

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

Выпуск 672

2020 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**, *доктор воен. наук, доц.*;

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

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, проф.*;

И.Ю. Еремеев, *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. Кунтурова**, *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, доц.*; **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, доц.*; **И.В. Фоминов**, *доктор техн. наук, доц.*;

А.В. Харченко, *доктор техн. наук, проф.*; **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**
Выпускающий редактор: *А.В. Головина*
Технический редактор
и компьютерная верстка: *О.В. Филиппова*
Техническая поддержка:
К. И. Чувирова

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

Подписано к печ. 30.03.2020.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 75,00. Уч.-изд. л. 37,25
Тираж 25 экз. Заказ 3626/107.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Андреанов А.С., Вечеркин В.Б., Цветков А.Ю.* Метод планирования оптимального покрытия района базирования зонами обслуживания мобильных лидарных комплексов экологического контроля 8
- Лебянкин И.А., Нестеренко О.Е., Платонов С.А.* Модифицированный симплекс-метод для оптимизации информационных структур вычислительных задач, реализуемых на средствах автоматизированных систем мониторинга космических и баллистических объектов 17
- Котьяшов Е.В.* Концептуально-структурная модель функционирования орбитальной системы космических аппаратов наблюдения и предупреждения опасных ситуаций на геостационарной орбите 25
- Котьяшов Е.В., Кузаев О.Л., Чарушников А.В.* Метод планирования применения орбитальной системы мониторинга космической обстановки на геостационарной орбите 33

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Абазина Е.С., Одоевский С.М., Бусыгин А.В.* Обоснование требований к пропускной способности канала связи для видеотрафика в перспективной мультисервисной сети специального назначения 41
- Агиевич С.Н., Галл Р.Д., Кельян А.Х., Коновалов В.Е., Потапов С.Г.* Анализ возможностей использования геостационарных спутников-ретрансляторов для решения задач радиомониторинга 48
- Белов П.Ю., Болотов Е.А., Мартьянов А.Н.* Математическая модель формирования битовых ошибок в цифровых изображениях при передаче по радиоканалу с помехами 60
- Белов П.Ю., Дьяконов В.Ю., Мартьянов А.Н.* Модифицированный метод усеченного блочного кодирования изображений с использованием третьего начального момента 70
- Булекбаев Д.А., Лихачёв В.М.* Расчет лучевых-геометрооптических угловых характеристик электромагнитных полей, возбуждаемых радиопрозрачными клиновидными объектами радиолокации 77

<i>Бурлаков С.О., Климов И.С., Цветков К.Ю.</i> Распределение частот ретранслятора связи при работе земных станций с парциальными каналами.....	88
<i>Викторов Е.А., Иванов А.Н., Канаев А.К.</i> Методика обеспечения устойчивости функционирования транспортной сети связи специального назначения в условиях реализации сетевых и компьютерных атак	92
<i>Иванов А.Н., Канаев А.К., Муравцов А.А.</i> Модель процесса функционирования транспортной сети связи специального назначения в условиях реализации компьютерных атак	102
<i>Клейменов В.В., Сахно В.И., Сахно Д.И.</i> Сравнительный анализ эффективности применения нейросетевых обнаружителей морских объектов на радиолокационных изображениях	110
<i>Конюховский В.С., Симонов А.Н.</i> Синтез алгоритма поляризационного пеленгования интерферирующих радиоизлучений	121
<i>Мысливцев Т.О., Павский В.Ф., Цыкунов В.Н.</i> Анализ влияния эффекта Доплера на характеристики бортовой пульсарной шкалы времени геостационарного космического аппарата	131
СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
<i>Алексеев О.С., Гуцин В.И., Масленников С.А., Николаев И.А.</i> Модель создания эталонов фотоизображений объектов местности с использованием цифровых ортофотопланов на основе комплексирования информации аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов и данных воздушной лазерной локации	139
<i>Алехин С.Г.</i> Полуэмпирический метод краткосрочного прогнозирования общего количества облаков	148
<i>Астапович А.В., Колесников Д.Д.</i> Обоснование метода совместного уравнивания спутниковых и наземных измерений	158
<i>Готюр И.А., Мешков А.Н., Рудь М.Ю., Яременко И.А.</i> Метод организации обработки и хранения гидрометеорологической информации с использованием подходов «больших данных»	169
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	
<i>Овчаров В.А., Подшибякин А.С., Ушаков И.А., Шинкаренко А.Ф.</i> Подход к оцениванию защищенности объектов коммуникации на основе моделей функционирования веб-приложений	176

РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ
И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

