и обработки радиосигналов;
- 2) распределения изучаемых средств программирования между дисциплинами кафедры, формирующими навыки обработки радиосигналов.

Основу решения первой задачи составили общие критерии выбора средств программирования, подробно рассмотренные в работе [6]. К этим критериям относятся:

– временные затраты на разработку программного продукта. Следует отметить, что в этих затратах учитываются не только время написания программы, но и время необходимое на освоение нового средства программирования;

– эффективность выполнения программы, разработанной с помощью выбранного средства программирования. В данном случае под эффективностью понимается удовлетворение программы требованию по времени выполнения, требуемому ресурсу информационной системы и возможности ввода и отображения данных.

Перечисленные критерии позволили сформулировать следующие требования к средствам программирования с позиции решения задач обработки сигналов:

1. Возможность разработки программ с интерфейсом ввода данных, функционирующим без перезагрузки программы.
2. Возможность реализации математических процедур.
3. Возможность воспроизведения сообщений, вывода графиков и измеренных параметров сигнала.
4. Наличие готовых процедур, позволяющих снизить временные затраты при разработке математических преобразований и графического интерфейса пользователя.

Кроме того, часто при разработке многофункционального программного обеспечения возникает необходимость включения разработанного текста программы в комплексный программный продукт или использования ранее написанных функций в разрабатываемой программе. В этом случае важную роль играет популярность средств программирования для решения задач в выбранной предметной области. Поэтому в качестве дополнительного требования к средствам программирования следует рассматривать их популярность при решении задач обработки сигналов среди практикующих специалистов. Выполнение этого требования позволяет уменьшить проблемы «использования чужого кода в общем проекте», а также «использования старого кода в новом проекте».

Анализ известных средств программирования на соответствие перечисленным требованиям позволил установить, что в качестве основы обучения программированию следует рассматривать среды программирования Mathcad, MatLab, а также язык

программирования C++ с поддерживающей его средой визуального программирования (Visual C++, Qt Creator или C++Builder).

Основным назначением среды программирования Mathcad являются математические расчеты. Однако функции, реализованные в данной среде программирования, не оптимизированы с позиции временных затрат, а также не поддерживают больших объемов обрабатываемых данных, что существенно осложняет их применение при решении многих задач обработки сигналов.

Кроме того, при решении радиотехнических задач часто возникает необходимость разработки собственных функций, при этом не всегда для реализации математического преобразования, а, например, для воспроизведения сообщений или их сохранения в базе данных. Это требует применения средств программирования с более широкими возможностями, позволяющими реализовать функциональную или объектно-ориентированную парадигму программирования.

Тем не менее среда программирования Mathcad может использоваться для разработки программ, реализующих математические преобразования, не требующие обработки больших объемов данных, а также сложного графического интерфейса. Кроме того, она может применяться для контроля правильной работы математических процедур, разработанных с помощью других средств программирования.

Среда программирования MatLab предназначена не только для реализации математических расчетов, но и для моделирования радиотехнических устройств на основе графической библиотеки Simulink. Однако функции этой библиотеки, так же как и функции среды программирования Mathcad, не оптимизированы с позиции временных затрат и поддержки больших объемов обрабатываемых данных. Тем не менее при моделировании радиотехнических устройств использование среды программирования MatLab позволяет программисту существенно снизить временные затраты на разработку наименее важных процедур и сконцентрироваться на решении основной части задачи.

Таким образом, применение сред программирования Mathcad и MatLab целесообразно для решения таких задач, для которых в этих средах предусмотрены готовые решения. Это позволит существенно уменьшить время решения задачи за счет сокращения временных затрат на разработку и отладку программы. В остальных случаях целесообразно использовать среды программирования, основанные на универсальных языках программирования.

В настоящее время наиболее популярными универсальными языками программирования являются JAVA, C#, C, C++, Object Pascal (в среде программирования Delphi). При этом основу для разработки языков JAVA и C# составляют технологии, принятые в языке программирования C++, поэтому данные языки программирования имеют похожий синтаксис. Однако областью применения языков JAVA и C# является разработка программ для Интернета. Такие программы не имеют повышенных требований к используемой памяти, а их производительность ограничивается пропускной способностью сети передачи данных. Поэтому при их разработке можно отказаться от технологий контроля выделенной памяти, осложняющей разработку программ на языке C++. Тем не менее использование данной технологии предпочтительно при оперировании большими объемами данных, что характерно для загрузки сигналов из двоичных файлов и потоков.

Таким образом, первоначальная ориентация языков программирования JAVA и C# на задачи, не связанные с разработкой математических преобразований, не позволяет эффективно их использовать при решении задач обработки сигналов. Стоит также отметить, что знание технологий программирования и синтаксиса языка C++ позволяет при необходимости оперативно освоить языки JAVA и C#.

В свою очередь, С++ базируется на синтаксисе языка С и фактически является его расширенной версией за счет использования технологии объектно-ориентированного программирования, стандартной библиотеки шаблонов и механизма обработки исключений. Поэтому в настоящее время применение «чистого» языка С для решения задач обработки сигналов не целесообразно.

Следует также отметить, что с позиции решения задач обработки сигналов язык программирования С++ обладает следующими возможностями:

1) язык программирования С++ может использоваться для разработки программ с интерфейсом ввода данных, функционирующим без перезагрузки программы. При этом программы, разработанные на С++, могут запускаться на ПЭВМ без дополнительной установки среды программирования;

2) стандартная библиотека функций языка программирования С++ обеспечивает возможность разработки процедур, реализующих сложные математические преобразования сигнала, такие как дискретное преобразование Фурье, фильтрация сигнала, изменение частоты дискретизации и др;

3) в настоящее время язык С++ является языком программирования, составляющим основу визуальных сред программирования (Visual С++, Qt Creator и С++Builder), применение которых существенно снижает трудозатраты программиста при разработке процедур вывода графиков и сообщений различного вида.

Необходимо отметить, что другие языки программирования также составляют основу сред визуального программирования, например, усовершенствованный вариант языка Basic в среде Visual Basic или Object Pascal в среде программирования Delphi. Однако данные среды программирования (и их языки программирования) существенно уступают по популярности средам программирования, основанным на языке С++.

В настоящее время выбранные язык и среды программирования используются в учебном процессе кафедры, осуществляющей подготовку специалистов в области обработки радиосигналов. В частности, среда программирования MatLab составляет основу рабочей программы учебной дисциплины «Основы компьютерного моделирования и проектирования радиотехнических систем». В свою очередь, язык программирования С++, среда программирования С++Builder и среда программирования Mathcad изучаются в рамках учебной дисциплины «Основы программирования».

Содержание обучения в рамках указанных дисциплин включает:

- изучение характеристик средств программирования;
- изучение синтаксиса языков, положенных в основу сред программирования;
- изучение парадигм программирования, реализуемых с помощью этих средств;
- формирование первичных навыков применения средств программирования для реализации алгоритмов, составляющих основу решения задач обработки сигналов.

В частности, при формировании лекционного материала и практических заданий дисциплины «Основы программирования» основной упор сделан на реализацию процедур обработки радиосигналов. Поэтому при изучении этой дисциплины кроме тем, общепринятых при обучении программированию, добавлена тема, в ходе которой рассматриваются особенности применения языка программирования С++ для разработки таких процедур.

Углубление знаний, полученных в ходе лекций, осуществляется на практических занятиях, в ходе которых обучаемые разрабатывают программу моделирования и обработки случайного процесса, соответствующего модели радиосигнала. При этом результатом каждого практического занятия является завершенная программа, усложняемая в ходе последующих занятий.

Следует отметить, что дисциплина «Основы программирования» имеет практическую направленность, поэтому в качестве промежуточной аттестации выбран курсовой проект в ходе которого обучаемые самостоятельно разрабатывают компьютерную программу, в соответствии с алгоритмом, описанным в выданном задании.

В учебном плане на изучение дисциплины «Основы программирование» отведено 108 академических часов (3 зачетные единицы). Из них лекций – 26 ч, практических занятий – 22 ч, курсовой проект – 24 ч, самостоятельная подготовка – 36 ч.

С учетом ограниченного бюджета времени на изучение средств программирования в рамках учебной дисциплины «Основы программирования» навыки их применения вырабатываются также в ходе практических занятий по учебным дисциплинам «Сигналы радиотехнических систем» и «Модемы и кодеки», а также при проведении занятий по специальным дисциплинам. В рамках этих занятий обучаемые самостоятельно реализуют предложенные им алгоритмы обработки радиосигналов.

Кроме того, выбранные средства программирования используются при выполнении курсовых работ (проектов) по специальным дисциплинам и выпускной квалификационной работы. Следует отметить, что при выполнении выпускной квалификационной работы обучаемым предлагается самостоятельно выбрать средство программирования для решения поставленной задачи.

Необходимо также заметить, что успешному освоению выбранных средств программирования способствует их изучение после цикла математических и естественнонаучных дисциплин, развивающих способность к алгоритмическому мышлению и разработке вычислительных алгоритмов.

Таким образом, распределение времени изучения языка и сред программирования между учебными дисциплинами, формирующими навыки обработки радиосигналов, позволило перейти от обучения курсантов по методу, основанному на демонстрации и разборе готовых текстов программ, к классическому методу обучения программированию. В настоящее время эффективность такого подхода подтверждена при проведении практических занятий по учебной дисциплине «Сигналы радиотехнических систем». В частности, значительная часть обучаемых (85% учебной группы) без дополнительной помощи преподавателя и других обучаемых справилась с заданиями на практические занятия, включающие разработку программы.

Результат выполненной работы показывает, что основой формирования компетенции программирования при освоении образовательных программ подготовки специалистов в области обработки радиосигналов является классический метод обучения программированию. Реализация этого метода в условиях ограниченного бюджета времени достигается за счет правильного выбора изучаемых средств программирования и распределения времени их изучения между учебными дисциплинами, формирующими не только навыки программирования, но и непосредственно навыки обработки радиосигналов.

Кроме того, изучение средств программирования целесообразно после изучения математических и естественно-научных дисциплин, развивающих способность к алгоритмическому мышлению и разработке вычислительных алгоритмов.

Эффективность предложенного подхода к обучению программированию подтверждена в ходе проведения практических занятий в рамках учебных дисциплин, преподаваемых на выпускающей кафедре, осуществляющей подготовку специалистов в области обработки радиосигналов.

### **Список используемых источников**

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – специалитет по специальности 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы», утвержденный приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 9 февраля 2018 года № 95. – М.: Минобрнауки России, 2018. – 25 с.

2. Шитилина Л.А. Методология и методы психолого-педагогических исследований: учеб. пособие для аспирантов и магистрантов по направлению «Педагогика». – 3-е изд. стер. – М.: ФЛИНТА, 2011. – 204 с.

3. *Бабенко В.В., Гольчевский В.В.* Выбор языков программирования и средств проектирования для обучения специалистов по направлению «Прикладная информатика» – Прикладная информатика. – 2013. – №4(46). – С. 43–49.

4. *Смирнова О.В.* Разработка содержания обучения программированию в системе информационной подготовки бакалавра математики: автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.02 / Смирнова Ольга Вячеславовна. – М., 2005. – 16 с.

5. *Иванова Л.В., Чекушина В.Е.* Методы и формы обучения программированию в вузе // Сб. науч. тр. SWorld. – Одесса, 2013. – Вып. 3, т. 17. – С.18–22.

6. *Бобровский С.И.* Программная инженерия. – СПб.: Питер, 2003. – 222 с.

В.П. Башкирцев,  
*кандидат педагогических наук;*  
М.Ю. Касавцев,  
*кандидат техн. наук*

## **ПРОТИВОРЕЧИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИЧНОСТНЫХ КАЧЕСТВ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ В ПРОЦЕССЕ ВОИНСКОГО ВОСПИТАНИЯ ПРИ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ: СОСТОЯНИЕ, ПУТИ И СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ**

В работе определены два проблемных аспекта воспитания военнослужащих. По результатам проведенного авторами исследования сформулированы предложения по оптимизации процесса воспитания военнослужащих в части касающейся формирования личностных качеств. Рассмотренные в работе предложения включают в себя разработанные модель процесса формирования личностных качеств военнослужащих при повседневной деятельности и методические рекомендации по совершенствованию процесса формирования личностных качеств у военнослужащих при повседневной деятельности. Также приведены результаты их апробации в подразделениях академии.

Ключевые слова: командир подразделения, воспитательное воздействие, формирование личностных качеств у военнослужащих, повседневная деятельность, влияние в процессе взаимодействия, коррекция формируемых личностных качеств военнослужащих.

В настоящее время кроме переоснащения и перевооружения Вооруженных сил Российской Федерации отмечается изменение требований к военно-профессиональной подготовке и компетенциям военных специалистов. Одной из важнейших составляющих компетенций военных специалистов являются личностные качества военнослужащего, в формировании которых основную роль играют воспитательные воздействия (воспитание), оказываемые командиром на личность военнослужащего в процессе воинского воспитания. Тематика совершенствования воинского воспитания, рассматриваемая в данной публикации, приобретает особую актуальность в свете требований заместителя министра обороны, начальника Главного военно-политического управления генерал-полковника А.В. Картаполова: «Сейчас работа с личным составом носит слишком обобщенный характер. А мы должны перейти от работы с личным составом в целом к работе с каждым человеком, к индивидуально-воспитательной работе, которая на сегодняшний день оставляет желать лучшего» [9].

Анализ научных публикаций по теме исследования показал, что ряд ученых исследовали данную задачу с разных ракурсов. Вопросы формирования командиром личностных качеств военнослужащих при обучении и воспитании подчиненных с позиции теоретических основ военной психологии и педагогики рассматривались в коллективных работах под общей редакцией А.В. Барабанщикова [19], О.Ю. Ефремова [3], А.Г. Маклакова [22], А.Г. Караяни и И.В. Сыромятникова [21] и др. С практической точки зрения решением частных вопросов формирования личностных качеств при воспитании военнослужащих в повседневной деятельности на основе личного примера командира занимались В.А. Губин и Д.А. Егоров [7]. Авторы О.В. Фомичева, Л.П. Ильиченко и Л.П. Писаренко в работе [31] рассмотрели данный вопрос с точки зрения лидерских качеств командира, а М.В. Барановский и В.И. Веремчук [1] – с позиции уровня доверия к личности командира у подчиненных.

В Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского вопросами теории рассматриваемой тематики всесторонне занимались Я.Я. Юрченко, А.С. Дубинин, В.П. Башкирцев, И.В. Дурнов, Н.В. Ершов, Н.А. Репях и другие исследователи [23]. Над вопросами методики и практики воспитания и формирования личностных качеств военнослужащего работали

М.А. Горшков и С.Ю. Окунев. Авторы проанализировали особенности содержания патриотического воспитания в военной структуре государства и в военном вузе, а также показали влияние содержания учебной дисциплины «Военная история» на формирование патриотизма курсантов [6].

Основные направления военно-педагогического процесса в военном учебном заведении Министерства обороны Российской Федерации и особенности реализации требований к профессиональной подготовке обучающихся исследовали А.В. Тарасов и Е.В. Шалонов [26, 27]. Авторами Р.Ф. Фаттаховым и А.А. Федирко [30] разработан вариант обобщенной модели психодиагностического средства и использования в ходе воспитания военнослужащих.

Исследованиями диагностики особенностей развития личности военнослужащего в профессиональной деятельности командиров и военных преподавателей в целях совершенствования системы воинского обучения и воспитания в военном вузе занимались М.Ю. Касавцев, Е.А. Михайлова и Н.В. Селихина в работе [12].

Рассмотреть личность курсанта военного вуза как динамическую биосоциальную систему, развивающуюся во времени, предложили в своей публикации [8] Л.А. Иноземцева и Н.С. Кужекин, которые там же описали разработанные ими рекомендации по формированию личностных качеств курсантов в ходе образовательной деятельности.

Авторы Н.В. Курдай, А.Б. Пауков и Р.Ф. Фаттахов [15] рассмотрели воспитание военнослужащих как часть служебной деятельности курсового офицера-преподавателя, а также определили направления подготовки офицеров к выполнению должностных обязанностей и разработки содержания модуля рабочей программы, освоение которого позволяет сформировать необходимые компетенции.

Исследование готовности командиров подразделений к обучению в системе личностно-ориентированной непрерывной подготовки с целью обеспечения профессиональной компетентности проводилось Н.Б. Кунтуровой и А.М. Шелудяковым в публикации [14].

Анализ существующих научных публикаций и методических разработок, а также текущего состояния процесса формирования лидерских качеств позволил сформулировать два проблемных аспекта воспитания военнослужащих:

– *первый*: в свете требований к личностным качествам военнослужащего [4, 16, 25], на практике, при формировании воспитательного воздействия на личность военнослужащего, отсутствует общепринятая модель процесса формирования личностных качеств военнослужащих при повседневной деятельности;

– *второй*: нынешнее состояние методических разработок и практических рекомендаций по вопросам формирования личностных качеств военнослужащих не удовлетворяет в полной мере системно-деятельностному подходу в воинском обучении и воспитании.

Выявление проблемных аспектов воспитания военнослужащих определило цель данной работы. Это – разработка предложений по совершенствованию некоторых проблемных аспектов воспитания военнослужащих при повседневной деятельности.

Кроме того, проведенный анализ научных публикаций позволил выявить противоречие между существующими требованиями к личностным качествам военнослужащего [4, 18, 25], с одной стороны, и обновленными требованиями по воспитанию военнослужащих, изложенных в известном документе [16], а также измененными требованиями о порядке прохождения военной службы в Вооруженных силах Российской Федерации [24] – с другой. Поиск путей разрешения данного противоречия актуализировал проведение данного исследования.

Авторами была выдвинута гипотеза исследования, согласно которой решение проблемных аспектов воспитания военнослужащих с использованием модели процесса формирования личностных качеств военнослужащих при повседневной деятельности (далее – модели) и методических рекомендаций по совершенствованию процесса формирования личностных качеств у военнослужащих при повседневной деятельности (далее – методических рекомендаций), разработанных авторами, позволит разрешить существующее противоречие.

При проведении исследования авторы использовали определенный понятийный аппарат. Например, определение «личность» предполагает относительно устойчивую целостную систему интеллектуальных, морально-волевых и социально-культурных качеств военнослужащего, выраженных в индивидуальных особенностях его сознания и деятельности [13, 20]. Под «воздействием» понимается активное влияние субъекта на объект, не обязательно явное или с обратной связью [5]. Понятие «влияние» подразумевает процесс и результат изменения командиром поведения военнослужащего, его установок, намерений, представлений, оценок в ходе повседневного взаимодействия с ним, где под взаимодействием будем понимать общение [2]. Термин личностные качества подразумевает сложные биологические и социально обусловленные компоненты личности военнослужащего [22]. Под воспитанием военнослужащих будем понимать определение, сформулированное в работе [3] О.Ю. Ефремовым, который рассматривал его как процесс и результат целенаправленного влияния на развитие личности военнослужащего, ее качеств, отношений, взглядов, убеждений, способов поведения.

Эмпирическое исследование было проведено авторами с использованием методов анализа научных публикаций, опроса и тестирования военнослужащих, наблюдения за военнослужащими при выполнении мероприятий повседневной деятельности. Схема его представлена на рис. 1. Новизна полученных результатов заключается в расширении методического «арсенала» командира подразделения при воспитании подчиненных посредством использования при выполнении мероприятий повседневной деятельности результатов, полученных авторами.



Рис. 1. Схема исследования

При априорной оценке исследуемого вопроса проводилось наблюдение за военнослужащими при выполнении мероприятий повседневной деятельности. Результаты наблюдения показали, что командир подразделения не всегда эффективно формирует воспитательное воздействие на личность подчиненного, прежде всего с точки зрения личного примера командира. Иначе говоря, слова командира зачастую расходятся с делом. Для подтверждения результата наблюдений авторы провели опрос выборки военнослужащих, который проводился с целью получения информации о факторах существенного влияния на личность военнослужащего при повседневной деятельности (табл. 1). Выборка составила 117 военнослужащих (курсанты 2, 3, 4-го курсов различных факультетов).

На практике командиры подразделений являются примером выполнения служебных обязанностей только для половины (54%) опрошенных респондентов (табл. 1). Соответственно существует необходимость коррекции работы командиров и акцентирования внимания на совершенствовании личной примерности в процессе воспитания военнослужащих при выполнении мероприятий повседневной деятельности.

Таблица 1

**Результаты опроса военнослужащих о факторах существенного влияния на личность  
военнослужащего при повседневной деятельности**

Место	Кто (что) по Вашему мнению, наиболее ощутимо влияет на Вас при выполнении обязанностей военной службы?	Результат, %
1	Близкий(е) родственник(и) (отец, дед и т. п.)	8
2	Пример(ы) из истории войн, боевых действий, армейских традиций	67
3	Командир(ы)	54
4	Пример(ы) из жизни выдающихся государственных и военных деятелей, исторических личностей	52
5	Пример(ы) военнослужащих образцово исполняющих обязанности военной службы	24

Определение степени воспитательного воздействия отдельных категорий командиров на военнослужащего в повседневной деятельности проводилось при помощи теста «Умеете ли Вы влиять на других?» (по Г. Райтаровой). Результаты приведены в табл. 2. Тест проводился для того, чтобы выявить степень воспитательного воздействия командира на их личностные качества при выполнении мероприятий повседневной деятельности. Более двух третей военнослужащих (около 64,5%) отметили эффективное влияние на них командиров-офицеров. Командирам-сержантам оказывать эффективное влияние удастся только в 50,5% случаев (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты тестирования военнослужащих для определения степени воспитательного  
воздействия отдельных категорий командиров на военнослужащего в повседневной  
деятельности**

Место	Категории командиров	Эффективно воздействуют, %	Влияют не очень эффективно, %
1	Командир отделения, командир учебной группы	56	44
2	Старшина курса	45	55
3	Курсовой офицер	61	39
4	Начальник курса	68	32

Для формирования эффективного воспитательного воздействия командиром подразделения на личность военнослужащего личность самого командира должна соответствовать определенным требованиям. За основу требований к личности командира подразделения был взят перечень требований к военно-профессиональным качествам офицера, изложенный на официальном сайте Минобороны [4]. По сути, это – компетенции (знания, умения, навыки и личностные качества), которыми должен обладать офицер Вооруженных сил Российской Федерации. Используем этот перечень в своей работе и рассмотрим эти качества.

*Военно-профессиональная компетентность* базируется прежде всего на военно-профессиональных знаниях, необходимых для безусловной способности применить их в совокупности с навыками и умениями в интересах образцового исполнения обязанностей по службе. Объем и содержание знаний, навыков, умений, определяются требованиями, предъявляемыми к должности.

*Дисциплинированность* офицера проявляется в его внутренней убежденности, в необходимости сознательного выполнения требований законов Российской Федерации, военной присяги, общевоинских уставов, умения управлять своим поведением в любой обстановке.

*Командирская воля* – это целеустремленность, инициатива, самостоятельность, решительность, настойчивость в достижении целей; требовательность к себе и подчиненным; выдержка и самообладание; умение подчинить людей своей воле и выполнить поставленные задачи в любых условиях обстановки.

*Организаторские способности* – это умелое определение главного звена в работе, подбор нужных исполнителей и четкое распределение обязанностей между ними, возможность мобилизовать подчиненных на эффективное выполнение задач, твердое и непрерывное управление подчиненным подразделением в боевой обстановке, обеспечение контроля исполнения, создание в подразделении благоприятного морально-психологического климата.

*Творческая активность* – это инновационный подход, инициатива, неустанный поиск новых путей с целью решения поставленной перед подразделением задачи, предвидение и интуиция.

*Психологические качества* обеспечивают офицеру психологическую устойчивость, уверенность и способность быстро ориентироваться в часто меняющейся обстановке, принимать грамотные решения, переносить тяготы, суровые испытания и лишения военной службы, преодолевать страх и т. п.

*Физические качества*, присущие волевой и физически развитой (привлекательной) личности, – это различные стороны проявления двигательных возможностей военнослужащего, выносливость, сила, быстрота и ловкость и др. [17].

Таким образом, для совершенствования процесса воинского воспитания по первому проблемному аспекту была разработана модель процесса формирования личностных качеств военнослужащих при повседневной деятельности. Модель включает в себя совокупность рассмотренных выше военно-профессиональной компетентности (ВПК) и личностных качеств (ЛК) командира подразделения (рис. 2), адекватных военной профессии и должностным обязанностям, и предполагает способность и умение применять их командиром в военно-педагогическом процессе.

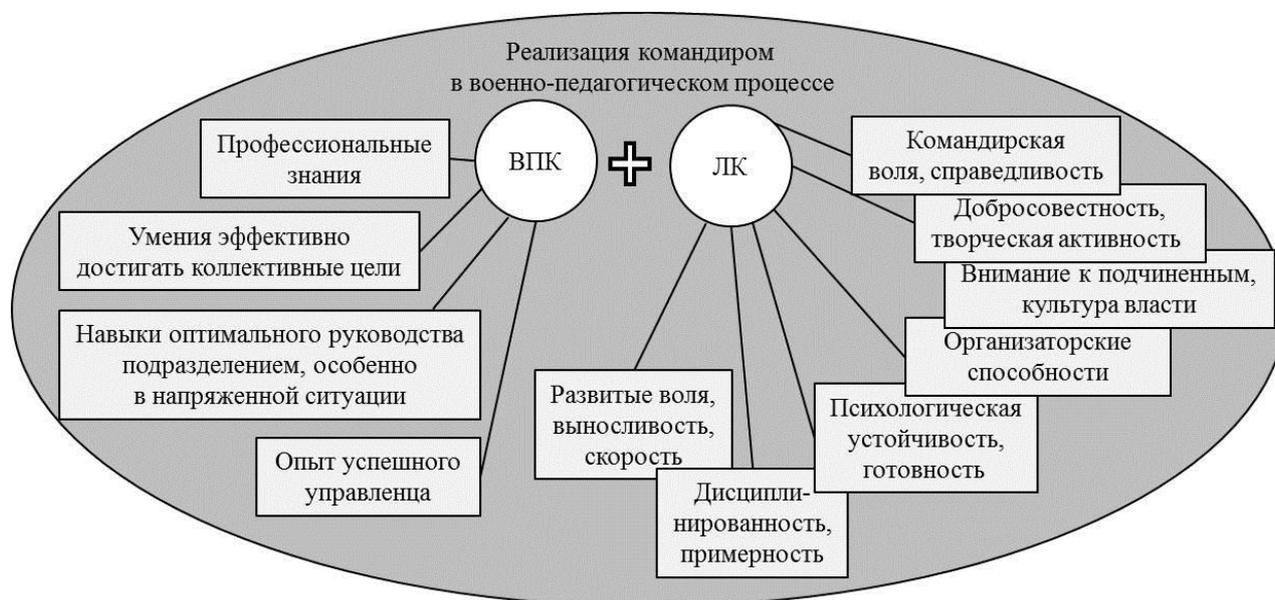


Рис. 2. Модель процесса формирования личностных качеств военнослужащих при повседневной деятельности

Адекватным решением по второму проблемному аспекту, по мнению авторов, стали разработка методических рекомендаций по совершенствованию процесса формирования личностных качеств у военнослужащих. Сформулируем положения методических рекомендаций.

1. *Формирование у командира подразделения высоконравственной мотивации для оказания педагогической помощи подчиненным* [29]. Командиру подразделения важно понимать, что от стиля взаимодействия офицера со своим подчиненным, осуществляющегося в форме гуманного и оперативного сотрудничества, когда целесообразно применяется целый спектр соответствующих возникающим ситуациям методов и приемов, в целом зависит сила мотивации высокодисциплинированного поведения военнослужащих.

2. *Широкое использование командирами подразделений метода примера для воспитания подчиненных* [11]. Необходимо учитывать, что при совместной деятельности с подчиненными происходит формирование необходимых молодому военнослужащему качеств под воздействием личного примера командира (преподавателя, офицеров управления, отделов и служб), т. е. воздействие личности на личность.

3. *Совершенствование педагогического мастерства командиров подразделений*. Командиру важно постоянно помнить о том, что обучение и воспитание подчиненных осуществляется за счет педагогического воздействия, структура которого рассмотрена в работе [10]. С учетом рассмотренной структуры формируется педагогическое воздействие на личность военнослужащих командиров подразделений (курсантских и учебных) не только при проведении еженедельных занятий, которые проводятся в подразделении и являются основной работой по воинскому обучению и воспитанию подчиненных, но также при выполнении мероприятий повседневной деятельности.

4. *Постоянное стремление к обучению командиром лично, мотивирование и коррекция командиром процессов самообучения и саморазвития подчиненных, военно-профессиональной подготовки и формирования личностных качеств военнослужащих* [28]. Отсутствие прироста знаний в области военно-профессиональной деятельности (независимо от причин) неизбежно приводит командира подразделения к профессиональному краху. Поэтому для военнослужащих командного звена практически постоянно необходимо обучаться и самообучаться (необходимы чтение и анализ литературы и научных публикаций; общение с опытными, заслуженными командирами; обмен опытом с коллегами-командирами; активное посещение занятий, проводимых в рамках учебно-методических сборов и профессионально-должностной подготовки; поиск и апробация новых способов и приемов воспитания личного состава и т. п.).

5. *Обеспечение тщательного планирования и осуществления подбора кандидатов на должности младших командиров*. Существует проблема «потери» сержантских кадров, т. е. на определенном этапе обучения какой-либо сержант подразделения либо пишет рапорт с просьбой освободить его от занимаемой должности или отстраняется от должности командиром подразделения из-за неспособности обучать, воспитывать и руководить подчиненными. Конечно, это явление не является системным, но важно понимать, что за каждым сержантом стоят подчиненные, и каждая смена командира – это своего рода стресс для коллектива. При этом наносится урон практически всем сторонам повседневной деятельности, включая моральный урон не состоявшемуся младшему командиру, что в половине случаев приводит впоследствии к их неуставному поведению, а на младших курсах – отчислению по причине разочарования в службе. Именно поэтому, говоря о процессе формирования личностных качеств в повседневной деятельности, необходимо помнить и об авторитетном, грамотном и обученном сержантском составе.

6. *Организация планомерной и систематической работы по обучению сержантского состава подразделения*. Недостаточно правильно подобрать кандидатов на должности младших командиров. Необходима еще и кропотливая работа по обучению сержантов, созданию и поддержанию авторитета военнослужащих младшего командного звена с применением всего методического арсенала и потенциала командира подразделения.

Апробация данных методических рекомендаций в подразделениях академии была проведена в течение весеннего семестра 2018 года. Затем, в рамках апостериорной оценки, было проведено тестирование военнослужащих с целью уточнения уровня сформированности

личностных качеств военнослужащих и выявления приоритетных направления для акцентированной работы по совершенствованию отдельных личностных качеств у различных категорий военнослужащих. Результаты теста «до» и «после» применения методических рекомендаций по совершенствованию формирования личностных качеств у военнослужащих приведены в табл. 3. По мнению различных категорий респондентов, самым значимыми в профессиональном смысле личностными качествами как «до», так и «после» исследования оказались психологические качества (табл. 3), следовательно, работу командиров подразделений при формировании воспитательного воздействия на личность военнослужащего необходимо планировать с учетом выявленной особенности.

Таблица 3

**Результаты опроса военнослужащих для определения приоритетных личностных качеств командира подразделения**

Качества	«До»		«После»	
	Результат, %	Место	Результат, %	Место
Психологические качества	74	1	76	1
Физические качества	55	2	44	6
Организаторские способности	53	3	48	5
Дисциплинированность	48	4	51	3
Компетентность	41	5	50	4
Творческая активность	41	5	42	7
Командирская воля	40	7	52	2

В течение года (осенний семестр 2017 года – весенний семестр 2018 года) командирам исследуемых подразделений была оказана методическая помощь с применением разработанных авторами модели и рекомендаций. А в ходе осеннего семестра 2018 года была проведена апостериорная оценка исследуемого вопроса, в результате было установлено следующее:

- во всех подразделениях респонденты отмечают рост личной примерности командиров ротного звена, в среднем прирост составил 11%;
- произошло перераспределение значимости личностных качеств командира для участников выборки (табл. 3). Так, в тройку вошли психологические качества (не изменились), командирская воля (были физические качества), дисциплинированность (были организаторские способности); далее по убыванию: компетентность, организаторские способности, физические качества и творческая активность;
- большее число респондентов стали отмечать значимость для них примеров военнослужащих образцово исполняющих обязанности военной службы (36%);
- при формировании воспитательного воздействия на военнослужащего командиру подразделения необходимо строить свою работу непременно с учетом своих личностных качеств;
- совершенствование личностных качеств военнослужащих – процесс, который нуждается в регулярной коррекции как для командиров, так и для подчиненных;
- личностные качества военнослужащего поддаются формированию как с акцентом на отдельном качестве (можно использовать при коррекции педагогического воздействия), так и всесторонним охватом (при организации процесса формирования личностных качеств у военнослужащих в подразделении).

Таким образом, результатами проведенного исследования стали модель процесса формирования личностных качеств военнослужащих при повседневной деятельности и методические рекомендации по совершенствованию процесса формирования личностных качеств у военнослужащих при повседневной деятельности, которые легли в основу предложений по совершенствованию двух выявленных проблемных аспектов воспитания военнослужащих.

Применение полученных результатов командирами подразделений на практике позволило достичь качественного совершенствования личностных качеств военнослужащих, а также повысить авторитет командиров различных категорий и значимость военной службы у военнослужащих.

### Список используемых источников

1. Барановский М.В., Веремчук В.И. Социальные аспекты отношений доверия в процессе руководства воинским подразделением // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2015. – № 1 (24). – С. 92–97.
2. Большая психологическая энциклопедия. – URL: <https://psychology.academic.ru/308/> (дата обращения: 20.03.2018).
3. Военная педагогика: учеб. для вузов / под ред. О.Ю. Ефремова. – СПб.: Питер, 2017. – 640 с.
4. Военно-профессиональные качества. – URL: <http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12822%40morfDictionary> (дата обращения: 17.02.2018).
5. Воздействие. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Воздействие> (дата обращения: 20.04.2018).
6. Горшков М.А., Окунев С.Ю. Нормативно-правовые и содержательные аспекты патриотического воспитания курсантов военного вуза в ходе изучения учебной дисциплины «Военная история» // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 658. – С. 219–224.
7. Губин В. А., Егоров Д. А. Психолого-педагогическая модель воспитания военнослужащих-контрактников на личном примере офицера // Ученые записки. – 2014. – № 7 (113). – С. 50–58.
8. Иноземцева Л.А., Кужекин Н.С. К вопросу о пределах педагогического воздействия на индивидуально-психологические свойства личности курсанта военного вуза // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 214–218.
9. У советской системы позаимствуем лучшее, но содержание изменим: интервью генерал-полковника Андрея Картаполова // Звезда (еженедельник). – URL: <https://zvezdaweekly.ru/news/t/2018910933-EN4aF.html> (дата обращения: 14.09.2018).
10. Касавцев М.Ю. К вопросу совершенствования педагогического мастерства офицерского состава в военно-учебных заведениях // Приволжский науч. вестн. – 2016. – № 7 (59). – С.81–85.
11. Касавцев М.Ю. Методика воспитания военных специалистов на личном примере офицера // Альманах современной науки и образования. – 2016. – № 2 (104). – С.63–65.
12. Касавцев М.Ю., Михайлова Е.А., Селихина Н.В. Учет возрастных и психологических особенностей развития личности курсанта в системе обучения и воспитания военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 194–198.
13. Краткий словарь философских терминов. – URL: <http://nenuda.ru/краткий-словарь-философских-терминов.html> (дата обращения: 15.04.2018).
14. Кунтурова Н.Б., Шелудяков А.М. К вопросу формирования готовности офицеров-руководителей воинских коллективов военных вузов к обучению в системе личностно-ориентированной непрерывной подготовки // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2012. – Вып. 635. – С. 103–105.
15. Курдай Н.В., Пауков А.Б., Фаттахов Р.Ф. Система подготовки курсового офицера-преподавателя к образовательной деятельности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 657. – С. 185–190.
16. Об организации работы с личным составом в Вооруженных Силах Российской Федерации: приказ министра обороны Российской Федерации № 655 от 12 октября 2016 года. –

URL:<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=680435#08379010356820162> (дата обращения: 13.04.2018).

17. Об утверждении Наставления по физической подготовке в Вооруженных Силах Российской Федерации: приказ министра обороны Российской Федерации № 200 от 21 апреля 2009 года. – URL: <http://base.garant.ru/195845/> (дата обращения: 18.04.2018).

18. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации. – Ростов: Феникс, 2018. – 732 с.

19. Педагогика и психология высшей военной школы / под ред. А.В. Барабанщикова – М.: ВПА им. В.И. Ленина, 1979. – 283 с.

20. Проблема личности в психолого-педагогической литературе. – URL: [http://studbooks.net/719863/psihologiya/problema\\_lichnosti\\_psihologo\\_pedagogicheskoy\\_literature](http://studbooks.net/719863/psihologiya/problema_lichnosti_psihologo_pedagogicheskoy_literature) (дата обращения: 13.05.2018).

21. Прикладная военная психология: учеб. пособие / А.Г. Караяни, И.В. Сыромятников. – СПб.: Питер, 2006. – 480 с.

22. Психология и педагогика. Военная психология: учеб. для вузов / под ред. А.Г. Маклакова. – СПб.: Питер, 2005. – 464 с.

23. Психология и педагогика: учеб. пособие / И.В. Дурнов, Н.В. Ершов, В.П. Башкирцев и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 515 с.

24. Российская Федерация. Законы. О воинской обязанности и военной службе: федеральный закон № 53 от 28 марта 1998 года. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_18260/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_18260/) (дата обращения: 13.04.2018).

25. Российская Федерация. Законы. О статусе военнослужащих: федеральный закон № 76 от 27 мая 1998 года. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_18853/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_18853/) (дата обращения: 13.04.2018).

26. *Тарасов А.В., Шалонов Е.В.* Военно-педагогический процесс в вузе Министерства обороны Российской Федерации: особенности протекания и актуальные проблемы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 657. – С. 191–195.

27. *Тарасов А.В., Шалонов Е.В.* Воинский коллектив как воспитатель военнослужащих: актуальные проблемы теории и практики // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 656. – С. 243–246.

28. *Устинов И. Ю.* Методика работы командира по поддержанию правопорядка и укреплению воинской дисциплины: учебно-метод. пособие. – Воронеж: ВВВАИУ, 2007. – 190 с.

29. *Фаттахов Р.Ф., Пауков А.Б., Курдай Н.В.* Система подготовки курсового офицера-преподавателя к образовательной деятельности // Тр. Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 657. – С. 185–190.

30. *Фаттахов Р.Ф., Федирко А.А.* Проблемы разработки и применения психодиагностических средств в работе по укреплению воинской дисциплины // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского – 2016. – Вып. 655. – С. 183–189.

31. *Фомичева О.В., Ильиченко Л.П., Писаренко Л.П.* О лидерстве военнослужащих и направлениях его формирования средствами воинского воспитания // Человек и образование. – 2015. – №1 (42). – С. 38–43.

О.В. Кофнов,  
кандидат техн. наук;  
А.М. Шелудяков,  
кандидат военных наук

## **ФОРМИРОВАНИЕ НАВЫКОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЯХ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКЕ**

Представлена методика формирования навыков моделирования структурных схем с помощью программного комплекса в рамках освоения курсантами дисциплины «Инженерная и компьютерная графика». Созданный программный комплекс может быть использован не только в учебных, но и в конструкторских задачах.

Ключевые слова: профессиональное образование, структурная схема, компьютерная графика, Excel, Graphviz, БСУ, граф, DOT, VBA.

В процессе изучения дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» курсанты знакомятся с правилами и выполняют на практике структурную схему электронного устройства. Учитывая направленность их подготовки, связанную с информационными технологиями, целесообразно включить в программу обучения как можно больше компьютерных средств, автоматизирующих работу в области графических построений, но при этом и прививающих обучаемым знания основных положений стандартов ЕСКД в части схем [1].

На кафедре начертательной геометрии и черчения уже используется пакет Microsoft Visio для выполнения курсантами электрической структурной схемы [2]. Если пакет КОМПАС-3D является специализированным, отдельно приобретаемым программным обеспечением, то такие офисные программы, как Microsoft Visio и, особенно, Microsoft Excel, являются весьма распространенными и установлены на очень многих компьютерах как в стенах академии, так и за ее пределами. Для построения схемы может быть использован пакет визуализации графов Graphviz [3], который является свободно распространяемым, имеет открытый исходный код и может быть легко установлен пользователем как на компьютер под управлением Microsoft Windows, так и операционной системы Linux, в последнее время находящей широкое применение в Вооруженных силах Российской Федерации [4].

Замысел внедрения программных продуктов в курс обучения инженерной графике состоял в сближении ее (как профессионально-ориентированной дисциплины) с другими предметами, изучаемыми курсантами в те же семестры – «Информационные технологии», «Программирование», «Основы автоматизированных систем». По завершении обучения курсант обязан уметь выполнять построение схем не только с помощью линейки и карандаша, но и с использованием современных компьютерных средств. В процессе выполнения практического задания курсанты привлекают помимо знаний стандартов ЕСКД свои навыки в области программирования и системотехники. Немалая роль уделяется тому, чтобы заинтересовать курсантов (как всех увлекающихся компьютерами молодых людей) в самостоятельном освоении полезных программ, использовании их для выполнения учебных задач и изучении дополнительной литературы, связанной с компьютерной графикой.

Курсантам – будущим специалистам в области автоматизированных систем управления и обработки информации – ставится задача из подручного программного обеспечения собрать комплекс для автоматизированного построения электрической структурной схемы бортовой системы управления (БСУ) космического аппарата [5]. В качестве исходных данных они по-

лучают список входящих в состав БСУ устройств и описание связей между ними. Также может быть выдан выполненный от руки черновик или набросок схемы (рис. 1).

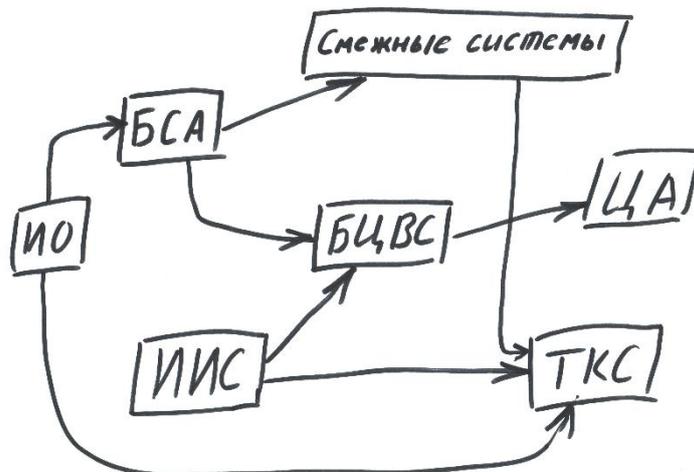


Рис. 1. Набросок схемы от руки

Задание выполняется курсантом в такой последовательности:

- 1) знакомство с правилами построения структурных схем;
- 2) выдача задания на выполнения структурной схемы БСУ;
- 3) уяснение задания, запуск компьютера и необходимых для выполнения задания программ;
- 4) подготовка в Microsoft Excel списка оборудования и таблицы связей;
- 5) написание на языке Visual Basic for Applications (VBA), встроенном в Microsoft Excel, короткой программы, формирующей код на языке DOT для программы Graphviz, и ее исполнение;
- 6) запуск полученного кода на языке DOT в среде Graphviz и сохранение графического файла с автоматически построенной схемой на компьютере
- 7) представление выполненной схемы на проверку и ответы на контрольные вопросы преподавателя.

Таблицы списка устройств и соединений между ними выполняются на отдельных листах книги Microsoft Excel. Данная таблица нужна для расшифровки оборудования на схеме, а также для возможности задания дополнительных свойств отдельных узлов для их последующего отображения на схеме в виде условных графических элементов.

Главной для дальнейшего построения схемы является таблица связей. На основании данных этой таблицы будет программно сформирован код на языке DOT [6] для пакета Graphviz, который автоматически начертит схему. Каждому устройству должно быть присвоено уникальное короткое буквенно-цифровое обозначение (колонок *Id* на листе Excel со списком оборудования).

Теперь курсантам необходимо написать короткую программу на языке VBA. Это достаточно простой и распространенный язык программирования, с освоением азов которого курсант может справиться за несколько минут. Кроме того, на этом этапе преподаватель может либо помочь группе, либо предложить самостоятельную коллективную работу, направленную на развитие военной смекалки и взаимовыручки.

В результате курсантами должна быть создана программа, которая может быть выполнена Graphviz, являющимся свободно распространяемым компьютерным приложением, написанным и поддерживаемым сообществом независимых программистов, приложением с открытым программным кодом, что позволяет безопасно использовать его в самых различных областях. Дистрибутив программы может быть бесплатно скачан с сайта [3] и развернут на любом компьютере под управлением операционной системы Microsoft Windows или Linux.

При этом установка программы не занимает много времени и не требует специальных знаний. После использования программа может быть так же легко удалена с компьютера.

Запускается программа *gvedit.exe*. Через меню “File – New” открывается окно текстового документа, в которое вставляется описание графа из ячейки третьего листа книги Excel (рис. 2).



Рис. 2. Ввод описания схемы в Graphviz

Затем через команду “Graph – Layout” выполняется автоматическое построение графа по заданному описанию (рис. 3).

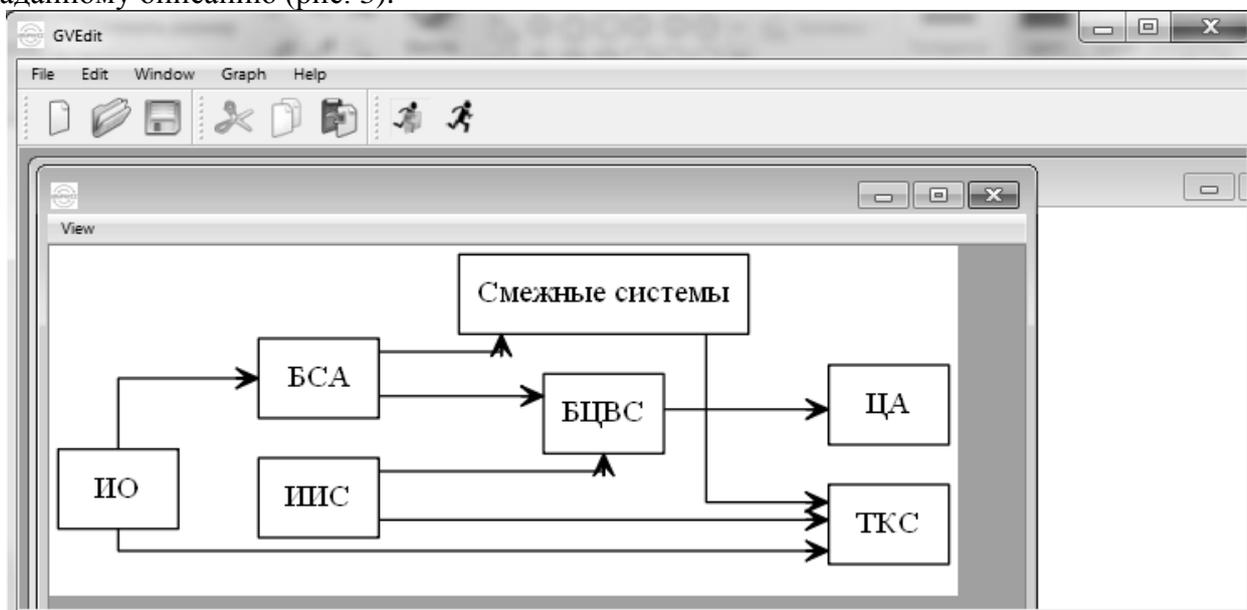


Рис. 3. Окно Graphviz после построения схемы

Полученная схема сохраняется в графический файл *graph1.png*, который в дальнейшем может быть отредактирован любым графическим редактором.

Главным достоинством пакета Graphviz является то, что он автоматически располагает отдельные элементы схемы так, чтобы они равномерно занимали лист с изображением, а соединительные линии не пересекались или имели минимум пересечений.

Книга Excel с макросом *gv* может быть использована многократно для построения схем различных устройств. При этом лишь заполняются новыми данными таблицы на первом и

втором листах. Наиболее успешные и перспективные курсанты могут доработать в часы самостоятельной подготовки программу таким образом, чтобы получалась более сложная схема, включающая, например, функциональные группы. В результате Graphviz может построить схему, показанную на рис. 4.

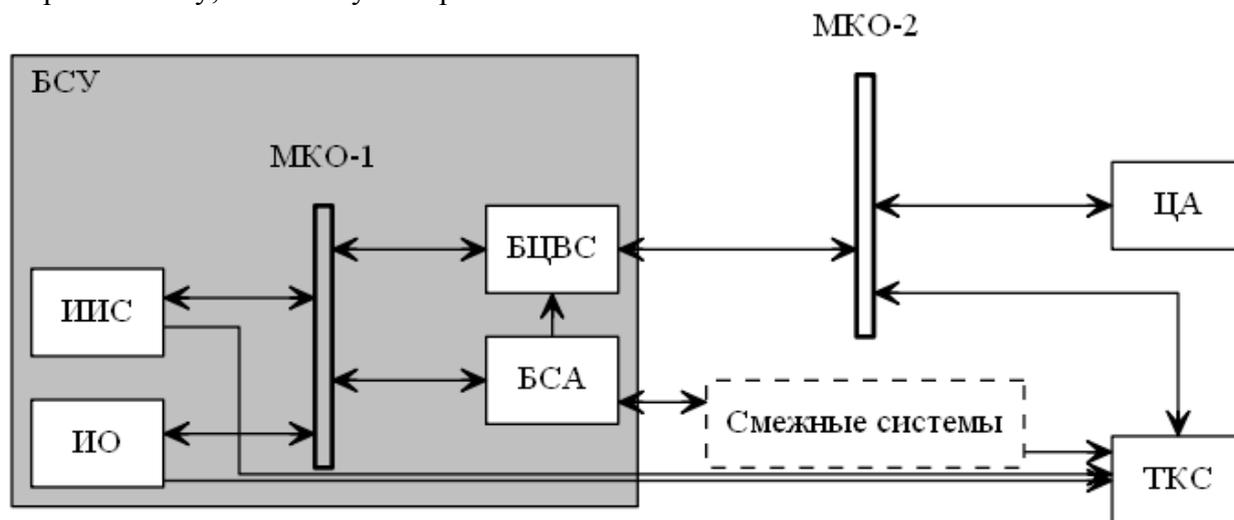


Рис. 4. Схема БСУ с функциональными группами

Схема на рис. 4 весьма близка к приводимой в работе [5]. Следует отметить, что в силу особенностей Graphviz, которые могут быть устранены благодаря его открытой архитектуре, структурная схема строится с некоторыми отклонениями от стандарта [1]. Однако в данном случае курсанты самостоятельно должны найти эти нарушения и исправить, используя любой графический редактор (например, Microsoft Paint).

В конце занятия курсанты представляют на проверку преподавателю построенную в соответствии с заданием структурную схему и программу для ее построения на языке DOT. Проверка сформированных навыков курсанта осуществляется посредством контрольных вопросов, связанных с едиными требованиями стандартов по выполнению структурных схем, особенностями работы пакета Graphviz, возможностью оперативно внести изменение в созданную схему.

Таким образом, курсанты в ходе выполнения данного задания:

- знакомятся со средствами компьютерной графики;
- самостоятельно создают программный комплекс из Microsoft Excel и Graphviz;
- практикуются в написании макросов на языке VBA;
- изучают основы языка DOT;
- знакомятся с основами построения графов и их практическим использованием;
- развивают военную смекалку, взаимовыручку, творческое отношение к будущей профессии, решая профессионально-ориентированную учебную задачу.

Многим из курсантов пакет Graphviz будет полезен при подготовке курсовых и дипломных работ и в дальнейшей службе, как простое и надежное средство автоматизированного проектирования. Даже созданная на занятии книга с макросом может найти достаточно широкое практическое применение.

В случае отказа от использования программных продуктов Microsoft программа Excel может быть заменена на полностью аналогичную по функциям, но свободно распространяемую программу с открытым кодом Calc из пакета OpenOffice.

### Список используемых источников

1. ГОСТ 2.702–2011. Правила выполнения электрических схем. – М.: Стандартинформ, 2011. – 26 с.
2. Выполнение схем электрических структурных в системе КОМПАС-3D и Microsoft Visio: метод. пособие / сост. О.В. Якубенко. – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 57 с.
3. Graphviz – Graph Visualization Software. – URL: <https://www.graphviz.org> (дата обращения: 03.02.2019).
4. Безопасность операционной системы специального назначения Astra Linux Special Edition / П.В. Буренин, П.Н. Девянин, Е.В. Лебедеенко, В.Г. Проскурин, А.Н. Цибуля. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 312 с.
5. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учеб. пособие / под ред. А.С. Сырова. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.
6. *Кофнов О.В., Шелудяков А.М.* Применение пакета GRAPHVIZ при разработке структурных схем технических систем // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 150–154.

Н.С. Кужекин,  
кандидат философских наук, профессор;  
В.В. Мышко,  
кандидат техн. наук, доцент;  
В.А. Чикуров,  
кандидат техн. наук, доцент

## МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ СЛУШАТЕЛЕЙ И КУРСАНТОВ В ХОДЕ РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ

Проанализирован опыт организации рубежного контроля (РК) успеваемости слушателей и курсантов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, приводятся конкретные примеры и практические рекомендации по планированию и оцениванию результатов обучения в ходе рубежного контроля.

Ключевые слова: подготовка военных специалистов, виды контроля, рубежный контроль, обязательный минимум результатов обучения, показатели и критерии оценивания.

На современном этапе развития системы военного образования предъявляются высокие требования к качеству подготовки выпускников военных образовательных учреждений Министерства обороны Российской Федерации. На результаты обучения слушателей и курсантов оказывают влияние многие факторы: планирование учебного процесса, состояние учебно-материальной базы, квалификация преподавательского состава, образовательные технологии, сложившаяся система контроля качества подготовки специалистов и др.

Особая роль принадлежит сложившейся в вузе системе контроля успеваемости и качества подготовки обучающихся, которая включает в себя текущий контроль успеваемости (ТКУ), промежуточную аттестацию (ПА) и государственную итоговую аттестацию (ГИА) обучающихся (рис. 1)

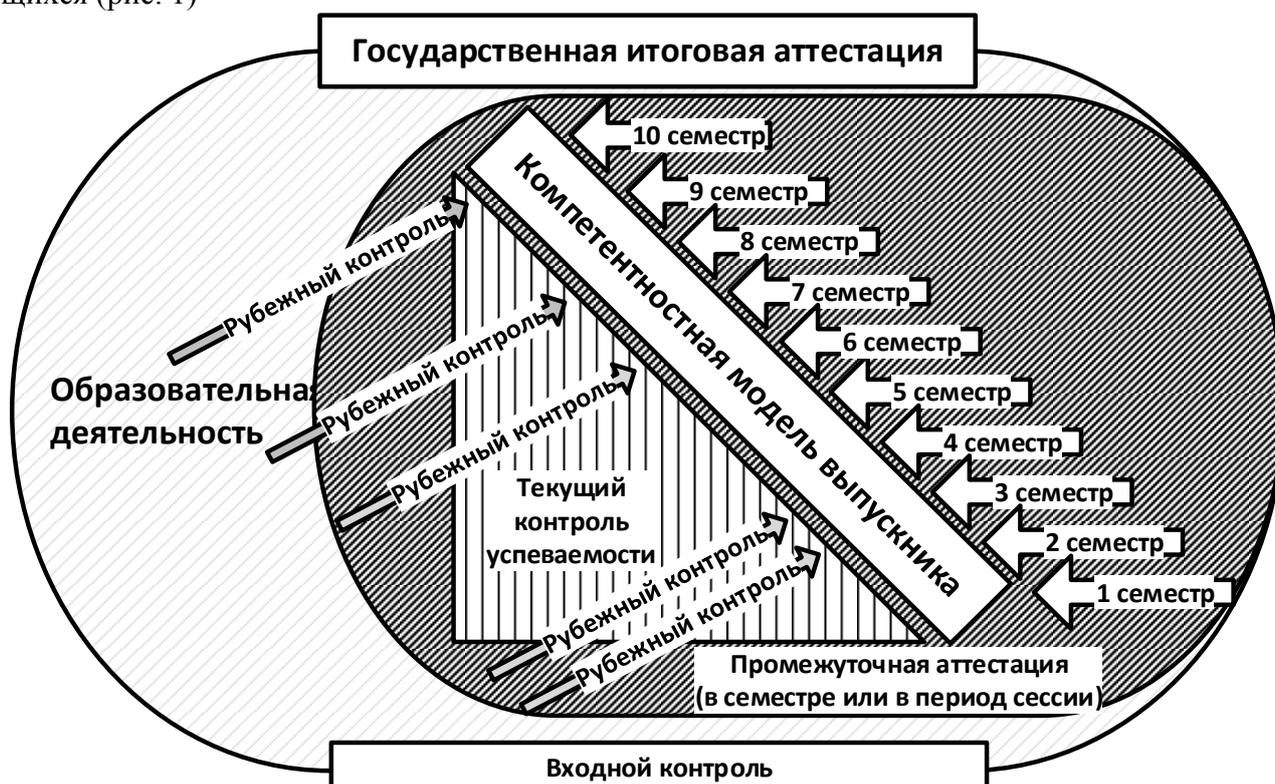


Рис. 1. Виды контроля успеваемости слушателей и курсантов вуза МО РФ

Современная нормативно-правовая база системы военного образования предоставляет определенную свободу разработчику по выбору конкретных форм и процедуры текущего контроля знаний по каждой дисциплине, которые разрабатываются образовательным учреждением самостоятельно и доводятся до сведения обучающихся. Предоставление свободы при внедрении в образовательный процесс конкретных форм и процедур ТКУ, в свою очередь, накладывает на организацию, осуществляющую образовательную деятельность, ответственность за обеспечение качества обучения и процесс планирования процедур контроля [1].

Контроль успеваемости обучающихся начинается с момента прохождения вступительных испытаний и заканчивается проведением государственной итоговой аттестацией, при этом текущий контроль успеваемости проводится в каждом семестре обучения и представляет собой контрольные мероприятия, позволяющие оценить ход и качество усвоения учебного материала.

Целями текущего контроля успеваемости являются проверка знаний, стимулирование учебной деятельности обучающихся, совершенствование методики проведения занятий, и он проводится в ходе всех видов занятий в форме, предусмотренной тематическим планом или избранной преподавателем. Результаты контроля успеваемости отражаются в журнале учебных занятий и используются для оперативного управления учебным процессом.

Видами текущего контроля являются рубежный контроль (РК) и контрольные работы (занятия).

В системе текущего контроля успеваемости особое место занимает рубежный контроль [6].

Рубежный контроль осуществляется с целью систематической проверки достижения обучающимися обязательных результатов обучения по дисциплине – минимума, который необходим для дальнейшего обучения, выполнения программных требований к уровню подготовки обучающихся. Рубежный контроль проводится по завершении изучения отдельных наиболее сложных и объемных тем, разделов учебной дисциплины. Материалы, подтверждающие прохождение обучающимися рубежного контроля, хранятся на кафедре и подлежат уничтожению после проведения промежуточной аттестации по дисциплине [2].

Планирование рубежного контроля осуществляется заблаговременно, фиксируется в рабочей программе дисциплины и тематическом плане. При этом устанавливаются количество рубежных контролей, номера тем, вид занятия, количество времени, необходимого для проведения контроля успеваемости.

Рубежный контроль может проводиться в виде: семинара; предоставления результатов, полученных на практических занятиях; групповых упражнениях (занятиях); отработки практических вопросов на тактических (тактико-специальных) занятиях и учениях; командно-штабных учений; военных (военно-специальных) игр; теоретических (научно-практических) конференций; контрольных работ (занятий); защиты отчетов о выполнении индивидуальных заданий по результатам проведения различных видов учебных занятий (лабораторных работ, практик); защиты курсовых работ (проектов, задач); индивидуального собеседования и т. д.

Особое место при организации рубежного контроля занимает проработка вопроса установления обязательного минимума на каждом этапе изучения дисциплины. Преподаватель самостоятельно, на основе существующих требований по подготовке специалиста, определяет объем материала и форму проверки усвоения в ходе одного из видов рубежного контроля.

При осуществлении рубежного контроля необходимо точно установить, что является результатом обучения и как этот результат оценивается в ходе рубежного контроля. Поскольку при освоении образовательной программы приобретаются теоретические знания и практические навыки обучающимися, то и результат рубежного контроля должен формироваться таким образом, чтобы можно было оценить степень их сформированности – установленных Федеральным государственным образовательным стандартом компетенций.

Другими словами, можно сказать, что необходимыми и достаточными условиями сформированности компетенции являются достижение определенных результатов, которые про-

веряются в ходе рубежного контроля. В свою очередь, результаты обучения по отдельным дисциплинам проверяются в ходе аттестаций – текущей, промежуточной, итоговой.

Схематично соотношение между компетенциями и результатами обучения можно выразить следующей формулой:

$$K = \{D_i | i = \overline{1, n}\}.$$

Здесь  $K$  – формируемая компетенция;

$D_i$  – результаты обучения по различным учебным дисциплинам, полученные в ходе рубежного контроля, где  $i = \overline{1, n}$ .

В дальнейшем результаты РК (уровень достижения запланированных результатов обучения) можно использовать при оценивании степени освоения компетенции (рис. 2).

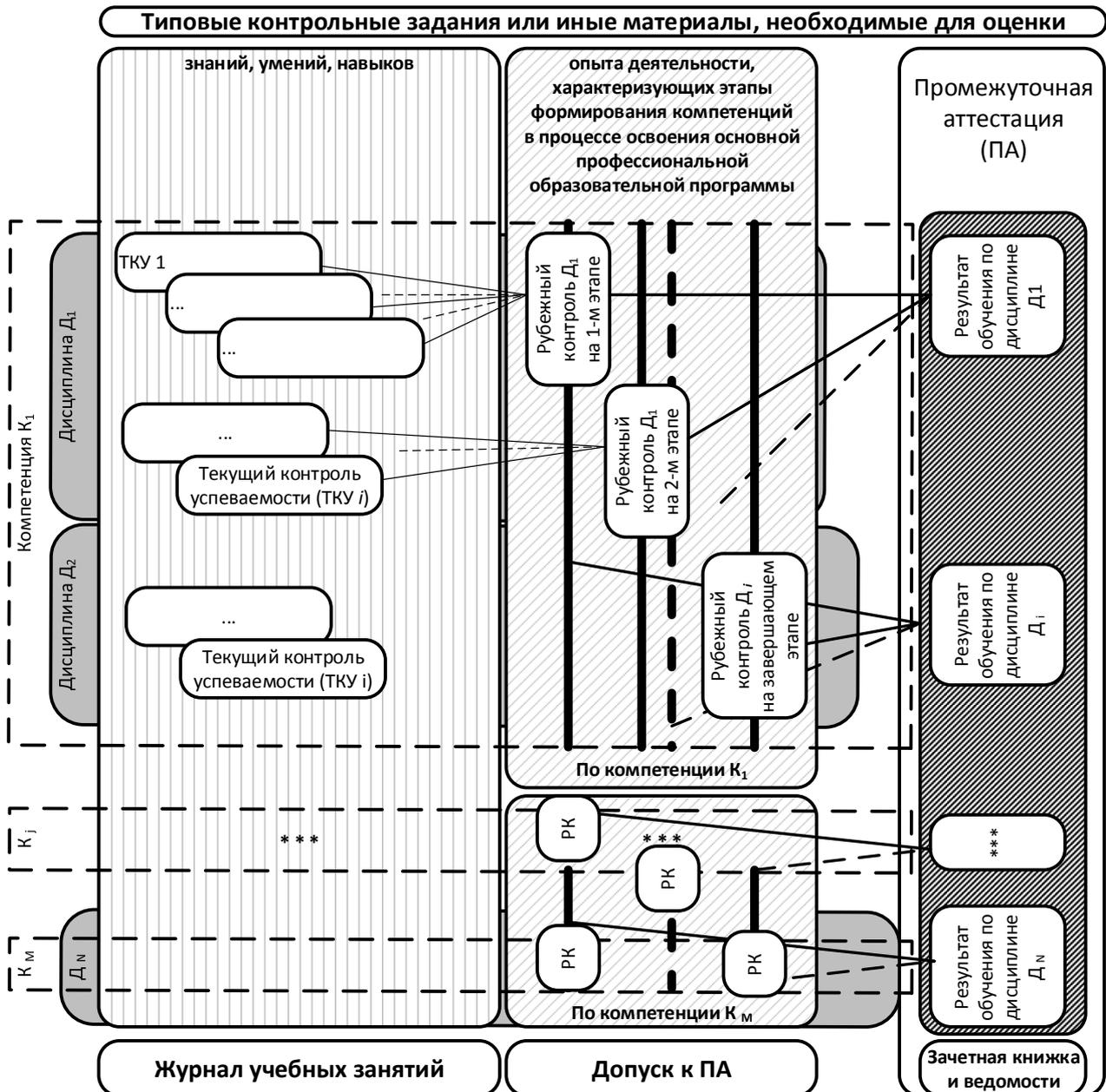


Рис. 2. Место рубежного контроля в модели оценивания результатов обучения

Как видно из рис. 2, формирование компетенций требует установления их взаимосвязи с дисциплинами, практиками и другими элементами структуры ОПОП. Выпускающие кафедры во взаимодействии с общеакадемическими кафедрами определяют этапы формирования компетенций и контрольные точки текущего контроля успеваемости.

Результатом образовательной деятельности является формирование у обучающихся, осваивающих основную образовательную программу высшего образования, всех видов компетенций, позволяющих вести профессиональную деятельность в определенной сфере и (или) выполнять работу по конкретным профессии или специальности. При решении этой сложной задачи можно выделить две части. Первой частью является создание образовательных технологий, необходимых для формирования компетенций, а второй частью – создание фондов оценочных средств (ФОС), позволяющих проводить объективное оценивание результатов обучения и, как следствие, уровня сформированности компетенций [5]. Содержание фонда оценочных средств достаточно подробно описывается для промежуточной аттестации по дисциплине или практике [3].

В настоящей статье рассмотрена процедура оценивания результатов обучения по учебной дисциплине «Эксплуатация автоматизированных систем обработки информации космических средств» обучающихся в ходе РК.

Обязательный минимум отражается во втором разделе рабочей программы по учебной дисциплине при изложении планируемых результатов освоения учебной дисциплины (рис. 3).

<b>II. Планируемые результаты освоения учебной дисциплины</b>		
<b>Формируемые компетенции</b>	<b>Перечень планируемых результатов обучения По дисциплине (модулю)</b>	<b>Иные учебные дисциплины (модули), направленные на формирование компетенций</b>
способность к анализу данных наблюдения за ракетно-космическими объектами и оценки их характеристик (ПСК-19.6)	<p><b>знать:</b> содержание и технические принципы осуществления информационно-телеметрического обеспечения и испытания и управления космических средств</p> <p><b>уметь:</b> применять вычислительную технику для обработки ТМИ</p> <p><b>владеть:</b> навыками создания алгоритмов обработки ТМИ и их реализации в виде программных модулей в автоматизированных системах обработки измерительной информации</p>	<p>Методы и средства статистической обработки данных</p> <p>Анализ технического состояния космических средств</p>

Рис. 3. Фрагмент раздела рабочей программы по учебной дисциплине, отражающий требования обязательного минимума

Результаты обучения соответствуют отдельным уровням или частям компетенций и сопоставимы с конкретными дисциплинами учебного плана. Результатами освоения учебной дисциплины являются знания, умения и навыки (владения) обучающихся после успешного завершения определенного этапа обучения. Результаты обучения представляют собой параметры, которые могут быть измерены и достижение которых является подтверждением того, что запланированные компетенции сформированы.

Для каждого конкретного этапа обучения – уровня освоения компетенции выделены категории «знать», «уметь», «владеть», в которые вкладывается следующий смысл:

– «знать» – воспроизводить и объяснять учебный материал с требуемой степенью научной точности и полноты;

– «уметь» – решать типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения;

– «владеть» – решать задачи на основе приобретенных знаний, умений и навыков, с их применением в профессиональной (служебной) деятельности (формируется в процессе получения опыта деятельности) и уметь передавать этот опыт.

В третьем разделе (рис. 4) рабочей программы по учебной дисциплине приводится график рубежного контроля успеваемости обучающихся, в котором, по существу, декларируются этапы изучения дисциплины и закрепляются «контрольные точки» – темы занятий и виды проводимого рубежного контроля. Такое решение предлагается преподавателем – составителем рабочей программы дисциплины. Конкретное занятие, на котором проводится РК, устанавливается тематическим планом дисциплины.

Так, в представленном примере по учебной дисциплине «Эксплуатация автоматизированных систем обработки информации космических средств» по изучаемым темам проводится два рубежных контроля в виде практических занятий.

Темы занятий	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Планируемый рубежный контроль				ПЗ					ПЗ		
Объем в часах				2					4		

Условные обозначения:

Виды рубежного контроля	Сокращенное наименование
Практическое занятие	ПЗ

Рис. 4. Фрагмент рабочей программы по учебной дисциплине, отражающий график рубежного контроля

В качестве оценочных средств рубежного контроля выступают контрольные вопросы по теме в рамках проводимого практического занятия. Для каждого обучающегося формируется индивидуальный перечень контрольных вопросов, на которые необходимо ответить. Если опрос проводится письменно на подготовленных бланках, то в заголовке указывается, что данный письменный опрос проводится в рамках рубежного контроля в соответствии с учебной программой изучаемой дисциплины. Поэтому в плане проведения практического занятия должно быть отведено время для выполнения заданий рубежного контроля. Количество вопросов варьируется от двух до пяти в зависимости от их сложности. Примерный перечень вопросов по теме представлен в программе дисциплины.

Другой формой рубежного контроля является тестирование с использованием ПЭВМ. В качестве оценочных средств в этом случае служит перечень из 70 вопросов (вопросы составляются по нескольким изученным темам), на 10 из которых, выбранных случайным образом, должен ответить обучающийся в течение 15–20 мин в начале двухчасового занятия (в среднем около 1 мин на каждый вопрос). На каждый вопрос теста может предлагаться четыре–пять ответов, из которых нужно выбрать правильный.

На кафедре разработано программное обеспечение, которое позволяет изменять порядок следования вопросов и порядок перечисления ответов. Кроме того, вопросы для тестирования выбираются случайным образом из банка данных, содержащего порядка 200 вопросов при начале каждого тестирования. По результатам тестирования формируется файл, в котором содержатся сведения об обучающемся, оценка за тестирование и время его проведения. Результаты тестирования хранятся на кафедре как в электронном виде, так и в виде распечаток сформированных файлов.

Результаты рубежного контроля определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно» [4].

Оценка за РК складывается из двух оценок (табл. 1):

– оценки за компонент «знать» – за ответы на 10 вопросов, составленных по материалам из лекций и литературы, предложенной на самостоятельное изучение;

– оценки за компоненты «уметь» и «владеть» – по результатам выполнения практического задания.

Таблица 1

### Критерии и шкалы оценивания показателей результатов обучения

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов выполнения задания			
	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
Компонент «знать»	Не менее девяти правильных ответов	Не менее семи правильных ответов	Не менее пяти правильных ответов	Менее пяти правильных ответов
Компонент «уметь»	Задание выполнено быстро, четко, уверенно, в полном объеме	Задача решена полностью, но недостаточно уверенно и четко	Задание выполнено частично (в основном)	Основное и дополнительные задания не выполнены из-за отсутствия соответствующих умений и навыков, предусмотренных программой дисциплины (ее части, раздела), либо грубо нарушены требования безопасности
	Все действия произведены без ошибок, с пониманием и объяснением их смыслового содержания	Необходимые практические действия произведены в требуемой последовательности, с объяснением их смысла, без существенных ошибок	При выполнении задания нарушалась требуемая последовательность действий, отдельные действия производились с ошибками, которые устранялись курсантом после дополнительных вопросов экзаменатора	
Компонент «владеть»	Курсант показал умение самостоятельно анализировать полученные результаты, делать по ним выводы	Курсант продемонстрировал умение анализировать полученные результаты и делать по ним выводы	Объяснение смысла производимых действий и анализ результатов вызывали затруднения	
	Доклад о выполнении задания был построен методически грамотно, содержал правильное заключение (вывод) и обоснованное решение	Доклад о выполнении задания был построен правильно	Доклад о выполнении задания был построен недостаточно логично и убедительно либо выводы и принятое решение были сформулированы неточно	
	Требования безопасности не нарушались	Требования безопасности не нарушались	Требования безопасности соблюдались	

Получение положительной оценки за освоение каждого этапа рубежного контроля является необходимым условием допуска к промежуточной аттестации (экзамену). Результаты освоения модулей (итоговая накопленная оценка) учитываются при выставлении итоговой

оценки на экзамене с коэффициентом 0,5 (остальные 0,5 – итоговая оценка за ответ на вопросы билеты и решение задачи).

Оценивание уровня сформированности компетенции может проводиться суммированием оценок освоения всех модулей с учетом коэффициентов значимости, при этом учитываются оценки практических навыков обучающихся, полученных на всех этапах рубежного контроля.

Результаты рубежного контроля заносятся в журналы учета учебных занятий учебных групп.

Целесообразно разрабатывать сводные ведомости по учету сформированности компетенций на учебную группу. В качестве примера в табл. 2 представлена форма такой ведомости, которая формируется на кафедре по результатам рубежного контроля, оценка заносится в журнал учета учебных занятий учебных групп. Стоит отметить, что обучающийся обязан пройти рубежный контроль до проведения промежуточной аттестации. Если в графе журнала стоит отметка об отсутствии по какой-либо причине или неудовлетворительная отметка, то в графе через дробь записывается оценка, полученная после прохождения рубежного контроля. Колонки журнала, в которых учтены результаты рубежного контроля, могут выделяться цветом или любым другим способом.

Таблица 2

Сводная ведомость по учету сформированности компетенции

Ф.И.О.	Этапы формирования компетенции ПСК-19.6				Средний балл по модулям компетенции	Уровень сформированности компетенции
	Модуль 1	Модуль 2	Модуль 3	Модуль 4		
	Методы и средства статистического анализа телеметрической информации	Анализ технического состояния космических средств	Эксплуатация комплексов обработки и анализа информации			
	7-й семестр	7-й семестр	8-й семестр	9-й семестр		
Иванов Е.А.	4	4	5	4	4,25	Средний
Петров Е.В.	5	5	4	4	4,50	Высокий
***	***	***	***	***	***	***
Козлов С.А.	4	4	4	5	4,25	Средний
Сидоров М.С.	5	5	5	5	5,00	Максимальный

Представленная модель оценивания результатов обучения слушателей и курсантов в ходе рубежного контроля позволяет мотивировать обучающегося, в случае обнаружения пробелов в изучении – корректировать методические материалы, стимулировать к дополнительной работе над пройденным материалом так как обучающийся обязан пройти рубежный контроль, а также предоставлять фактический материал, подтверждающий сформированность компетенции или отсутствие таковой.

### Список используемых источников

1. Российская Федерация. Закон. Об образовании в Российской Федерации: федеральный закон № 273 от 29 декабря 2012 года // Рос. газ. – 2012. – № 5976.
2. О мерах по реализации отдельных положений ст. 81 Федерального закона № 273 от 29 декабря 2012 года «Об образовании в Российской Федерации»: приказ министра обороны Российской Федерации № 670 от 15 сентября 2014 года // Рос. газ. – 2014. – № 6570 (298). – URL: <https://rg.ru/2014/12/30/minoborony-dok.html> (дата обращения: 31.01.2018).
3. Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 301 от 5 апреля 2017 года «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры». – М, 2017.

4. *Чикуров В.А., Зиновьев В.Г., Мышко В.В.* Система оценивания уровня сформированности компетенций у слушателей и курсантов академии // Профессиональная компетентность преподавателя академии. Инф. бюл. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. – 2015. – № 126, ч. 2. – С. 4–11.
5. *Кужекин Н.С., Чикуров В.А., Зиновьев С.В.* Фонд оценочных средств как компонент основной профессиональной образовательной программы // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2015. – 648. – С. 202–209.
6. *Матвеевский М.М.* Важность рубежного контроля // Вестн. военного образования. – 2016. – 3. – С.10–15.

А.Л. Столяров

Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники, г. Череповец

## **УСЛОВИЯ УСПЕШНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ КУРСАНТОВ ВОЕННЫХ ВУЗОВ**

Рассмотрены организационные, методические условия, а также условия, связанные с автоматизацией процесса педагогического мониторинга, позволяющие наиболее эффективно применять инструментарий педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов в образовательном процессе военного вуза.

Ключевые слова: педагогический мониторинг, компетенции, профессиональная компетентность, военное образование, менеджмент качества профессиональной подготовки.

Использование педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов в образовательном процессе военного вуза сопряжено с созданием таких условий, при которых мониторинг функционально должен представлять систему контроля и коррекции уровней сформированности компетенций. Исследование теоретических основ педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов, практики его применения в военных вузах, данные научно-исследовательской работы «Методика мониторинга формирования компетенций военных специалистов» [1] свидетельствуют о том, что высокая результативность мониторинговых процедур невозможна без проведения организационных, методических мероприятий, а также мероприятий, связанных с автоматизацией данного процесса.

Необходимость и актуальность использования педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов является востребованной научной задачей педагогической теории и практики в современных условиях военного вуза. С введением ФГОС ВО третьего поколения в систему военного образования появилась объективная необходимость перехода от традиционных способов отслеживания и сбора данных о знаниях, умениях и навыках курсантов к процессу мониторинга формирования компетенций.

Педагогический мониторинг формирования компетенций курсантов представляет собой непрерывный, в течение всего периода обучения, объективно-гласный процесс наблюдения и учета уровня сформированности компетенций с целью информирования всех субъектов и обеспечения возможности корректировки образовательного процесса.

Создание в военном вузе системы получения объективной информации о результатах сформированности компетенций курсантов возможно при выполнении условия успешной организации педагогического мониторинга формирования компетенций (рис. 1).

Организация педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов включает в свой состав определение критериев, показателей и уровней сформированности компетенций; использование контрольно-оценочного комплекса оценки сформированности компетенций; своевременное и корректное использование полученной информации для принятия управленческих решений командованием, направленных на повышение качества профессиональной компетентности курсантов.

Профессиональная компетентность курсанта военного вуза определяется как интегральная оценка овладения компетенциями в соответствии с требованиями ФГОС ВО и квалификационными требованиями к военно-профессиональной подготовке выпускников, а также высокой военно-профессиональной мотивации, отражающей общий уровень его профессиональной подготовленности.

Необходимыми условиями успешной реализации педагогического мониторинга формирования компетенций являются целенаправленность, непрерывность, длительность, систематичность и плановость отслеживания динамики уровней сформированности компетенций курсантов.

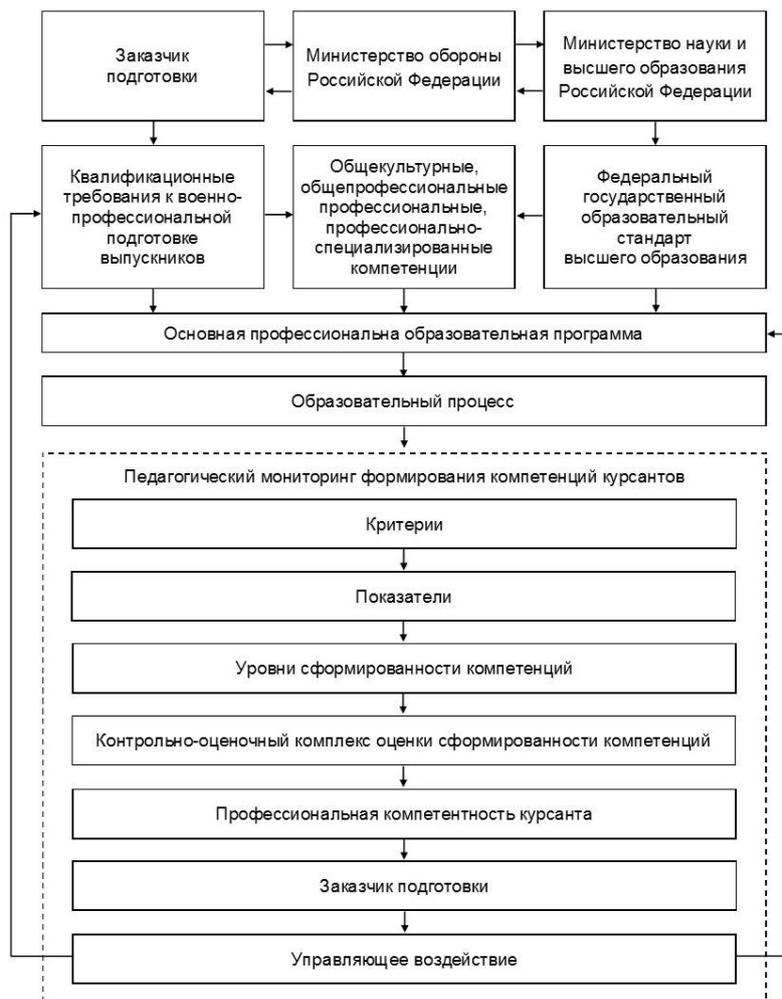


Рис. 1. Вариант организации педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов в военных вузах

Деятельность всех субъектов образовательного процесса, участвующих в проведении мониторинговых процедур, должна быть связана с постоянным изучением опыта применения педагогического мониторинга компетенций курсантов в других учебных заведениях как России, так и за ее пределами. При реализации опыта других вузов необходимо учитывать мнения всех субъектов. Данное условие позволит активно использовать обратную связь при проведении мониторинговых процедур, а принятие управленческих воздействий даст возможность всем субъектам мониторинга применять собственный педагогический и управленческий опыт.

Особое внимание при реализации педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов военных вузов следует обратить на повышение качества методического обеспечения данного процесса. Методическое обеспечение должно учитывать специфику обучения курсантов в военном вузе. Профессиональная подготовка курсантов в отличие от подготовки обучающихся в гражданских вузах более регламентированная и имеет четко выраженную профессиональную направленность. Курсанты являются действующими военнослужащими, которые кроме учебной деятельности выполняют служебные и профессиональные задачи, т. е. вовлечены в служебно-профессиональную деятельность уже в период обучения в вузе, хотя и не в полной мере. Это создает условия для формирования профессиональных компетенций и развития профессионально важных личностных качеств при непосредственном включении в служебно-профессиональную деятельность [2]. Необходимо отметить, что образовательный процесс в самом военном вузе строится на тех же педагогических принципах, в тех же организационных формах, что и в любом вузе.

При определении методической документации, разрабатываемой для обеспечения эффективной реализации педагогического мониторинга, необходимо соблюдать условие необходимого и достаточного состава документов. Методическая документация включает в себя нормативные акты военного вуза, основанные на документах управления военного образования, министерства науки и высшего образования РФ, постановлениях правительства РФ, приказах министра обороны РФ, политике военного вуза в области качества профессиональной подготовки курсантов, положениях о структурных подразделениях, должностных инструкциях персонала, рабочих инструкциях и т. п. При разработке комплекта методической документации необходимо учитывать индивидуальность каждого военного вуза.

Одним из условий успешного функционирования педагогического мониторинга является создание в штате военного вуза рабочей группы, отвечающей за качество профессиональной подготовки курсантов. Данная рабочая группа должна подчиняться заказчику подготовки, чтобы исключить возможность оказания на нее давления и приписки результатов. Необходимо отметить, что военные вузы в вопросах создания системы менеджмента качества образования значительно уступают гражданским образовательным организациям. На это есть ряд причин: большая инертность образовательных процессов в военных вузах; наличие в гражданских вузах обособленных подразделений, отвечающих за качество профессиональной подготовки обучающихся; жесткая конкуренция на рынке образовательных услуг.

Основные задачи рабочей группы контроля качества профессиональной подготовки курсантов следующие:

- участие в разработке и корректировке политики военного училища в области качества профессиональной подготовки курсантов;
- руководство внедрением, функционированием и совершенствованием технологии педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов;
- разработка и текущий контроль за реализацией основных программ повышения качества профессиональной подготовки курсантов;
- выявление фактических и потенциальных проблем педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов;
- сбор, накопление, систематизация, обработка и анализ информации о результативности педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов;
- формирование и ведение фонда нормативной и методической документации по вопросам мониторинговых исследований формирования компетенций курсантов.

Обработка большого объема информации, получаемой в ходе проведения педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов, невозможна без автоматизации данного процесса. Автоматизация процесса педагогического мониторинга позволит военным вузам оптимизировать различные образовательные процессы, повысить производительность труда, упростить работу с документами, обеспечить хранение всей информации в одном месте, адаптировать, оптимизировать и индивидуализировать процесс обучения, тем самым повысить качество профессиональной подготовки курсантов. Необходимо отметить, что без автоматизации обеспечить эффективное функционирование процесса педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов в большинстве случаев достаточно сложно, а при выполнении некоторых процедур просто невозможно.

Условием успешной автоматизации рассматриваемого процесса является обеспечение информационного взаимодействия всех субъектов педагогического мониторинга. Добиться выполнения данного условия можно только путем предоставления военному вузу инструментария, с помощью которого станет возможным организовать автоматизированное выполнение аналитических и учетно-регистрационных функций педагогического мониторинга, а также объединить в единое целое все необходимые для образовательного процесса имеющиеся в вузе ресурсы. Информационная поддержка взаимодействия субъектов педагогического мониторинга обеспечивается функционированием технологий сбора информации,

ее хранения, обработки, распространения и использования с применением программных средств и баз данных.

Анализ руководящих документов по защите государственной тайны в Вооруженных Силах Российской Федерации позволил выделить условия использования программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов. Во-первых, в соответствии с требованиями Минкомсвязи России программные средства, которые могут быть использованы в образовательном процессе военных вузов, должны быть внесены в реестр отечественного программного обеспечения. Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных предназначен для расширения использования отечественной ИТ-продукции в органах государственной власти Российской Федерации, а также в целях оказания правообладателям программного обеспечения мер государственной поддержки [3]. Во-вторых, используемое программное обеспечение должно обладать сертификатом соответствия по требованиям безопасности информации в Вооруженных Силах Российской Федерации.

Важным условием, оказывающим значительное влияние на процесс формирования компетенций курсантов, является интеграция автоматизированного процесса педагогического мониторинга в информационную образовательную среду военного вуза. Данная интеграция позволит использовать имеющиеся программно-аппаратные и человеческие ресурсы информационной образовательной среды военного вуза для реализации процесса педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов.

Таким образом, соблюдение приведенные условия успешной реализации педагогического мониторинга формирования компетенций курсантов военных вузов позволит обеспечить прозрачность мониторинговых процедур для всех субъектов образовательного процесса, повысить результативность формирования компетенций и профессиональной компетентности курсантов, сделать возможным принятие коррекционно-управляющих воздействий на процесс профессиональной подготовкой обучающихся в минимальные временные интервалы.

### Список используемых источников

1. Методика мониторинга формирования компетенций военных специалистов: отчет о НИР (промежуточный, шифр – 21803) / ЧВВИУРЭ; рук. Д.Л. Бережных; исполн.: А.Л. Столяров и др. – Череповец, 2018. – С. 51–57.

2. *Евтихов О.В.* Формирование профессиональной компетентности курсантов в образовательной среде вуза правоохранительных органов: моногр. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 181 с.

3. Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных. – URL: <https://www.reestr.minsvyaz.ru> (дата обращения 17.01.2018).

Н.С. Кужекин,  
*кандидат философских наук, профессор;*  
Н.А. Репях,  
*кандидат философских наук, доцент;*  
А.Н. Хрустова

## **ИДЕИ РУССКОГО КОСМИЗМА В СОЧИНЕНИЯХ А.В. СУХОВО-КОБЫЛИНА**

В статье рассматриваются философские взгляды одного из основателей русского космизма А.В. Сухова-Кобылина, мечтавшего о прекрасном звездном будущем духовного человечества.

Ключевые слова: неогегельянство, дарвинизм, Вселенная, человек, человечество, одухотворение, всемирно-исторический процесс, эволюция, философия, техника.

Русский космизм как уникальное течение отечественной философской мысли берет начало в середине XIX века. У его истоков стояли В.Ф. Одоевский, Н.Ф. Федоров, А.В. Сухово-Кобылин, В.С. Соловьев, Н.А. Умов, С.Н. Булгаков, П.А. Флоренский, Н.А. Бердяев и другие отечественные мыслители. Вместе с тем исследователи выделяют несколько направлений (разновидностей) русского космизма:

1. Естественно-научное (К.Э. Циолковский, А.Л. Чижевский).
2. Религиозно-философское (Н.Ф. Федоров, В.С. Соловьев).
3. Эзотерическое (Н.К. Рерих, Е.Н. Рерих).
4. Ноосферное (В.И. Вернадский, Н.Н. Моисеев).
5. Литературно-художественное (В.Ф. Одоевский, А.В. Сухово-Кобылин) [1].

Объединяющим началом для русских космистов является принципиально новое качество мировоззренческой позиции, в основе которой понимание восходящего характера эволюции и обоснование объективной и нравственной необходимости сознательно-активного ее этапа, убежденность в единстве Человека и Вселенной (вселенскость человечества) и призыв единого человечества к всеобщей интеграции в целях осуществления космической экспансии. Философские идеи большинства представителей космического, активно-эволюционного направления научно-философской мысли нашли отражение в работах многих отечественных и зарубежных ученых.

Русский космизм представлен именами, принадлежащими разным духовным эпохам и поэтому очень разными по темам осмысления идей космической эволюции, личному вкладу в поиске путей их воплощения. Вместе с тем, по мнению авторов, недостаточно внимания уделено изучению философских взглядов одного из основателей русского космизма А.В. Сухова-Кобылина. Восполнить этот пробел и вызвано обращение авторов статьи к его творческому наследию.

Александр Васильевич Сухово-Кобылин (1817–1903) широко известен прежде всего как отечественный драматург, переводчик, математик. До сих пор в ведущих театрах России идут постановки его пьес. Литературные критики ставят Сухово-Кобылина в один ряд с А.С. Грибоедовым и А.Н. Островским. А поэт А.А. Блок писал, что Сухово-Кобылин «неожиданно и чудно» соединил в себе «Островского с Лермонтовым». И очень часто биографы и исследователи творчества называют его колоритной, загадочной и противоречивой личностью культуры России второй половины XIX века, вокруг которой много легенд, мифов, домыслов [2].

Как и любой философ, Сухово-Кобылин является сыном своего времени, представителем своей цивилизации, своего народа, вероисповедания. Его внутренний духовный мир форми-

ровался в конкретную историческую эпоху, характеризуемую определенным уровнем развития производительных сил и специфическим характером производственных отношений России XIX века, состоянием науки, культуры, искусства и т. д. Однако философские взгляды Сухово-Кобылина явились не просто отражением наличного социального бытия. Они порождены своеобразием личности мыслителя, его индивидуального характера, индивидуального опыта, индивидуального переживания, индивидуального освоения достижений культуры своей эпохи, своего народа и его удивительными способностями предвидения. Другими словами, на философских взглядах Сухово-Кобылина лежит печать личности философа, его непростой судьбы, и это проявляется не только в выборе проблематики осмысления окружающего мира и в стиле и способах изложения материала, но и в воздействии.

Действительно, Сухово-Кобылин прожил долгую жизнь, насыщенную не только взлетами, но и падениями. Так, ошеломительный успех постановки первой пьесы («Свадьба Кречинского») в театрах Санкт-Петербурга и Москвы совпал со следствием по делу об убийстве. «Два великих события рядом, – сделал запись Сухово-Кобылин в своем дневнике, – одно неожиданно-негаданно дает венок лавровый, другое бессовестною рукою на голову терновый...». И дальше следует почти полувековое забвение.

Александр Васильевич Сухово-Кобылин – продолжатель старинного рода, представители которого играли значимую роль в жизни российского государства. Так, один из родоначальников по прозвищу Андрей Кобыла известен как ближайший соратник Ивана Грозного, и по преданию из этого же рода была жена царя Анастасия.

Известно, что в 1552 году после взятия Казани одному из предков Сухово-Кобылиных было пожаловано село Сухово. Так появилась приставка в древней фамилии.

Воспитываясь в глубоко религиозной семье, Александр Васильевич получил прекрасное домашнее образование. С 1834 года начинается его учеба на философском факультете (физико-математическое отделение) Московского университета. В годы учебы Сухово-Кобылин дружит с К.С. Аксаковым, а его кумирами становятся А.И. Герцен и Н.П. Огарев.

Следует отметить, что, несмотря на широкое признание литературных успехов, именно философию называл Сухово-Кобылин главным делом своей жизни. Более того, он считал, что и написанию пьес «обязан философии». Это пристрастие к философии приводит к продолжению ее изучения в Берлинском и Гейдельбергском университетах и знакомству с философскими трудами Г. Гегеля.

Александр Васильевич слыл одним из самых высокообразованных людей своего времени, был всегда остроумен и самоуверен даже до дерзости. Гостей его имения в Кобылинке поражало обилие книг. К сожалению, в декабре 1899 года во время пожара не только сгорел дом, но и безвозвратно были утеряны многие оригинальные рукописи, переводы философских произведений Г. Гегеля, а также весь семейный музей с бесценными реликвиями.

Значительная часть жизни Сухово-Кобылина прошла вдали от научных центров, где шла активная философская жизнь, велись философские дискуссии, публиковались научные труды и т. д. Несомненно, что это сказалось и на содержании философских идей мыслителя и весьма вероятно в значительной степени не позволило создать законченную философскую систему. Исследователи философского наследия Сухово-Кобылина имеют возможность его изучения посредством знакомства с отдельными набросками, тезисами, фрагментами работ. Сохранилась только часть оригинальных трудов, вывезенных еще до пожара во Францию и сейчас находящихся в Центральном государственном архиве литературы и искусства (ЦГАЛИ).

Сухово-Кобылину судьбой была уготовлена жизнь, наполненная любовью и разочарованиями, творческим долголетием, бурным успехом и длительными периодами забвения. Успех первой пьесы сменился жесткой цензурой последующих работ. У него на руках умирают вскоре после свадьбы обе жены-иностранки. А чего стоит семь лет быть под следствием и дважды подвергаться аресту. Трагикомичным было и то, что оправдательное решение Госсюда было «затеряно писцом в пьяном виде вместе с парюю сапог» [7]. «Не будь у меня связей и денег, – писал Сухово-Кобылин, – давно бы я гнил где-нибудь в Сибири» [2].

Изучение в университете Германии философских трудов выдающегося немецкого философа Г. Гегеля вдохновило Сухово-Кобылина к переводу их на русский язык.

Следует отметить, что это была одна из первых попыток перевода, и, несомненно, она способствовала распространению идей немецкого философа в России.

Напряженная работа над переводом продолжительностью почти 40 лет сопровождается комментариями самого переводчика и в конечном итоге приводит Сухово-Кобылина к созданию собственного учения, которое он называет учение Всемир. Однако создание этого учения стало результатом влияния на русского философа не только гегелевской философской системы (сам Сухово-Кобылин давал название своей системе неогегелизм), но и учения Ч. Дарвина (прежде всего его труда «Происхождение человека и половой отбор»). Не зря многие исследователи идей Сухово-Кобылина называют его учение синтезом философской системы Гегеля и дарвинизма. Философские взгляды Сухово-Кобылина авторы статьи предлагают исследовать через призму фундаментальных принципов русского космизма.

Прежде всего следует отметить, что Сухово-Кобылин четко определяет целостность взаимосвязи человека и космоса. Философ считает вселенную бесконечной, неотъемлемой её частью выступает человек, который становится центральным звеном всей цепи космического бытия. Такое понимание Сухово-Кобылиным единства человека и космоса основано на холистическом мировоззрении, предполагающем телеологически определенную эволюцию Вселенной.

Единство вселенского человечества по Сухово-Кобылину означает, что весь мир есть жилище одного и того же человечества. И доказательство этому мыслитель ищет прежде всего в результатах научных исследований. Такое единство, по его мнению, обусловлено единством материального во Вселенной, которое якобы «недавно доказано Киргофом с помощью анализа спектра световых лучей Солнца и многих звезд». Сухово-Кобылин пишет, что наряду с единством материи существует и «единство ее силы движений – электричества». Он приходит к выводу, что «очевидно, этим утверждается и единство их продукта, т. е. человека, или единство вселенского человечества». По мнению мыслителя, это единство подтверждается и наличием единых «продуктов разума, который правит миром и в нем построено и не может иначе, т. е. неразумно построено». Аргументами единства человечества во Вселенной Сухово-Кобылин считает также универсальность и неизменность теоретических наук (логики, психологии, феноменологии, метафизики) как на Земле, так и на других планетах (таких, как Меркурий, Венера, Сатурн). Универсальны и продукты разума (дважды два четыре, логика везде есть логика). «Бог есть везде тот же самый Бог», – пишет философ [5].

Сухово-Кобылин убежден, что эволюция человека и человечества есть часть единой космической эволюции. Поэтому понять человека, его сущность, историю и предвидеть будущее можно только в контексте этой эволюции.

История человечества у Сухово-Кобылина имеет восходящий, прогрессивный характер. Эту эволюцию он представляет как процесс прохождения человечеством трех стадий («моментов своего разумного, т. е. нормального развития»).

На первой стадии человечество философ называет теллурическим или земным. Его существование заключено в границах земного шара, которые сам Сухово-Кобылин определяет тесными для человечества. За теллурической наступает солярная стадия. Это, по мнению мыслителя, все «то, которое является как всекупола обитателей нашей Солнечной системы».

Одухотворение человечества, формирование божественной общины как цели всемирно-исторического процесса наступает на этапе «сидерического или всемирного человечества». Сидерическую стадию Сухово-Кобылин называет всемирным человечеством – это «вся тотальность миров, человечеством обитаемых во всей бесконечности Вселенной». На этой стадии высшим моментом всемирно-исторического процесса выступает «абсолютно свободная человеческая личность».

Обладея университетским математическим образованием, Сухово-Кобылин пытается интерпретировать понимание стадийности развития человечества с помощью математических символов. Символы  $0 - 1 - \infty$ , по мнению философа, не только обозначают, но и выражают сущностные аспекты развития бытия. При этом используемая Сухово-Кобылиным гегелевская триада совпадает у него с христианской онтологией (бытие до начала творения, бытие материального мира, бытие после акта преобразования). Так, символ  $0$  – это чистая потенция будущего мира, бог здесь существует наедине с собой; символ  $1$  характеризует появление и существование материи, это мир материальных форм, природы и самого человека;  $1 -$  это и символ мира, состоящего из многих единиц. Знак  $\infty$  означает переход к бесконечности. При этом математическая множественность уступает место духовному единству. Всемир, таким образом, у Сухово-Кобылина приходит к высшей точке своего развития [4].

Сухово-Кобылин считает, что развитие всемирно-исторического процесса детерминирует и поступательное развитие человека («процессование человека к Богу»). И здесь философ верен гегелевской триаде. На первом этапе у Сухово-Кобылина это «непосредственный, чувственный человек или дикий человек, человек-зверь, антропофаг, пожиратель самого себя, человек-дьявол, дьявольский человек».

Второй этап – «ныне наличествующего нашего земного, или теллурического человечества», – пишет Сухово-Кобылин. Здесь это «обыденный, конечный, эмпирический, антиспекулятивный, рассудочный человек, тот человек, которого мы имеем в эмпирическом знании...».

В процессе одухотворения человечества на третьем этапе оно становится воплощением абсолютного духа – «лишь в бесконечности одухотворение это заканчивается главенством божественного разума...» [4].

Сухово-Кобылин убежден, что восходящее развитие человека (человечества) осуществляется в соответствии с гегелевской диалектикой, оно есть бесконечное саморазвитие. По мысли русского философа, «логическое эвольвирует (развивается, разворачивается, переходит) в природу, а природа инвольвирует (свертывается, свивается, исходит) в теллурического человека, а человек исходит в абсолют или в сидерическое человечество».

Сухово-Кобылин затрагивает и тему «обитаемых миров». Он с уверенностью утверждает, что «обитаемость эта несомненна». В качестве доказательства философ выдвигает прежде всего теорию Дарвина – «...ныне дарвинизмом разрешен вопрос о происхождении человека, человеческого рода». И далее он пишет: «Потому он и разрешен, что генезис человечества понят не как случайное, а как необходимое явление, все царство органической жизни понято как эволюционное поступание, как постоянное изменение родов и видов животных, которые законно, т. е. необходимо, а не случайно друг из друга исходят и поэтому также законно и необходимо достигают до высших и конечных форм или пород, которые, в свою очередь, исходят в человечество» [4].

К сожалению, Сухово-Кобылин абсолютизирует эволюционную теорию Дарвина и с позиций социал-дарвинизма цинично заявляет о «божественности, т. е. абсолютности закона селекции». Философ предрекает, что по этому закону «всевластно и фатально сильные крепнут, множатся и процессуют, а слабые слабеют, истребляются и в конце концов исчезнут».

Как и большинство русских космистов, Сухово-Кобылин не оставляет без внимания факторов эволюции человека (человечества). Важнейшее место среди них он отводит технике, ее прогрессу. Философ отмечает, что «сила или мощь, энергия организма выражаются в быстроте самодвижения (автокинии)». Абсолютная свобода передвижения означает абсолютную победу над пространством или протяженностью. И саму историю человечества («историю одухотворения») Сухово-Кобылин предлагает рассматривать как историю самодвижения («автокинии») человечества. При этом степень совершенства человека (человечества) обусловлена техническим прогрессом, когда механика «вагонного движения (локомотива) значительнее создания велосипеда, летящей машины...». «Все эти современные изобретения суть не что иное, как шаги, совершаемые человечеством по пути его субъективизации, оду-

хотворения», – пишет Сухово-Кобылин. Среди них не только велосипед как «техническое изобретение», позволяющее осуществлять «горизонтальное летание», но и «вагонное движение (локомотива), который... значительнее создания велосипеда» [3].

Много внимания (по крайней мере, в известных авторах работах) уделяет Сухово-Кобылин летанию. «Нет сомнения, – пишет он, – что в вопросе о летании положение нам современного человечества есть вполне приниженное и для достоинства человека оскорбительное». Летание философ рассматривает в качестве высшей степени одухотворения человека (человечества) и как абсолютную свободу перемещения, и как полную победу над пространством.

У Сухово-Кобылина много размышлений о летании насекомых, птиц, причинах невозможности летания человека земного (теллурического) и способах достижения такой способности. И здесь много места для фантазии, наивного мечтательства, отвлеченного от реалий (например, идея «маления тела» или вырастание у человека крыльев как у птицы).

Глубоким нравственным содержанием наполнено этическое положение Сухово-Кобылина о том, что высшим благом может быть только жизнь, озаренная высокой духовностью. Сам Александр Васильевич Сухово-Кобылин в дневниках так подытожил свою жизнь: «...со смертью и старостью я спорил трижды: пьесой «Смерть Тарелкина», личной гигиеной и здоровым образом жизни, а также своим философским учением «Всемир», в котором основана и путем математических исчислений доказана возможность перехода человечества, благодаря развитию, в другое качество, качество «бессмертия» [6].

Со второй половины XX века началось практическое освоение космоса. Сегодня оно вышло на абсолютно новый уровень. Сейчас в космическом пространстве функционируют сотни спутников, работает Международная космическая станция. Ученые с помощью управляемых космических аппаратов получают фантастические фотографии дальних галактик. Не так давно космический телескоп «Кеплер» обнаружил планетарную систему, в которой есть звезда, очень напоминающая Солнце, и планета, похожая на Землю.

Мы всегда гордимся тем, что прорыв в космос осуществлен именно нашей страной, героическим трудом наших ученых, инженеров, космонавтов. Мы первыми запустили искусственный спутник Земли, наш соотечественник Ю.А. Гагарин стал первым человеком, покорившим космос, и именно наш космонавт А.А. Леонов впервые вышел в открытый космос. Эти и другие подвиги подтверждают многие гениальные пророчества, мечты и предвосхищения русских философов-космистов. Достойное место в их ряду занимает Александр Васильевич Сухово-Кобылин – выдающийся отечественный философ, драматург, математик.

### Список используемых источников

1. *Казютинский В.В.* Проблемы типологии космизма как феномена мировой культуры // Научные чтения памяти К.Э. Циолковского. – Калуга, 2009. – 249 с.
2. *Старосельская Н.Д.* Сухово-Кобылин. – М.: Молодая гвардия, 2003. – 189 с.
3. *Алексеева В.И.* Космизм о мире, человеке и обществе. – М.: Луч, 2012. – 576 с.
4. *Сухово-Кобылин А.В.* Учение Всемир. Инженерно-философские озарения. – М.: СЭТ, 1995. – 120 с.
5. *Русский космизм: Антология философской мысли / сост. и предисл. к текстам С.Г. Семеновой, А.Г. Гачевой; примеч. А.Г. Гачевой.* – М.: Педагогика-пресс, 1993. – С. 52–65.
6. *Бессараб М.Я.* Сухово-Кобылин. – М.: Современник, 1981. – 176 с.
7. *Отрошенко В.О.* Сухово-Кобылин. – М.: Молодая гвардия, 2014. – 150 с.
8. *Быстров М.В.* А.В. Сухово-Кобылин и П.А. Флоренский: Малоизвестные откровения русской мысли, опередившие время. – М., 1996. – 118 с.

В. П. Огородников,  
*доктор философских наук, профессор;*  
Н.А. Репях,  
*кандидат философских наук, доцент*

## **ДИАЛЕКТИКА СВОБОДЫ И ОТВЕТСТВЕННОСТИ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВОЕННОСЛУЖАЩЕГО**

В работе раскрываются ложность и эвристическая бесполезность альтернативы «свобода или необходимость». Показывается роль диалектико-материалистической трактовки связи необходимости и случайности для понимания единства свободы и ответственности. Демонстрируется, что свобода деятельности важнейшим своим основанием имеет познание истины. Выявляются объективные и субъективные детерминанты и основания диалектической связи свободы и ответственности в деятельности военнослужащего.

Ключевые слова: свобода и ответственность, необходимость и случайность, причинность и детерминизм, свобода и истина, объективные и субъективные основания свободы, свобода и риск.

Прежде чем приступить к рассмотрению диалектической связи свободы и ответственности в деятельности военнослужащего, необходимо определить основные термины, связанные с поставленной проблемой. Эти термины представляют фундаментальные онтологические, гносеологические и социологические философские категории: необходимость и случайность, истину и заблуждение, свободу и несвободу, цель и смысл. Все это связано и с «вечными» вопросами о смысле жизни, целесообразности человеческой деятельности, возможности познать окружающий мир и самого себя, свободе общества и личности. Решение этих вопросов выводит на философскую проблему объективной связи необходимости и случайности. От того или иного ее решения зависит интерпретации множества других философских дилемм человеческого бытия и познания: объективного и субъективного, фатализма и волюнтаризма, общего и единичного, истины и заблуждения, сущности и явления, свободы и права, свободы и морали, свободы и демократии, свободы и свободомыслия...

Проблема соотношения необходимости и случайности на протяжении более чем двух тысячелетий редуцировалась к двум взаимоисключающим вариантам решения. Первый и наиболее распространенный берет начало в философии античного мыслителя Демокрита, полагавшего, что мир представляет собой бесконечную цепь абсолютно необходимых причинно-следственных звеньев [1]. При этом случайность третировалась как следствие незнания истинных причин. Эту точку зрения использовали в качестве основания своих научных разработок практически все представители естествознания Нового времени, включая великого И. Ньютона. Свое логическое завершение идея абсолютно необходимого мира нашла в работах П.С. Лапласа (1749–1827), парадоксально сочетавшего убежденность в фатальной предопределенности любого процесса с разработкой основ теории вероятности, опирающейся на понятие «случайное событие» [2, с. 208]. Фатализм не оставлял места для свободы человеческого волеизъявления. Именно на теоретическом основании появилась ложная дилемма «свобода или необходимость». Выдающийся античный мыслитель Аристотель (384–322 гг. до н. э.) указывал, что уничтожение случая влечет упразднение и всякого человеческого волеизъявления. Становится излишним размышление о том, как следует действовать, ибо выбора нет – все однозначно предустановлено [1, с. 329]. Философ впервые высказал ряд гениальных догадок о случайности как форме бытия необходимости, связанной с реальной возможностью, предвосхитив в этом на два тысячелетия Г. Гегеля (1770–1831). Индетерминизм, получивший в XIX столетии определенное распространение как в философских, так и в естественно-научных концепциях, явился во многом негативной реакцией на лапласовскую трактовку детерминизма, которая не давала и не могла дать ответ на указанные вопросы. Вместе с тем индетерминизм выступает лишь «оборотной стороной» лапласовского

детерминизма, имеет с последним общее основание – метафизическое противопоставление необходимости (как причинности) и случайности (как чего-то не имеющего причины или причинного объяснения). Различие состоит в том, что индетерминизм абсолютизирует как нечто самостоятельно существующее случайность, отрывая ее от необходимости.

В мире абсолютной случайности человечество и отдельный человек столь же абсолютно несвободны, как и в мире абсолютной необходимости.

Индетерминизм – абсолютизация случайности является базой для иррационализма, ибо познанию доступно только то, что повторяется, воспроизводится в связи состояний одной и той же системы или во взаимодействии систем. Абсолютная случайность абсолютно непознаваема.

Б. Спиноза (1632–1677), пытаясь соединить свободу и необходимость, вывел в своей «Этике» известную многим формулу «Свобода – осознанная необходимость» [3, с.213]. Но он абсолютизирует обязательный для свободы человека познавательный аспект и не дает ответа на вопрос, чем познанная необходимость «свободнее» непознанной, так как необходимость остается у Спинозы без своего диалектического партнера – случайности и потому продолжает пребывать в форме непреложности, неизбежности.

Вплотную подошел к решению проблемы выдающийся диалектик нового времени Г. Гегель. «Необходимость, – объясняет Гегель, – есть движение, процесс в себе, состоящий в том, что случайное вещей, мира, определенное как случайное и последнее, себя в самом себе снимает, возводя в необходимое». Таким образом, случайность, с одной стороны, опосредствует необходимость, с другой же стороны, в ней самой заключена необходимость, которая может быть получена при снятии опосредствования. Иначе говоря, случайность – и дополнение, и форма проявления необходимости. «Слепа необходимость лишь поскольку она не понята», – записывает Гегель в «Науке логики». «Всемирная история, – по Гегелю, – есть прогресс в сознании свободы, – прогресс, который мы должны познать в его необходимости» [4, с. 71–72].

В гегелевской концепции был заключен ключ к решению проблемы свободы человека. Однако современные Гегелю обществоведение и естествознание прошли мимо его философских положений, продолжали широко использовать в своих теоретических построениях более простой и понятный механистический детерминизм демокритовского толка. При этом абсолютизация необходимой причинной связи благополучно уживалась (метафизические крайности всегда сходятся) с абсолютизацией роли случая в социальном процессе. Многие современники Гегеля, да и представители последующих поколений философов, полагали, что всякий поворот истории определяется каким-то чисто случайным событием (типа насморка у Наполеона во время битвы под Ватерлоо), после чего социальный прогресс продолжает подчиняться абсолютной необходимости причинной связи.

Если объективное (материальный мир) представлено только абсолютной необходимостью, то оно действительно не может служить основанием свободы. Но в таком случае нельзя говорить и о субъективном мире, мире сознания как о прибежище свободы. Свобода – не переживание и не познание действия, а само это действие на основе познания, отражаемое и в психологическом переживании (нет действия – нечего переживать). Объективным основанием свободы действия выступает относительная необходимость, представленная в объективной реальности определенным множеством тенденций-возможностей развития. Сведение такого множества к одному дает абсолютную необходимость, в рамках которой нечего выбирать, а потому бессмысленно задаваться какой-то целью. Свобода, таким образом, – единство объективного и субъективного – сознательный выбор из познанных объективных тенденций развития.

Человек может полагать себя свободным, но критерием свободы или несвободы, как и критерием истины, является практика, выверяющая совпадение цели и результата.

Деятельность, достигшая такого совпадения, выступает целесообразной (т. е. «сообразной с целью») и тем самым свободной. Всякая целесообразная деятельность свободна, всякая

свободная деятельность целесообразна. Например, рабский труд – выполнение чужой, а не своей цели, в силу чего он и несвободен, и нецелесообразен. Здесь процесс труда и его результат отчуждены от субъекта деятельности. Не случайно Аристотель, определяя сущность раба, утверждает, что раб – «это одушевленная собственность и самое совершенное из орудий».

С другой стороны, не всякая целенаправленная деятельность является целесообразной, цели могут быть иллюзорными, утопическими, фантастическими и потому недостижимыми. Деятельность, преследующая подобные цели, будет обречена на несвободу, на отчуждение.

Сказанное определяет еще два важных основания свободы воли: 1) владение истиной, т. е. отражением объективной реальности адекватной самой реальности, 2) выполнение своей воли в выборе предпочтительного варианта (цели) из некоторого множества объективных. И в том и другом основании опять представлено диалектическое единство объективного и субъективного. Истина – объективна по содержанию, но субъективна по форме (выражена суждением). Выбор цели – также субъективный акт, но он опирается на знание относительной и вероятностной объективной необходимости.

Уже говорилось о том, что абсолютный индетерминизм не оставляет никаких надежд на возможное вмешательство в случайный процесс, так же как абсолютный детерминизм – в течение «железной» необходимости. Вместе с тем всякого рода волюнтаристические концепции так или иначе опираются на индетерминизм как на методологическую предпосылку. Предполагается, что воля человека (Ф. Ницше) или мировая сверхъестественная воля (А. Шопенгауэр) могут в любой момент изменить ход истории произвольно, т. е. исходя только из воли, внутреннего побуждения и подчинив последнему все внешнее. В обоих вариантах идеи правят миром, в обоих вариантах мир – царство случайности. Метафизика и идеализм опять идут рука об руку.

С другой стороны, необходимо избегать и противоположной крайности – абсолютизации роли объективных тенденций, что неминуемо ведет к вульгарному экономизму и фатализму. При этом нивелируется роль субъективного, «человеческого» фактора, вне которого не может быть осуществлена никакая целесообразная деятельность человека.

Итак, познание истины природных и общественных процессов, являясь важнейшим субъективным основанием свободы деятельности человека, не может состояться ни в абсолютно необходимом, ни в абсолютно случайном мире. Истинное познание действительности происходит как выяснение того, как относительная необходимость в виде реальной возможности может стать действительностью в форме случайности-проявления – реализации одного из возможных исходов. В этом познании надо установить не только наиболее объективно вероятный в своей реализации, но и наиболее предпочтительный результат как для общества, так и для отдельного человека.

Свобода может быть осуществлена только в целесообразной сознательной деятельности.

Достижение поставленной цели – критерий истинности этой цели как идеального образа потребного будущего и вместе с тем критерий свободы целееосуществления.

Главным достижением марксизма в понимании всемирной истории является кардинальный пересмотр решения вопроса о ее причинах. Маркс указал на противоречие между производственными отношениями и производительными силами как на основную причину исторических изменений. Тем самым в отношении истории был реализован диалектико-материалистический метод, определяющий внутреннее противоречие системы как причину ее изменения и развития.

Обществу, как и любой системе, присуще множество внутренних противоположностей, противоречия между которыми составляют конкретные возможности изменения системы в том или ином отношении. Так, возможность социальной революции определяется противоречием между классами, противоположными по своему месту в системе общественного производства и в системе распределения результатов этого производства.

Процесс реализации возможности (переход возможности в действительность) выступает как развитие системы. Факторы, определяющие данный процесс, являются системой причин и непричинных детерминаций (условий, оснований, функциональной детерминации и т. п.), которая опосредствует детерминизм как «относительную необходимость». Диалектический взгляд на необходимость и случайность помогает понять необходимость общественного процесса как относительную необходимость, как тенденцию. Тем самым не только вскрывается несостоятельность фатализма и волюнтаризма, догматизма и релятивизма, но и выявляются объективное и субъективное основания свободы человеческой воли. Ведущее объективное основание связано с относительностью необходимости социального, наличием множества тенденций-возможностей и непричинных детерминант, которыми можно воздействовать на реализацию тех тенденций, в которых заинтересован человек. Так как социальный интерес как осознанная потребность обусловлен в конечном счете производственными отношениями, то представители различных социальных слоев, групп, классов обладают (в соответствии с местом в системе производственных отношений) весьма различными, часто противоположными интересами и целями. Свобода реализации таких целей связана прежде всего с объективными тенденциями развития. Класс, социальная группа реализуют свои интересы постольку свободно, поскольку ими осознана не только общая тенденция исторического развития, но и те непричинные детерминанты, которые в форме случайностей-дополнений опосредуют действие причинного фактора. Познание относительной необходимости предполагает, таким образом, знание того, что определяет ее относительность, – случайностей-дополнений. Такое знание является субъективным основанием свободы. Так как оно не может быть исчерпывающим, свобода не может быть абсолютной уже по этому параметру.

Раскрывая диалектику необходимого и случайного в процессе детерминации человеческой истории, Ф. Энгельс писал: «Люди сами делают свою историю, но до сих пор они делали ее, не руководствуясь общей волей, по единому общему плану, и даже не в рамках определенным образом ограниченного данного общества. Их стремления перекрещиваются, и во всех таких обществах господствует поэтому необходимость, дополнением и формой проявления которой является случайность. Необходимость, пробивающаяся здесь сквозь все случайности, опять-таки в конечном счете экономическая» [5, с.175].

Вывод Маркса и Энгельса: история общества подчиняется объективным законам, как и эволюция природы. Закономерность не тождественна абсолютной необходимости. Случайность выступает формой бытия необходимости, представленной мерой, в рамках которой существует относительная необходимость. Человек совершает скачок из царства необходимости в царство свободы тогда, когда он начинает познавать скрытую за случайной формой относительную необходимость развития природы и общества.

Свобода определяется не знанием самим по себе, а возможностью действия на основе знаний. Действие человека включает его в процесс деятельности, в процесс труда. Труд, как совместная деятельность по производству материальных и духовных благ, не только когда-то создал человека, но и сейчас формирует каждую личность, ее сознание, мировоззрение. В процессе трудовой деятельности осуществляется непосредственная связь свободы выбора из спектра объективно закономерных возможностей (познанной относительной необходимости) и реализации этого выбора в случайностях – формах проявления относительной необходимости.

Теперь, опираясь на полученные результаты анализа поднятой проблемы, рассмотрим объективные и субъективные основания свободы и ответственности военнослужащего. Надо сказать, что почти три десятилетия чтения курса истории и философии науки адъюнктам и курсантам Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского убедили авторов этой статьи в том, что большинство слушателей весьма скептически оценивают свободу деятельности военнослужащего. Считается, что военнослужащий всецело подчинен в своей деятельности Присяге, Уставу ВС и распоряжениям командиров.

Свобода действия, знание истины и ответственность связаны не столь однозначно. Человек может действовать свободно, непринужденно, но заблуждаться. Никто же не принуждал Кулибина к изобретению вечного двигателя, чем он занимался всю свою сознательную жизнь! Но, с другой стороны, деятельность только тогда действительно свободна, когда ее цель (идеальный образ будущего) и результат в основном совпадают (целесообразность). Если же человек получает результат, существенно отличный от задуманного («Сделать хотел грозу, а получил козу»), то нет оснований считать его деятельность свободной. Так мы еще раз убеждаемся в неразрывной связи свободной человеческой деятельности с истиной. Не случайно критерий истины и критерий свободной деятельности совпадают: практика – это проверка адекватности цели деятельности и ее результата. А истина в современной диалектико-материалистической интерпретации – суждение, адекватность которого предмету суждения неоднократно подтверждена общественной практикой.

В контексте сказанного о свободе деятельности можно прийти к выводу, что военнослужащий гораздо в большей степени несвободен, чем гражданский человек, ибо помимо Конституции РФ, УК РФ и других гражданских кодексов, положений, правил и т. п. он подчинен Присяге, многочисленным уставам, приказам и распоряжениям. Однако все законодательные документы определяют не только обязанности, но и права военнослужащего. В этом отношении всякая несвобода диалектически связана со свободой.

Диалектическим «партнером» свободы является не необходимость, а несвобода. Для различных классов и слоев граждан государства формы несвободы разные. Но для всех свободных граждан в государстве главным типом несвободы является их ответственность перед законом, уставами, нормами морали, положениями, приказами и распоряжениями наделенных определенной властью вышестоящих в иерархии общественной деятельности лиц.

Не секрет, что ответственность военнослужащего выше ответственности гражданского служащего, так как на него распространяются не только общегражданские правовые нормы, регламентирующие деятельность всех граждан, но и специальные нормы поведения и деятельности военнослужащих, предписываемые воинскими уставами, приказами и распоряжениями командиров. Означает ли это, что военнослужащий не обладает никакой личной свободой и все его действия вынуждены, ориентированы на ответственность, жестко регламентированы?

Если бы это было так, то военнослужащий превратился в «говорящее орудие» – раба. Но раб не имеет свободы воли и именно в силу этого не несет ответственности за действие, совершенное как исполнение чужой воли. Никому не придет в голову подвергнуть наказанию топор, при помощи которого совершено преступление. Г. Гегель писал в «Философии права»: «В деянии преступника заключена и формальная разумность, воление единичного человека. В том, что наказание рассматривается как содержащее его собственное право, преступник почитается как разумное существо» [6, с.148]. Смысл права преступника на наказание состоит в том, что наказуемая воля сохраняет свою свободу. Здесь как нельзя более ярко проявляется диалектическая связь свободы и ответственности. Ответственность возлагается лишь на разумное существо, обладающее в момент действия, подпадающего под ответственность, свободой воли. Ответственность не распространяется на несвободного в своих действиях человека. Именно это обстоятельство использовали в свое оправдание нацистские преступники на Нюрнбергском процессе 1945 году. Обвиняемые – министры и военачальники третьего Рейха Геринг, Кальтенбруннер, Риббентроп, Кейтель, Розенберг и другие как заклинание повторяли: «Я солдат, я выполнял приказ фюрера». Отвечая им, один из главных обвинителей на процессе Роберт Джексон (США) заявил: «Гитлер не унес всю ответственность с собой в могилу. Вся вина не завернута в саван Гимmlера. Эти живые избрали этих мертвых себе в сообщники в этом грандиозном братстве заговорщиков, и за преступления, которые они совершили вместе, должен заплатить каждый из них». Сказанное относилось ко всем нацистским преступникам, невзирая на их чины и должности.

Еще одна проблема свободы человека, которую часто не принимают во внимание: свобода человека как члена общества не может быть абстрагирована от этого общества. Об этом правильно заметил в своей авторской статье Президент РФ В.В. Путин: «Общество свободных людей – совсем не то же, что толпа одиноких расчётливых эгоистов, безразличных к общему благу. Мы никогда не были и не будем такой толпой. Личная свобода продуктивна, если ты помнишь и думаешь о других. Свобода без нравственной основы превращается в произвол» [7]. Такая диалектика личного и общественного в проблеме свободы в полной мере относится к деятельности военнослужащего. Военский устав и есть тот документ, который раскрывает эту связь, по существу, в каждой из своих статей. Например, в ст. 8 Устава внутренней службы Вооруженных Сил Российской Федерации отмечается, что «содержание и объем прав, обязанностей и ответственности военнослужащих зависят от того, находятся ли они при исполнении обязанностей военной службы или нет» [8, ст. 8]. Таким образом, права, обязанности и ответственность каждого определяется связью с конкретным социумом, в который он включен в различные моменты своей жизнедеятельности. Вне исполнения своих служебных обязанностей военнослужащий соотносит свои права и обязанности с действующим гражданским законодательством. Оно определяет множество возможных действий, которое представляет единство свободы и ответственности гражданина. Внутри этого множества каждый гражданин осуществляет свободу, выбирая одно из возможных действий. Выход за границы этого множества представляет собой преступление против конкретного законодательства или предписаний морали. Например, свобода действий водителя автомобиля ограничивается правилами дорожного движения. Знание их позволяет водителю (имеющему и навыки управления автомобилем) свободно выбирать направления движения – двигаться с определенной скоростью вперед, назад, влево и вправо, осуществлять разворот. Но если водитель вообразит, что эта его свобода ничем не ограничена, и начнет нарушать ПДД, то такая «свобода» рано или поздно обернется преступлением и ... ограничением свободы.

К случаям, относимым к исполнению военнослужащим обязанностей военной службы, та же статья причисляет «... действия, признанные судом совершенными в интересах личности, общества и государства», что еще раз подчеркивает, что все действия отдельного человека находят правовую оценку только в социальном контексте.

Свобода деятельности военнослужащего, как и гражданского лица, определяется знанием объективных законов природы и законами общественного бытия, расписанными во всех законодательных документах – от Конституции до Устава внутренней службы ВС РФ» и других воинских уставов. Ведь именно этими документами определяется деятельность военнослужащего в единстве со своим воинским подразделением и Вооруженными силами РФ. При этом на военнослужащего в полной мере распространяются положения о свободе и ответственности, содержащиеся в основных законах государства: «Никто не вправе ограничивать военнослужащих в правах и свободах, гарантированных Конституцией Российской Федерации, федеральными конституционными законами, федеральными законами» [8, ст. 9].

Так же как знание объективных законов природы позволяет человеку свободно и сознательно, руководствуясь этими законами, действовать в природных условиях, так и знание законодательных документов позволяет избежать ошибок в сознательной военной деятельности. Генералиссимус России А.В. Суворов в прославленной своей работе «Наука побеждать», раскрывает значение военных знаний и умение их применить в борьбе за свободу и независимость Родины. Многие из поучений Суворова актуальны и по сей день и превратились в афоризмы. Например, призыв побеждать: «Не числом, а умением!» означает как раз то, о чем речь идет в этой статье. Свобода действия в бою каждого военнослужащего и целой армии определяется хорошим знанием стратегии и тактики ведения боя, владением оружием. Здесь ценой незнания, неумения или ошибки может быть и жизнь одного военного, и поражение, и гибель большого воинского подразделения.

Незнание или неумение применить истинное знание зачастую приводит к преступлению – невыполнению приказа командира, требований Устава Вооруженных сил и тому подобным негативным последствиям. Результатом может быть лишение свободы, а то и (в ходе военных действий) смертная казнь.

С другой стороны, знание и понимание приказа, объективной ситуации боя являются основой свободы действий военнослужащего, позволяют ему творчески, с применением смекалки выполнить поставленную задачу ценою минимальных потерь людей и военной техники.

Также определена свобода деятельности военнослужащего и в мирное время. К примеру, водитель боевой машины получил приказ доставить технику в определенной пункт назначения. В чем состоит его свобода? Знание мототехники, возможных путей, ведущих в пункт назначения, и правил дорожного движения позволят ему свободно выбрать оптимальный путь, противостоять непредвиденным обстоятельствам и доставить ценный груз в пункт назначения в максимально короткие сроки и без потерь. Напротив, незнание перечисленного выше, собственная нерадивость могут привести к невыполнению приказа, а то и к преступлению. Ответственность за преступление всегда определяется с учетом той реальной свободы, которой обладал военнослужащий в момент выполнения приказа. Например, если он столкнулся с природной катастрофой или другой «непреодолимой силой», то может быть освобожден от ответственности. Здесь мы еще раз сталкиваемся с неразрывной связью свободы и ответственности, с их объективными и субъективными основаниями.

В воинской деятельности наиболее ярко проявляется положение «свободное развитие каждого является условием свободного развития всех» [9, с. 447]. Ориентация на коллективное взаимодействие – сущность военной службы и ведения военных действий любого масштаба. В этом еще раз проявляется общественная сущность человека, для которого не может быть личной свободы без свободы социума (в данном контексте воинского подразделения), к которому он принадлежит. Нравственная свобода советского воина многократно проявлялась во время Великой Отечественной войны – в героических подвигах во имя Родины, своего народа. Десятки тысяч наших воинов совершив нелегкий, но свободный нравственный выбор, жертвовали собой во имя общего дела победы над врагом. Свобода и ответственность военнослужащих Вооруженных сил Российской Федерации определена объективно объективной стохастичностью процессов воинской деятельности и субъективно – знанием этой стохастичности и знанием и пониманием Присяги, Устава Вооруженных сил, приказов командования. Кроме того, военнослужащие пользуются практически всеми свободами и правами граждан РФ с некоторыми ограничениями, определенными Уставом внутренней службы. Например, военнослужащий не вправе работать в составе политических организаций и объединений. Но он может участвовать в избирательной компании любого уровня, вплоть до избрания президента страны.

Ясно, что осуществление указанных прав и свобод предполагает их знание, знание Конституции РФ, других законодательных актов, включая, например, закон «Об образовании в Российской Федерации», Жилищный кодекс РФ, Уголовно-процессуальный кодекс Российской Федерации и даже знание Правил дорожного движения. Незнание законов, как было сказано, не освобождает от ответственности, а знание является субъективным основанием свободы.

До сих пор речь шла о нравственной и правовой свободе военнослужащего. Однако осуществление любых свобод невозможно отделить от свободы физической. Свобода военнослужащего (может быть в большей степени, чем гражданского человека) во многом определяется его физической подготовкой.

Слабый, больной, неустойчивый к изменениям внешней среды человек вообще не может быть военнослужащим, и это строго учитывается при призыве в ряды Российской армии, наборе в военные учебные заведения. Свободный военнослужащий должен легко и свободно выполнять все нормативы военно-спортивного комплекса.

Важнейшей формой бытия относительной свободы в деятельности военнослужащего является риск. Риск как форма осуществления свободной деятельности военнослужащего естественно вплетен в повседневную армейскую жизнь. Слово «риск» мы обычно связываем с действиями или ситуацией, потенциально опасной для жизни. Выполнение боевых задач в мирное время (боевое дежурство, караульная и гарнизонная служба), даже несение внутренней службы таит в себе элементы риска, опасности для жизни военнослужащего. Поэтому расчеты на боевом дежурстве, карауле, начальники патруля, дежурные по части имеют при себе боевое оружие.

Элемент риска для жизни человека всегда есть при запуске пилотируемых космических кораблей, в работе космических экипажей на орбите. Техническая неисправность, встреча с метеоритом может стать причиной гибели экипажа. Поэтому профессия космонавта до сих пор требует проявления высокого мужества, отваги, а порой и подлинного героизма.

В военное время деятельность военнослужащего всегда связана с риском для жизни.

Понятие «риск» обозначает также действие наудачу в надежде на счастливый конец. В работе петербургского философа А.П. Альгина «Риск и его роль в обществе» [10] показано, что риск является характеристикой любой человеческой деятельности.

Как проявляется в риске свобода человека по отношению к внешней ситуации и его внутренним субъективным качествам?

Во-первых, риск есть деятельность, которая не имеет стопроцентной вероятности на успех. Она осуществляется, несмотря на осознаваемую опасность неудачи. Практически любое новое начинание связано с такой формой риска.

Во-вторых, риск – это деятельность, при осуществлении которой человек все же рассчитывает на успех при неоднозначной объективной ситуации. Например, командир подразделения, вступившего в бой с противником, конечно же, рассчитывает на успех, хотя, как правило, не обладает исчерпывающей информацией о противнике, о возможностях противника получить помощь и поддержку.

В-третьих, риск – это деятельность с осознаваемой возможностью допустимой ошибки в самой деятельности по достижению поставленной цели. Такая форма деятельности характерна, например, при испытании новых образцов техники и оружия, в частности ракетно-космической техники. Отработка изделия идет через серию неудачных пусков, но в конце концов ракета начинает летать с высокой степенью надежности. Такой стала российская ракета-носитель «протон» самая надежная в мире.

В-четвертых, риск – это образ действий в неясной, неопределенной ситуации, когда трудно избрать какой-либо вариант действий, а действовать необходимо. В годы войны было совершено немало боевых операций, когда командир, получал конкретное задание, слышал: «действовать по обстановке!»

В-пятых, риском можно назвать такую деятельность, которую осуществляет человек, надеющийся на успех, но недостаточно подготовленный для этой деятельности. С такой формой деятельности мы часто сталкиваемся, когда назначается на командирскую или иную должность человек, обладающий недостаточным опытом и знаниями для ее исполнения.

Таким образом, риск в воинской деятельности связан с преодолением неопределенности в ситуации неизбежного выбора. Риск включает возможность оценить вероятность достижения предполагаемого успеха, возможность корректировать или прекращать такую деятельность. В противном случае мы имеем дело не с риском, а с авантюрой.

Как видно, свобода военнослужащего включает в себя и свободу на ошибку, и свободу на риск, и свободу отказа от риска, и свободу на прекращение рискованного действия.

Подводя итог произведенного исследования, можно определить основные детерминанты неразрывного единства свободы и ответственности в деятельности военнослужащего.

*Объективные детерминанты* указанного диалектического единства следующие:

1. Объективный уровень развития производительных сил общества, и, следовательно, средств вооружения, что определяет многообразие спектра объективных возможностей об-

щества и человека, в том числе военнослужащего, расширяя или сужая свободу выбора средств деятельности.

2. Объективный уровень овладения военнослужащим (военными подразделениями) приемами ведения военных операций (умения).

*Субъективными детерминантами* свободы выступают:

а) адекватность гражданского и военного законодательства объективным процессам развития общества и вооруженных сил.

б) уровень знания объективных законов развития общества и природы, военного дела, т. е. объективных тенденций-возможностей такого развития;

в) уровень знания действующего гражданского и военного законодательства;

г) морально-волевые характеристики военнослужащего, позволяющие ему объективировать знания в своей конкретной деятельности, пойти на риск в выборе возможных действий.

### Список используемых источников

1. Антология мировой философии. В 4 т. – М.: Мысль, 1969. – Т. 1, ч. 1. – 576 с.
2. Лаплас П.С. Опыт философии теории вероятностей. – М.: книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 208 с.
3. Спиноза Б. Избранные произведения. В 2 т. – М.: Госполитиздат, 1957. – Т. 1. – 631 с.
4. Гегель Г.В.Ф. Лекции по философии истории. – СПб.: Наука, 1993. – 480 с.
5. Маркс К., Энгельс Ф. В. Боргиусу, 25 января 1894 г. // Соч. в 50 т. –2-е изд. – М.: Политиздат, 1966. – Т. 39. – С. 174–177.
6. Гегель Г. Философия права. – М.: Мысль, 1990. – 524 с.
7. Путин В.В. Россия сосредоточивается – вызовы, на которые мы должны ответить // Известия. –2012. 16 янв.
8. Устав внутренней службы Вооруженных Сил Российской Федерации: утв. указом Президента РФ № 1495 от 10 ноября 2007 года (ред. от 21.02.2019). ст. 8. – URL: <https://воинские-звания.рф/ustavy-vs-rf/ustav-vnutrennej-sluzhby/> (дата обращения: 17.03.2018).
9. Маркс К., Энгельс Ф. Манифест Коммунистической партии // Соч. в 50 т. –2-е изд. – М.: Политиздат, 1966. – Т. 4. – С. 419–459.
10. Альгин А.П. Риск и его роль в общественной жизни. – М.: Мысль, 1989. – 187 с.
11. Антонов Ю.Н., Репях Н.А. Свобода и ответственность в деятельности военнослужащих. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 1999. – 39 с.

Aerospace monitoring and control system model / V.N. Aldohina, R.A. Gudaev, M.S. Smirnov, S.I. Shaymuhametov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 8–19.

A model of the monitoring and control system for aerospace is presented, which allows the calculation of a wide range of parameters in the interests of assessing the quality of information support for information consumers.

*Key words: model, monitoring and control system, information tool, aerospace, detection, tracking.*

Kalinin V.N. About a problem of optimum control of operations of information interaction of the spacecraft with a surface of the Earth in the conditions of purposeful indignations // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 20–30.

In the article the problem of space cybernetics connected with optimum control by operations of information interaction of the space vehicle with a surface of the Earth in the conditions of purposeful disturbances is considered. The space vehicle is thus interpreted as information active mobile object which makes uncontrolled flight on a scheduled orbit round the Earth. The dynamic model of informational interaction is presented in the form of a linear integral operator of Fredholm. As criterion of an optimality of control the requirement of a maximum linear terminal функционала, characterizing relative value of the received information serves. The revolting environment has antagonistic character and its purpose – minimization indicated функционала in the conditions of limitation of corresponding resource of admissible disturbances that leads to consideration of corresponding infinite antagonistic game. The important version in the applied relation of the considered general theoretic-game problem for which the solution is received by the analysis of equivalent differential game with the subsequent use of the concept of immersion of Lagrange and a principle of a maximum of Pontrjagin is investigated.

*Key words: space cybernetics, the space vehicle, informational active mobile plant, operation of informational interaction, infinite antagonistic game, an equilibrium point, a Hilbert space, compactness, a maximum principle of Pontrjagin.*

Kolesnikov K.G., Masalkin A.A., Moskvina B.V. Parametric optimization of communication network information exchange with a dynamically changing structure. // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 31–36.

The problems of parameters optimization of information exchange of communication network with dynamically changing structure are considered. The change in the structure of network is caused by space communication points movement. The intervals of structure constancy are distinguished based on analysis and forecast of network structure changes. In situations where the network parameters (especially bandwidth of communication channels) do not allow solve the objectives with the proper quality (transmission of the required amount of information) it is advisable to optimize parameters.

*Key words: target functioning, dynamically changing structure of communication network, parameters optimization, math programming.*

Privalov A.E., Khlebnikov S.G. Multi-agent imitation model of cosmodrome functioning at apsystem level // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 37–44.

The article presents the results of the development and implementation of a new simulation model of the functioning of the cosmodrome at the level of APS systems. The developed model is based on an approach based on multi-agent technologies, the use of which is conditioned by the dynamically changing structure of the cosmodrome as well as the structure of the tasks being solved

due to failures of technological equipment. The use of the model for solving the problem of analyzing and optimizing the management of the cosmodrome resource flows is substantiated.

*Key words:* APS-system, resource management, IDEF0-diagram, cosmodrome, launch of a spacecraft.

Skvortsov D.V. The approach to modeling the functioning of the spacecraft in the conditions of influence of space factors with the use of artificial neural networks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 45–57.

An approach to simulating the functioning of spacecraft is presented, combining statistical simulation of the functioning of a spacecraft under the influence of space factors and an artificial neural network (ANN) trained using data obtained in a numerical experiment. An algorithm for the synthesis of ANN, intended for evaluating the technical state of the spacecraft, is considered; an example of the algorithm implementation is presented. Based on the obtained results, a rationale was given for the possibility of using ANN with a limited nomenclature of source data for evaluating the technical state of the spacecraft under conditions of a lack of information about the simulated process.

*Key words:* spacecraft, technical condition, artificial neural network.

Skorohodov Y.A. Model and algorithm for functioning quality estimation of space systems for automatic mobile object identification and localization // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 58–69.

The paper presents a model and algorithmic complex for functioning quality estimation of space systems for automatic aircraft and ships (hereinafter referred to as moving objects) identification and localization based on the signals reception from on-board radio equipment designed to improve traffic safety and prevent maneuvering objects collisions in the air and surface space. The developed algorithms are tested on real experimental data, in particular, the automatic identification system, and can be used to justify the requirements in the design of space technology prototypes.

*Key words:* automatic identification system, automatic dependent surveillance-broadcasting, AIS, ADS-B, simulation, orbital constellation, space systems, information processing.

Abazina E.S., Tsvetkov K.Y. Conceptual model of stegosystems's interaction as a part of the open systems interconnection basic reference model // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 70–80.

The paper presents an approach to the formation of a conceptual model of interaction of steganographic systems. There are functions of each level of this model, tasks and possible solutions here. This solutions will allow further research on the construction of promising stegonetWORK. StegonetWORK elements and it's classification according to the active tasks are refined in this paper.

*Key words:* digital and computer steganography, hidden communication, stegosystem, stegonetWORK, stegochannels, the conceptual model of the interaction of stegosystem.

Arseniev V.N., Belihin E.N., Trofimov I.A. Definition of the spacecraft movement parameters by results of their measurements by onboard and land measuring means // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 81–88.

The problem of estimation of movement parameters vector of the spacecraft (SC) under the data, received from land and onboard measuring means, is considered. It is shown that the weighed account of the measuring information on movement parameters of SC allows to raise accuracy of estimation of these parameters, and the increase of number even enough the rough measurements, which are not abnormal, also allows to raise quality of the estimation. The multidimensional ap-

proach to the decision of this problem is allowed to receive the integrated estimation of a state vector SC and a correlation matrix, is characterizing its accuracy. The example, visually showing efficiency of application of received results, is presented.

*Key words: the spacecraft, movement parameters, measuring complexes, unequal measurements, the integrated estimation.*

Ivanov A.V. The model of system of one-position positioning of sources of the radio emission of high-frequency range considering space-polarization parameters of radio waves // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 89–96.

The factors influencing the accuracy of assessment of coordinates of sources of a radio emission of high-frequency range positioning systems are considered. The model of the triply orthogonal antenna allowing to determine parameters of a full vector of the field in one collection point is described. The mathematical apparatus on the basis of algebra of quaternions allowing to describe process of distribution of radio waves of any polarization in any direction is considered. The advanced model of system of one-position positioning of sources of a radio emission of high-frequency range considering space-polarization parameters of radio waves is offered.

*Key words: distribution of radio waves, triply orthogonal antenna, space-polarization parameters of a radio wave, quaternion.*

Acceptable level of frequency instability during spatial synchronization of large-size active phased array antennas based in space / T.O. Myslivtsev, V.I. Nevzorov, V.F. Pavsky, V.N. Tsykunov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 97–102.

In the article two variants of construction of antenna system of frequency synchronizer are considered. The permissible level of frequency instability in the spatial synchronization of the antennas. The necessary us for the functioning of active phased array space-based.

*Key words: active phased array antenna, frequency instability.*

About estimation of quality of geodetic support of the unprepared area / V.F. Alekseev, A.V. Prokofiev, I.V. Chernov, V.I. Yakunin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 103–110.

In this article, based on the main characteristics of modern military conflicts, the need to take into account the autonomy of the methods of geodetic definitions in the geodetic support of troops in the territory remote from the borders of the Russian Federation is justified. For the completeness of accounting for the property of autonomy in geodetic training in a remote area, the proposed article justifies a method for calculating the indicator of autonomy of methods for determining geodetic data. A criterion for evaluating the suitability of the method for determining geodetic data is also given, based on the property of the autonomy of geodetic method definitions.

To assess the target properties of the geodesic preparation process, a method for presenting a generalized indicator of the effectiveness of geodetic training was proposed, at the same time taking into account the scope of geodetic works and the accuracy of obtaining geodetic data. This approach allows a formalized transition from the assignment to the definition of geodetic data to the selection of methods for geodetic determination and the formation of options for geodetic preparation of the territory outside Russia.

*Key words: autonomous determination method, geodesic data, autonomy, accuracy, efficiency.*

The method of automated creation of a special map of masking properties of forest vegetation on the materials of aerospace survey / V.F. Alekseev, A.G. Osipov, A.V. Prokofjev, R.R. Khayrullin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 111–116.

The technique developed by the authors allows to create special maps of masking properties of forest vegetation using the materials of aerospace survey in the automated mode. The results can be used to make decisions on the management of troops and weapons.

*Key words: masking properties of forest cover, natural masks, vegetation index, decoding features.*

Alekhin S.G., Gotur I.A., Semenov V.V. A method for calculating the atmospheric transparency coefficient for thermal imaging systems in the spectral range of 8–12 microns // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky, 2019. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 117–128.

Today, thermal imaging technology has found a variety of applications in science and everyday life. At the same time, the scientific problems of dissemination of thermal imaging technology have taken a special place of infrared radiation in the atmosphere. For the successful application of thermal imaging positioning and range-finding, tracing and navigation systems, and so on, quantitative data are needed about the effect of the atmosphere on infrared parameters.

In practice, in the absence of instrumental meteorological observations, it is impossible to calculate the atmospheric transparency characteristics for infrared radiation taking into account the functional dependencies between the meteorological factors. Usually stochastic relations are investigated and empirical dependences are built. The authors have found such empirical dependencies, which in combination with the processing of the results of similar numerical experiments by other researchers allowed to develop a new method for calculating the coefficient of atmospheric transparency for infrared radiation in the range of 8–12 microns.

*Key words: thermal imaging systems, coefficient of atmospheric transparency, attenuation of infrared radiation.*

Astapovich A.V., Litinskiy E.I. Justification of the location free station of the electronic total station for surveying the situation and the relief of the correction section // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 129–136.

A strict and simple solution to the problem of a priori assessment of the accuracy of filming by electronic total stations with software that allows online to carry out the survey of the situation and terrain in the areas of correction of moving object ground navigation system. Simple formulas for calculating the mean quadratic errors in determining the coordinates of the free station based on the results of linear and linear-angular measurements of up to two reference points of the survey justification are obtained. The analysis of the obtained formulas with the selection of the area of the best location of the point determined by the linear notch is performed. It is proved that when the free station is located in a favorable zone, the error in determining the coordinates of the device location based on the results of linear-angular measurements relative to the initial point cannot exceed the tripled error of measurements by electronic total stations of line lengths. It is shown that the accuracy of the survey is due to the error of the position of the free station relative to the reference point and errors in measuring the direction and distance to the picket. The distance measurement error determines the longitudinal position error of the picket point relative to the free station. The error of the transverse directions determines the error of the position of the picket points are relatively free of the station.

*Key words: free station, the shooting situation and terrain, inverse linear and linear-angular serifs, planning precision survey work, the a priori assessment of the accuracy of survey works, longitudinal and lateral displacement, mean square error.*

The method of calculating the frequency of observations of areas of orbital grouping of space vehicles taking into account the details of the shooting / A.P. Vishinskiy, M.N. Zots, A.V. Kolesnik,

M.Y. Ortikov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 137–144.

The article deals with the content of the method of calculating the periodicity of observation of areas by the orbital grouping of spacecraft, taking into account additional requirements related to the detail and performance of space imagery. The practical relevance of the problem being solved consists in the necessity of expansion of the indicators determining the effectiveness of control areas (objects) with the use of space vehicles.

*Key words: space survey, frequency of observation, detail, optimization, cyclogram, ranking.*

Danilyuk A.S., Dianov S.V., Tavalinski D.A. Estimation of joint applicability of algebraic and statistical methods of the analysis of the block structure linear adjusting codes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 145–151.

Features of algebraic and statistical methods application of the analysis of the linear adjusting codes of block structure in the binary sequences in the conditions of aprioristic structural and parametrical uncertainty are considered.

The authors proposed the approach of possible applicability limits evaluation of the given method on the basis of solving systems of linear equations with statistical rejection of erroneous code words and statistical averaging of solution results while determining block structure linear adjusting codes with a long block.

*Key words: analysis of codes, binary sequence, the block structure linear corrected code, linear equation system, statistical analysis.*

Dashkin E.R., Poljakov V.V. Way of joint reduction of redundancy of data presentation and estimation of rank covariance of the matrix of the image // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 152–159.

The way of reduction of redundancy of data presentation of the image registered by the matrix optical gauge, and procedure of a finding of its rank covariance matrixes are offered at detection of elements of «space garbage» with use of land optical-electronic system. The interrelation is shown between we estimate quantities of elements of decomposition of the optical gauge of the purposes occupied with signals and stars in the image and reduction of its redundancy.

*Key words: circumterrestrial space, technogenic objects, «space garbage», optical-electronic system, detection of signals, the optical gauge, reduction of redundancy of images, a rank of multi-dimensional process.*

Efremenko A.N., Kanarskiy I.D., Koroleva O.A. Methodology operational evaluation of geophysical conditions, favorable for development of natural hazardous processes and phenomena // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 160–169.

Evaluation approach review of the conditions` genesis of natural hazardous using fuzzy logic (method Shortlife-Buchanan). Technique suggestion of the realization of evaluation approach, and the technique`s results, which based on the experimental control of seismological processes analysis. Such approach immediately and effectively estimate the phase of the exact natural hazard, and may also be used in geophysical (hydrometeorological) provisioning practice of the various branches of economics.

*Key words: natural hazard, risk levels, the complex of geophysical (hydrometeorological) indexes of the development of natural hazards` conditions; hypothesis of the actual stage of the natural hazards` development danger; identification of the area with the dangerous stage of the natural hazards` development, the seismotectonic deformation, seismic active and calm zones.*

Shulgin A.N., Shushakov A.O. Research of the influence of methods control computational load mobile multiprocessor computing systems on their autonomy // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 170–174.

The methods of control of computational load as the main tool to reduce the energy intensity of mobile computing systems and their impact on the battery life of the complexes are considered. The results of a comparative analysis of the energy efficiency of multiprocessor systems with different methods of controlling the computational load are presented. An approach to the estimation of autonomy of mobile computing systems through the relative energy savings of an autonomous power supply with different multiprocessor configurations is proposed. Based on the analysis of the research results, it is concluded that it is possible to increase the autonomy of mobile computing systems based on the method of intelligent control of computing load.

*Key words: mobile computing complex, autonomy, computational load, energy intensity, multiprocessing.*

Dombrovskiy A.F. Approach to restoring unknown communication protocols on network traffic // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 175–181.

This article discusses approach of restoring data transmission protocols. The methodology laid automated formal methods of modeling programs based on the theory of Communicating Sequential Processes (CSP) C.A.R. Hoare. In the notation of CSP developed models of typical components of protocols and model programs for processing data flow protocol. Solution of the recovery protocol is reduced to the stepwise refinement of the program data stream processing an unknown protocol.

*Key words: reverse engineering, communication protocols, communicating sequential processes.*

Method of estimation of control systems accuracy characteristics of perspective objects on the limited number of natural trials / V.N. Arseniev, K.G. Zinovev, I.A. Trofimov, A.A. Yadrenkin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 182–188.

The problem of estimation of control systems accuracy characteristics of perspective objects over the data, received before and after trials of pilot samples, is considered. For decision of this problem is used the method of a priority of the experimented information. This method allow receiving the more accurate estimations, if the aprioristic information does not contradict results of experiments. Analytical expressions for a posteriori estimate of accuracy characteristics and benefits in accuracy or number of experiments are received. The example of application of the received results is given.

*Key words: the accuracy characteristic, the aprioristic information, the limited skilled data, the posterior estimation, benefits of estimate.*

The analysis of statistical characteristics of measurements of navigation parameters at failures, refusals and deterioration in accuracy in operation of measuring instruments / S.Y. Bystrov, Y.A. Kuzmichev, Y.V. Petrov, I.A. Shevkunov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 189–196.

Estimates of statistical characteristics of measurements of navigation parameters are considered. Analytical expressions for population means and dispersions of estimates of statistical characteristics of measurements at failures, refusals, and deteriorations in accuracy are received. Analysis of statistical characteristics change was carried out. Results of analytical calculations and dependence of statistical characteristics change on interfering factors are given.

*Key words: statistical estimates, statistical characteristics, failures, refusals, deterioration in accuracy, serviceability check, navigation sensors, mutual correlation.*

Vivchar R.M., Reshetnikov D.V. Estimation of the influence of the parameters of the system of operation of the technological equipment of the rocket and space complex on the probability of performing the technological operation for a given time // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 197–206.

The article deals with the issue of modeling the process of using the technological equipment of the rocket and space complex and on its basis the assessment of the influence of the parameters of the system of operation of technological equipment on the probability of performing the technological operation for a given time, and, consequently, on the probability of preparing and launching a space rocket for a given time. The relevance of the topic is determined by the need to provide the required value of this probability. The results of the evaluation of the influence of the parameters of the process equipment operation system on the probability of its performance for a given time on the example of the technological operation of the technological schedule of the Soyuz-2.1.a launch vehicle preparation are presented.

*Key words: rocket and space complex, operation system, technological equipment, launch vehicle.*

Golovchinskij V.O., Kozlov V.V., Lagoon A.V. Coordination of resource allocation in the hierarchical structure of the rocket and space complex// Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 207–215.

The article presents the results of a study on the coordination of resource allocation in the structure of the rocket and space complex, provided that the quality of its life cycle is improved. Indicators of resource allocation are defined and the algorithm of its calculation is developed. As a result, the procedures work coordination system resource allocation using the principle of interaction allowed to show the reduction in the cost of operating the rocket-space complex.

*Key words: rocket and space complexes, structural element, resource allocation, life cycle, hierarchical systems, indicator, coordinating processes.*

Vacuum equipment for fire tests of electric rocket engines / P.S. Goncharov, Y.V. Kuleshov, V.V. Martynov, O.Y. Cybin, N.A. Shunevich // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 216–223.

The analysis of vacuum processes and modes, technical means and technologies, as well as ways to overcome some of the limitations in achieving the required performance of the vacuum equipment for electric rocket engines fire testing was carried out.

*Key words: vacuum system, testing, electric rocket engine.*

Switching power supply for fire tests of electric rocket engines / P.S. Goncharov, V.V. Martynov, M.M. Penkov, V.M. Skutnitskiy, O.Y. Cybin, N.A. Shunevich // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 224–228.

For experimental testing and development of a promising electric rocket engine, development of a specialized high-voltage power source was required. Based on the analysis of the requirements and existing similar technical solutions, a circuit diagram has been developed, the necessary circuitry has been determined, and a switching power supply has been implemented. Using the created source, tests of a device for ionizing the working fluid by application of a new technology were carried out. The experiments showed the correctness of the adopted circuit design and the reliable operation of the switching power supply.

*Key words: experiment, ionic electric rocket engine, power source, high voltage pulses, ionization, electric circuit, master oscillator.*

Mathematical modeling of planning of stages of generation and consumption of electric power onboard systems of space vehicles: scenario approach / V.I. Gorbulin, D.L. Kargu, S.A. Poliakov, N.V. Radionov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 229–236.

The issues of developing mathematical software to increase the energy efficiency of the power supply system (SES), which is necessary to maintain a high level of energy efficiency of solar panels throughout the entire period of active existence of Earth remote sensing spacecraft (ERS), are considered. The basic concepts and definitions are formulated. The mathematical formulation of the problem is carried out for planning the metering of generated and consumed electricity by onboard systems of spacecraft remote sensing with a solar power plant, which takes into account design features and a formalized description of the electrical connections of solar panels.

*Key words: spacecraft, on-board power supply system, scenario approach, energy efficiency.*

Gorbulin V.I., Kryzhanovskiy V.I., Trofimov I.A. Time-optimal turn algorithm of the spacecraft when observing different types of objects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 237–249.

An iterative algorithm for calculating the trajectory of the optimal speed of the turn of the SC for pointing the observation equipment at a single object located on the earth's surface is developed. At the end of the turn, the angle and angular velocity of the line of sight of the observation equipment should be equal to the angle and angular velocity of the direction line to the target to prevent blurring of the image. Based on the analysis of the mathematical model of the direction line movement to the object, a simplified method for solving the problem is proposed.

*Key words: time-optimal turn, spacecraft, iterative algorithm, aiming at the target.*

Gruzdev N.V., Krupskiy K.A., Shavin A.S. Method of validation of sustainable structure of experimental testing facility in accordance with the needs of space craft tests // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 250–256.

The method of validation of the sustainable structure of the experimental testing facility of a Launch Site (spaceport) on the basis of segmentation of the multidimensional problem of experimental testing facility activation for tests of space crafts has been developed.

*Key words: experimental testing facility, space crafts, quality indicator, efficiency indicator, launch site (spaceport).*

Estimation of errors in the formation of a virtual reference channel in the tests of aviation systems of protection against high-precision destruction / A.A. Doncov, M.A. Karavaev D.A. Nagalin, O.Y. Tonkonogov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 257–265.

Using the measurement error theory, expressions are obtained to estimate the angular errors in determining the angular position of the virtual reference channel and the range to the aircraft. The requirements for the accuracy of determining the coordinates of aircraft during flight experiments to assess the effectiveness of aviation systems of protection against high-precision destruction.

*Key words: aviation complex protection, high-precision defeat, virtual reference channel.*

Dyakov A.N, Kokarev A.S., Pachin A.V. A set of models of the functioning of a mobile system proving spare parts for complex technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 266–275.

The article presents solution to the problem of creation mobile spare parts provision system (MSPS) functioning models, which allow determining the readiness of each unit of the complex as a dependence on indicators of MSPS and the equipment reliability.

Mathematical basis of the models is apparatus of difference equations, that allowed take into account changes in the values of MSPS indicators over time. Presented the results of a computational experiment conducted using developed models.

*Key words: readiness maintenance, technical complexes, spare parts, spare parts provision system, SPTA, difference equations.*

Zavyalova G.M., Lebedev E.L. The technique of input quality control of steels and alloys of special purpose according to statistical data of optical image at microfractographic analysis // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 276–282.

The paper presents the technique of input quality control of structural materials according to the results of statistical analysis of digital images of the tested surface. A diagnostic attribute of the quality of constructional materials was introduced for their microfractographic analysis. The possibility of using the proposed technique for steels and alloys in a wide range of chemical composition is shown.

*Key words: microfractographic analysis, statistical analysis of digital images, brightness histogram of phase components.*

Zakharchuk I.I., Pronin A.N., Roschupkin A.A. Intelligent sensor model of an on-board equipment of the prolonged operation spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 283–289.

Intelligent sensor model of an on-board equipment of the prolonged operation spacecraft model is presented. Estimation of metrological characteristics of serviceability of the sensor is carried out on the basis of statistical processing of the information received from two primary measuring transducers, which have the same static characteristic.

*Key words: spacecraft metrological assurance, intelligent sensor, metrological self-check, statistical methods.*

Zikov D.D., Krupskiy K.A., Spesivtcev A.B. Justification of the directions of development of a system of high-precision measurements tools // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 290–297.

On the basis of mathematical apparatus of processing of surplus measuring information and data on foreign and domestic systems of high-precision measurements tools for the space object estimation of dependence of accuracy of estimation of provision of space object on structure and tactical technical characteristics of high-precision measurements tools is carried out. By results of the analysis of the received dependences the main directions of development of system of high-precision measurements tools, which are confirmed with results of mathematical modeling.

*Key words: space object, inclined range, trajectory measurements, errors of measurements, errors of estimates of location, angular coordinates.*

Kivchun O.R. Bases of construction of the automated control system of power consumption at operation of objects of military infrastructure // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 298–308.

The article deals with proposals for the construction of an automated system of power consumption management in the operation of military infrastructure. The novelty of the proposals lies in the complex use of its main elements: the device of intelligent monitoring, database and hardware-

software complex, implemented static and dynamic modeling in power consumption management based on vector rank analysis.

*Key words: object of military infrastructure, automated power consumption management system, intelligent monitoring device, database, transformed vector rank distribution, vector rank analysis.*

Matyunin A.S., Roslyakov E.M. Model of technical condition of pipeline network of water supply system of objects of space troops // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 309–314.

The results of consideration of the model of the pipeline network, reflecting the size of the leak in the case of damage to the pipeline as a result of long-term operation. Based on the results obtained, the feasibility of using the model of the state of pipelines of water supply systems in the planning of technical maintenance and repair of life support systems is given.

*Key words: water supply, aging, leaks, corrosion, technical condition.*

Mokrousov A.S. Algorithm of formation of the state order for purchase of oil products for armed forces of the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 315–321.

The article analyzes the process of formation of the state defense order for the purchase and supply of petroleum products to the armed forces on the basis of the conclusion of state contracts and the definition of the main directions of development of scientific and methodological apparatus for assessing the logistics parameters in this area.

*Key words: competitive bidding, public procurement market, logistics costs, transaction costs, balance sheet profit, logistics network.*

Altukhov A.I., Kalinin V.N. Multimedia support of lectures as the major didactic component physical formation in military high school // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 322–328.

In article the basic forms of multimedia support of lectures on an example of a course of physics are considered. Short classification of these forms is resulted, the characteristic of their maintenance and construction principles is given. Methodical features of practical application of these forms are considered at lecturing and corresponding examples are resulted

*Key words: lectures, forms of multimedia support.*

Androsov A.M., Sorokin V.P. Experimental verification of the efficiency of the model of physical preparation of cadets of the military academy of communication // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 329–334.

The article discusses the experimental verification of model of physical training of cadets of the Military Academy of Communications. The main theoretical and methodological approaches used in the design of educational and educational technologies in the training of military communications in the discipline of 'physical training' are revealed. These include: transdisciplinarity of physical training, continuity of educational programs, their continuity throughout the performance of military service duties; requirements for the professional activities of graduates of all levels of education, taking into account the carrier growth stipulated by the qualification requirements of the training program; didactic-information (electronic information-educational) environment.

*Key words: physical training, military signalmen, theoretical and methodological foundations of educational technology design, pedagogical experiment.*

Bagretsov S.A., Moldovanova S.M. The model of professional training of scientific-pedagogical and scientific personnel in the university, taking into account the dynamics of the improvement of

weapon systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 335–343.

A qualitative analysis of the dynamic system of training of scientific personnel in the University in the interests of the formation of new research areas caused by the emergence of fundamentally new weapons systems is considered. The concepts of supply and demand for the scientific potential of the University are defined. The definition and quantitative assessment of scientific potential, taking into account the motivational orientation of members of research teams, is proposed. The interaction model is considered as a reduced model of a dynamic system of the third order. The analytical analysis of stability of singular points is given.

*Key words: scientific potential, motivational orientation, synergetics, dynamic systems, relaxation, characteristic equation, stability, special points, node, saddle, focus.*

Bagretsov S.A., Moldovanova S.M. Model of functioning of system of management of preparation of scientific and pedagogical and scientific shots in high school // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 344–354.

The article investigates the issues of mathematical modeling of the processes of functioning of the system of training of scientific, pedagogical and scientific personnel at the University, in particular, analyzes the processes of dynamics of changes in the state of the system of training of NPC with the help of analytical and stochastic models, taking into account the University policy appointments, outflow of candidates, implemented proportions of their movements on the levels of training and availability of vacancies in the system.

*Key words: system of training of scientific-pedagogical and scientific personnel, difference equations, stationarity, linearity, transition matrix, differential equations, eigenvector of the matrix, determinant of the matrix.*

Baranov A.A., Svidzinskaya G.B., Shiff V.K. The process of professional image development the future officers of State Fire Service of EMERCOM of Russia // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 355–364.

Using the method of the semantic differential the conditions of educational and professional activity influence on the formation of attitude to the firefighter career the Universities of EMERCOM of Russia cadets' and correspondence students' was studied. The comparative analysis of ideas of the future career of 1, 3 and 5 years cadets and correspondence students was carried out. The results were processed by factor analysis. The dynamics of value orientations in the learning process was revealed. The results indicate that a holistic view of the profession and a differentiated perception of its features are provided by the consistent formation of professional self-awareness of cadets at all stages of training and is largely associated with the emotional perception of the learning environment in the Universities of State fire service of EMERCOM of Russia.

*Key words: future specialists of EMERCOM of Russia, stages of professional development, image of the profession, cadets, military education, semantic differential method.*

Erofeev A.V., Pokidov L.V. The method of application of the special program complex of the training command post for the formation of students professional competencies in tactical and special training // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 365–369.

The article deals with the process of formation of professional competencies of specialists in the field of tactics of launch forces and spacecraft control in practical training on the discipline "Tactics of launch forces and spacecraft control" using a special software package of training command posts.

*Key words: competence, training and session control spacecraft, technical training, special software, crew, training and command post.*

Ivanov A.N., Selikhina N.V. The system of work of officials of institutions of the ministry of defence of the Russian Federation on the identification, recording and development of individual psychological properties of personality of students in the learning process // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 370–374.

The publication substantiates the need to develop and implement a system of work of officials of universities of the Ministry of defense of the Russian Federation on the identification, accounting and development of individual psychological properties of the personality of cadets, given its structural and functional representation. Conditions and features of functioning of system are resulted, the basic provisions on accounting and control of results of activity of officials of higher education institutions are noted.

*Key words: system of work, individual psychological properties of the personality, development of the personality of students, increase of success of training.*

Kalmichkov I.E., Rakhmatulin A.M., Smirnov D.N. The software technology capacity forming for educational syllabus insertion of specialists training in the area of the radiofrequency signal processing // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 375–380.

In the article the experience of the software technology education in the region of the radiofrequency signal processing is generalized. Background of experience enables to form successfully the capacities in the software technology area for specialists training which have not this activity category as a primary one.

*Key words: the software technology education, the radiofrequency signal processing, programming languages, programming aids.*

Bashkircev V.P., Kasavtsev M.Y. Contradictions of formation of personal qualities of soldiers in the process of military training in daily activities: status, ways and methods of optimization // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 381–389.

The paper identifies two problematic aspects of education of military men. According to the results of the study, the authors formulated proposals to optimize the process of education of soldiers, in terms of the formation of personal qualities. The proposals considered in the work include the developed models of the process of formation of personal qualities of soldiers in their daily activities and methodological recommendations for improving the process of formation of personal qualities of soldiers in their daily activities. The results of their approbation in the units of the Academy are also presented.

*Key words: the commander of the unit, the pedagogical impact, the formation of the personal qualities of the soldiers, activities of daily living, influence in the interaction process, the correction generated by the personal qualities of soldiers.*

Kofnov O.V., Sheludyakov A.M. Formation of skills of automated modeling of block schemes of GNC during practical classes of technical drawing // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 390–394.

The technique of formation of block diagrams of devices using the computer appliance for the automatic construction in the framework of mastering the discipline "Engineering and computer graphics" by cadets is presented. The created software package can be used not only in training but also in designing.

*Key words: professional education, block diagram, structural scheme, computer graphics, Excel, Graphviz, GNC, graph, DOT, VBA.*

Kuzhekin N.S., Myshko V.V., Chikurov V.A. Model of learning results assessment of students in the course of the boundary control // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 395–402.

The experience of the organization of boundary control of progress of A.F. Mozhaisky Military Space academy's students is analyzed. Specific examples and practical recommendations on planning and evaluation of learning results during boundary control are given.

*Key words: military specialists training, types of control, boundary control, mandatory minimum of training results, indicators and evaluation criteria.*

Stoljarov A.L. Conditions for the successful implementation of pedagogical monitoring of the formation of competencies of cadets of military universities // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 403–406.

The organizational, methodological conditions, as well as the conditions associated with the automation of the process of pedagogical monitoring, allowing the most effective use of pedagogical monitoring tools for the formation of students' competences in the educational process of a military university

*Key words: pedagogical monitoring, competencies, professional competence, military education, quality management training*

Kuzhekin N.S., Repyakh N.A., Hrustova A.N. The ideas of Russian cosmism in the works of A.V. Sukhovo-Kobylyina // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 407–411.

The article discusses the philosophical views of one of the founders of Russian cosmism A.V. Sukhovo-Kobylin, who dreamed of a wonderful star future of spiritual humanity.

*Key words: Neo-Hegelianism, Darwinism, Universe, man, humanity, inspiration, world-historical process, evolution, philosophy, technique.*

Ogorodnikov V.P., Repyakh N.A. The dialectics of freedom and responsibility in the activities of the soldier // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 668. – P. 412–420.

The work reveals the falsity and heuristic futility alternatives "freedom or necessity". Shows the role of the dialectic-materialistic interpretation necessity and chance for understanding unity of freedom and responsibility. Demonstrates that the freedom of critical its base has a knowledge of the truth. Identify the objective and subjective determinants and the founding of the dialectic of freedom and responsibility in the activities of the soldier.

*Key words: freedom and responsibility, necessity and chance, causality and determinism, freedom and truth, objective and subjective grounds for freedom.*

**Абазина Евгения Сергеевна**, преподаватель 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 235-30-63, e-mail: e.s.abazina@yandex.ru

**Алдохина Виктория Николаевна**, доцент 83-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Алексеев Виктор Фёдорович**, профессор 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru, vfalex\_vti@mail.ru

**Алёхин Сергей Григорьевич**, докторант Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

**Алтухов Александр Иванович** – заведующий 112-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: aai\_51@mail.ru

**Андросов Александр Михайлович** – старший преподаватель кафедры физической подготовки Военной академии связи имени С.М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); кандидат педагогических наук.

**Арсеньев Владимир Николаевич**, профессор 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 262-02-22, e-mail: vladar56@mail.ru

**Астапович Анатолий Владимирович**, доцент 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru, astapovichav@yandex.ru

**Багрецов Сергей Алексеевич**, старший научный сотрудник 61-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 779-86-94, e-mail: sergeibagrecov@bk.ru

**Багрецов Сергей Алексеевич**, старший научный сотрудник 61-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 779-86-94, e-mail: sergeibagrecov@bk.ru

**Баранов Алексей Александрович**, заместитель начальника Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России по служебно-боевой подготовке (196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 149); кандидат педагогических наук; тел.: 8(812) 645-20-02, baranov.a.a@mail.ru

**Башкирцев Виктор Павлович**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент.

**Белихин Евгений Николаевич**, адъюнкт 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 731-58-80.

**Быстров Сергей Юрьевич**, адъюнкт Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова (190005, Россия, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1); тел.: 8 (911) 706-58-03.

**Вивчарь Роман Михайлович**, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: ramzec9322@rambler.ru

**Вышинский Андрей Павлович**, командующий 15-й армией Воздушно-космических сил (особого назначения).

**Головчинский Владимир Орестович**, младший научный сотрудник 173-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (926) 309-69-04, e-mail: gvoseverples1@ramber.ru

**Гончаров Павел Сергеевич**, начальник 12-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: easter17@mail.ru

**Горбулин Владимир Иванович**, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 299-27-76, e-mail: v\_gorbulin@mail.ru

**Готюр Иван Алексеевич**, начальник 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

**Груздев Николай Валентинович**, старший научный сотрудник 24-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-21.

**Гудаев Роман Александрович**, начальник 522-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Данилюк Андрей Степанович**, заместитель начальника 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-54.

**Дашкин Эдуард Романович**, старший преподаватель 82-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (905) 214-32-85, e-mail: edidash@mail.ru

**Дианов Сергей Владимирович**, преподаватель кафедры радиотехнических средств Череповецкого высшего военного училища радиоэлектроники (162622, Россия, Вологодская обл., г. Череповец, Советский пр., 126); тел.: 8 (911) 506-18-85.

**Домбровский Андрей Фёдорович**, преподаватель 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87.

**Донцов Александр Александрович**, профессор кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394042, Россия, Воронеж, ул. Минская, д. 63, кв. 247); доктор технических наук, доцент; тел.: 8(473)296-11-17, e-mail: addoncovl@mail.ru

**Дьяков Алексей Николаевич**, доцент 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-57, e-mail: dyakoval@yandex.ru

**Ерофеев Алексей Васильевич**, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 237-93-72.

**Ефременко Александр Николаевич**, начальник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-59; e-mail: geofis\_svu@mail.ru

**Завьялова Галина Михайловна**, доцент 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-11.

**Захарчук Илларион Иванович**, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-23, e-mail: vlars-i3@mail.ru

**Зиновьев Константин Геннадьевич**, помощник начальника космодрома по научно-исследовательской и испытательной работе 1-го Государственного испытательного космодрома (164170, Россия, г. Мирный Архангельской обл.); тел.: 8 (921) 483-39-68.

**Зоц Михаил Николаевич**, научный сотрудник 253-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 958-95-03, e-mail: zotsmichael@gmail.com

**Зыков Дмитрий Дмитриевич**, заместитель начальника Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-97-21.

**Иванов Анатолий Валерьевич**, соискатель 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Иванов Андрей Николаевич**, начальник факультета ракетного и РСЗО Михайловской военной артиллерийской академии (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22); 8 (952) 242-25-68, e-mail: mvaa@mil.ru

**Калинин Владимир Николаевич** – профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@mail.ru

**Калмычков Игорь Евгеньевич**, старший преподаватель 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 959-93-89, e-mail: zntch@yandex.ru

**Канарский Игорь Дмитриевич**, старший научный сотрудник 321-й лаборатории 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат географических наук; тел.: 8 (812) 347-97-59.

**Караваев Михаил Анатольевич**, старший преподаватель кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394052, Россия, Воронеж, ул. Чапаева, д. 134, кв. 72); кандидат технических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (980) 348-59-62.

**Каргу Дмитрий Леонидович**, начальник 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22 e-mail: dmitrii\_kargu@mail.ru

**Касавцев Михаил Юрьевич**, старший преподаватель 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: mk-spb@rambler.ru

**Кивчун Олег Романович**, старший преподаватель кафедры засекречивающей аппаратуры связи филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде (236036, Россия, Калининград, Советский пр., 82); кандидат технических наук; тел.: 8 (905) 242-51-52; (8) 962-269-33-26; e-mail: oleg\_kivchun@mail.ru

**Козлов Владимир Владимирович**, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof.kozlov@yandex.ru

**Кокарев Алексей Сергеевич**, преподаватель 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-57, e-mail: askokarev@gmail.com

**Колесник Алексей Владимирович**, докторант 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 940-65-57, e-mail: kolesnika@mail.ru

**Колесников Константин Григорьевич**, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 231-54-32; e-mail: kongrikol@rambler.ru

**Королёва Ольга Александровна**, младший научный сотрудник 321-й лаборатории 32-го отдела военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-59.

**Кофнов Олег Владимирович**, старший преподаватель 110-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 941-32-88, e-mail: kofnov@mail.ru

**Крупский Кирилл Анатольевич**, начальник 211-й лаборатории – заместитель начальника отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-21.

**Крыжановский Владимир Иванович**, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 310-66-37.

**Кужекин Николай Сергеевич**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-96.

**Кузьмичёв Юрий Алексеевич**, доцент 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, дорцент; тел.: 8 (921) 313-47-68.

**Кулешов Юрий Владимирович**, заместитель начальника Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского по учебной и научной работе (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-73.

**Лагун Андрей Валерьевич**, доцент 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 937-09-02, e-mail: Kio@mail.ru

**Лебедев Евгений Леонидович**, начальник 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-99-11.

**Литинский Евгений Игоревич**, адъюнкт 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru, litinskij1990@mail.ru

**Мартынов Виктор Васильевич**, старший научный сотрудник 121-й лаборатории 12-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: viktor.martynov.1961@mail.ru

**Масалкин Александр Алексеевич**, начальник 272-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911)740-02-63; e-mail: of.mas632@yandex.ru

**Матюнин Александр Сергеевич**, адъюнкт 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-54, e-mail: ac0243555@mail.ru

**Мокроусов Алексей Сергеевич**, докторант очной (штатной) докторантуры Вольского военного института материального обеспечения (412903, Россия, Саратовская обл., г. Вольск, ул. М. Горького, 3); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8-927-117-77-79, e-mail: mokrousov85@rambler.ru

**Молдованова Светлана Михайловна**, младший научный сотрудник 61-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 908-00-76, e-mail: s.moldovanova@mail.ru

**Москвин Борис Владимирович**, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (953) 352-92-63; e-mail: z-moskvin@mail.ru

**Мысливцев Тимофей Олегович**, начальник 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

**Мышко Василий Васильевич**, доцент 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vasvasmishko@mail.ru

**Нагалин Данил Александрович**, адъюнкт радиоэлектроники ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394006, Россия, Воронеж, ул. Студенческая, д. 36 я); тел.: 8 (999) 973-93-12; e-mail: danil.nagalin@yandex.ru

**Невзоров Валерий Иванович**, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

**Огородников Владимир Петрович**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор философских наук, профессор; тел.: 8(951) 668-24-86; e-mail: ogo-vladimir@yandex.ru

**Ортиков Михаил Юрьевич**, старший научный сотрудник 253-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 442-01-64, e-mail: mort1964@rambler.ru

**Осипов Алексей Георгиевич**, доцент 72-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат географических наук; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

**Павский Владислав Филиппович**, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

**Пачин Андрей Владимирович**, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: pachin.andrej@bk.ru

**Пеньков Максим Михайлович**, начальник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (905) 214-92-22, e-mail: maxpen@mail.ru

**Петров Юрий Витальевич**, доцент кафедры радиоэлектронных систем управления Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова (190005, Россия, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 926-63-39.

**Покидов Леонид Викторович**, преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 237-93-72.

**Поляков Виталий Викторович**, доцент 71-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 256-85-94.

**Поляков Сергей Александрович**, соискатель 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: v\_gorbulin@mail.ru

**Привалов Александр Евгеньевич**, старший преподаватель 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 017-38-49, e-mail: cerebrum203@yandex.ru

**Прокофьев Александр Валерьевич**, заместитель начальника 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru, Prokofjev\_alexandr@mail.ru

**Пронин Антон Николаевич**, преподаватель 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812)347-95-23, e-mail: a.n.pronin@mail.ru

**Радионов Николай Васильевич**, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор экономических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: v\_gorbulin@mail.ru

**Рахматулин Алексей Михайлович**, начальник 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 637-37-14, e-mail: rakhmatulin@gmail.com

**Репях Николай Андреевич**, заведующий 109-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, доцент; тел.: 8 (911) 990-02-38, e-mail: utkinodacha@yandex.ru

**Решетников Дмитрий Владимирович**, заместитель начальника 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-57, e-mail: reshetnikovdv@yandex.ru

**Росляков Евгений Михайлович**, профессор 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 397-96-43, e-mail: roslem@ya.ru

**Рощупкин Александр Алексеевич**, заместитель начальника 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8(812)347-95-23, e-mail: roshhupkin@rambler.ru

**Свидзинская Галина Борисовна**, доцент кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России (196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр. 149); кандидат химических наук, доцент; тел.: 8(921)444-11-94, e-mail: gns2@mail.ru

**Селихина Наталия Викторовна**, старший преподаватель 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: zausechka@mail.ru

**Семенов Вячеслав Валерьянович**, адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

**Скворцов Дмитрий Валерьевич**, начальник 111-й лаборатории – заместитель начальника 11-го отдела (научно-исследовательского) Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (905) 285-55-50, e-mail: vka@mil.ru

**Скороходов Ярослав Анатольевич**, начальник 362-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8(812) 347-95-65, e-mail: yaroslavskor@gmail.com

**Скутницкий Владислав Михайлович**, начальник 1-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vladskut@yandex.ru

**Смирнов Даниил Николаевич**, инженер 551-й учебной лаборатории 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (960) 001-93-90, e-mail: daniil198484@mail.ru

**Смирнов Михаил Сергеевич**, адъюнкт 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 264-40-04.

**Сорокин Василий Петрович**, профессор кафедры физической подготовки Военной академии связи имени С.М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); доктор педагогических наук, профессор, заслуженный работник физической культуры Российской Федерации, заслуженный тренер Российской Федерации.

**Спесивцев Александр Борисович**, младший научный сотрудник 243-й лаборатории (научно-исследовательской) Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (821)347-97-21.

**Столяров Александр Леонидович**, преподаватель 43-й кафедры Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники (162600, Вологодская обл., г. Череповец, Советский пр., 126); соискатель ученой степени кандидата педагогических наук при Военном университете МО РФ (г. Москва).

**Тавалинский Дмитрий Анатольевич**, доцент кафедры радиотехнических средств Череповецкого высшего военного училища радиоэлектроники (162622, Россия, Вологодская область, г. Череповец, Советский пр., д.126); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (981) 500-12-68.

**Тонконогов Олег Юрьевич**, инженер-испытатель (бортовой оператор) НИИИ (РЭБ) ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394088, Россия, Воронеж, ул. Бульвар Победы, д. 51а, кв. 578); тел.: 8(904)212-05-17, e-mail: o.tonkonogov@mail.ru

**Трофимов Илья Анатольевич**, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 163-12-99.

**Хайруллин Радис Рафисович**, адъюнкт 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mail.ru

**Хлебников Сергей Германович**, старший научный сотрудник 242-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (900) 641-44-50, e-mail: e190ng@mail.ru

**Хрустова Алёна Николаевна**, старший преподаватель 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 225-88-87, e-mail: yugani@rambler.ru

**Цветков Кирилл Юрьевич**, начальник 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 235-30-63, e-mail: wavelet3@mail.ru

**Цыбин Олег Юрьевич**, профессор кафедры физической электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (194064, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (921) 933-16-92, e-mail: oleg.tsybin@gmail.com

**Цыкунов Владислав Николаевич**, адъюнкт 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mail.ru

**Чернов Иван Владимирович**, преподаватель 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mail.ru, 4ern86@bk.ru

**Чикуров Виталий Александрович**, начальник 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: chikurov69@bk.ru

**Шавин Александр Сергеевич**, начальник 243-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-21.

**Шаймухаметов Шамиль Ильдусович**, начальник 523-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Шевкунов Игорь Александрович**, преподаватель 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 866-51-10.

**Шелудяков Александр Михайлович**, заведующий 110-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-95-06, e-mail: tdiffraction@yahoo.com

**Шифф Виктор Куртович**, старший научный сотрудник 142-й лаборатории 14-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (911) 782-81-39, e-mail: s\_4\_4@mail.ru

**Шульгин Альберт Николаевич**, преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 720-32-34, e-mail: alex\_grid69@mail.ru

**Шуневич Николай Александрович**, начальник лаборатории – старший научный сотрудник 122-й лаборатории 12-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: shunia251@mail.ru

**Шушаков Алексей Олегович**, заместитель начальника 2-го факультета – начальник учебной части Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 013-85-25, e-mail: shushakovaleksei@mail.ru

**Ядренкин Андрей Александрович**, начальник 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 599-68-33, e-mail: andrei\_nikita@mail.ru

**Якунин Владимир Иванович**, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

**Абсалямов Дамир Расимович**, профессор 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 244-33-13, e-mail: damir73@yandex.ru

**Алексеев Виктор Фёдорович**, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 217-03-39.

**Алешкин Андрей Петрович**, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-31.

**Басыров Александр Геннадьевич**, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexanderbas@mail.ru

**Башкирцев Виктор Павлович**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-23-57.

**Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович**, заведующий 111-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-07.

**Волков Валерий Фёдорович**, профессор 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-64.

**Григорьев Андрей Николаевич**, доцент 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-99-51.

**Доронин Александр Павлович**, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-52.

**Еремеев Игорь Юрьевич**, начальник 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 238-06-62.

**Калинин Владимир Николаевич**, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Санкт-Петербургской инженерной академии, член-корреспондент Международной инженерной академии, Российской инженерной академии, Международной академии информатизации; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@mail.ru

**Карагодин Владимир Викторович**, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-44.

**Косырев Сергей Викторович**, профессор 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-93.

**Кужекин Николай Сергеевич**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (911) 794-16-72.

**Кузнецов Александр Борисович**, начальник 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 230-28-15.

**Кунтурова Надежда Борисовна**, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: giz26@ Rambler.ru

**Лоскутов Андрей Иванович**, начальник 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-70, e-mail: rk@viek.ru

**Миронов Александр Николаевич**, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-13, e-mail: mirovov-anik@yandex.ru

**Москвин Борис Владимирович**, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-62.

**Назаров Андрей Вячеславович**, начальник 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-33, e-mail: naz-av@mail.ru

**Огородников Владимир Петрович**, профессор 107-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор философских наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-94.

**Паршуткин Андрей Викторович**, профессор 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-35.

**Попов Александр Сергеевич**, старший научный сотрудник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

**Репях Николай Андреевич**, заведующий 109-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, доцент; тел.: 8 (911) 990-02-38, e-mail: utkinodacha@yandex.ru

**Сазонов Константин Викторович**, начальник 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-54, e-mail: sazonov-konstantin@yandex.ru

**Тарасов Анатолий Геннадьевич**, заместитель начальника 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-26.

**Трофимов Илья Анатольевич**, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 163-12-99.

**Фоминов Иван Вячеславович**, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

**Чарушников Александр Валерьевич**, начальник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-21.

**Щербина Игорь Сергеевич**, начальник 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-57.