- Антропова А.В., Давидчук В.А., Козлов В.В., Лагун А.В.* Особенности математического моделирования процесса создания дисперсных заградительных экранов для защиты площадных объектов 188
- Арсеньев В.Н., Петухов А.Б., Трофимов И.А.* Коррекция вероятностей гипотез о технических состояниях изделия военной техники в процессе эксплуатации 195
- Булукбаева М.Ю., Денисов А.М., Житный М.В.* Методика определения координат точки разгерметизации космического аппарата на основе определения возмущающей силы 202
- Бурмистров В.В., Дорофеев Н.А., Кузьмичев Ю.А.* Способ активного подавления колебаний упругих элементов конструкции космического аппарата на основе применения резонансного фильтра в контуре системы угловой стабилизации 209
- Вавилов Д.С., Грошиков Е.С., Лебедев Е.Л., Рымкевич П.П.* Метод нормального усреднения и его применение к вибрационным процессам 216
- Власов С.А., Кубасов И.Ю.* Обоснование параметров орбит космических аппаратов, оснащенных радиолокационным комплексом, для обзора всей поверхности Земли 223
- Гера В.И., Калмыков Е.В., Пудиков В.В.* Методика формирования оптимального объема работ по поддержанию в готовности инженерно-технических систем объектов космических войск с учетом их технического состояния 231
- Гнатюк В.И., Дорофеев С.А., Кивчун О.Р.* Модель управления электропотреблением при эксплуатации объектов военной инфраструктуры 239
- Головчинский В.О., Миляев И.К., Тарасов А.Г.* Сравнительный анализ устройств и способов диагностирования электрических кабельных систем, задействованных в реализации технологических процессов подготовки и пуска ракет космического назначения 245
- Горбулин В.И., Радионов Н.В., Ратушняк А.И., Стеганов Г.Б.* Методика обоснования структуры системы генерирования электрической энергии в условиях неравномерной освещенности панелей солнечных батарей космического аппарата 252

<i>Горшков Л.К., Северенко А.В., Уртминцев И.А.</i> Методика оценки напряженно-деформированного состояния оболочек отсеков космических аппаратов	264
<i>Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В.</i> Частные показатели уровня освоения компетенции специалистом по эксплуатации ракетно-космической техники	273
<i>Гравченко Ю.А., Козлов В.В., Чирва С.В.</i> Эргатический аспект информационного сопровождения жизненного цикла изделий ракетно-космической техники ...	281
<i>Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Пачин А.В.</i> Методика выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей	289
<i>Зоткин М.Ю., Миронов В.И., Шушаков А.О.</i> Алгоритм терминальной многошаговой стабилизации сервисного космического аппарата при угловом сопровождении орбитального объекта с одним участком включения управляющего реактивного двигателя	299
<i>Крыжановский В.И., Трофимов И.А.</i> Учет перекрестных связей в двухконтурной следящей системе для наведения на цель оптико-электронного прибора	307
<i>Мальцев Г.Н., Склемин Д.В.</i> Математическая модель процесса идентификации отказов радиоэлектронной системы с учетом использования ИПИ-технологий	316
<i>Сударь Ю.М., Щербаков В.И., Юлина А.О.</i> Пассивная гравитационная стабилизация космического аппарата на геостационарной орбите	326
ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК	
<i>Белокопытов М.Л., Григорьев А.П., Козырев Г.И., Кокорев А.В., Овчинников Ю.С.</i> Современные авиационные тренажеры как средство непрерывной подготовки авиационных специалистов	336
<i>Гузенко В.Л., Пауков А.Б.</i> Обоснование роли и значения информационной безопасности в процессе обеспечения безопасности военной службы	347
<i>Ерофеев А.В., Кацик В.О., Покидов Л.В.</i> Предложения по внедрению компьютерных информационных технологий на тактико-специальном учении с курсантами выпускных курсов академии	354
<i>Пророк В.Я., Тимофеев А.В., Шаймухаметов Ш.И.</i> Применение аппарата нечетких множеств для обоснования требований к профессионально важным качествам военных специалистов	360

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

- Репях Н.А., Хрустова А.Н.* Ценностное отношение в архитектонике педагогической деятельности 370

ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

- Гусев Н.Н., Кучеренко А.О.* Совершенствование импульсного способа возбуждения колебаний струнных преобразователей путем применения возбуждающего импульса в форме полусинусоиды 376

- Ерохин О.А., Мачнев С.А., Сурин Д.В., Шевчук А.М.* Метод оценивания вероятности поражающего попадания обычных средств поражения противника в стационарные объекты-цели военной инфраструктуры 382

- Калмыков Е.В., Пудиков В.В.* Энергосберегающие мероприятия в системах кондиционирования воздуха при строительстве и реконструкции зданий и сооружений 390

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

- Атарщиков А.Н., Данелян А.П., Казахов Б.Д., Степанников А.А.* Методический подход к выбору рациональных способов применения арсенала Воздушно-космических сил 395

- Вышинский А.П., Исупов А.А., Колесник А.В., Чарушников А.В.* Обоснование методического подхода к оценке космической обстановки органами управления группировки войск (сил) 403

- Рефераты статей 412

- Сведения об авторах 425

- Сведения о рецензентах 437

А.С. Андрианов;
В.Б. Вечеркин,
кандидат военных наук, доцент;
А.Ю. Цветков,
кандидат техн. наук

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ РАЙОНА БАЗИРОВАНИЯ ЗОНАМИ ОБСЛУЖИВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ЛИДАРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Рассматривается задача целочисленного программирования оптимального покрытия территории зонами обзора при экологическом мониторинге посредством мобильного лидарного комплекса «Смуглянка 1Л». На основе теории расписаний предложен метод применения данных комплексов в условиях динамических ограничений искусственного и естественного характера, а также ограничений на площадь покрытия зоной обзора.

Ключевые слова: целочисленное программирование, теория расписаний, динамическое программирование, динамические ограничения.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития Вооруженных сил, в связи с побочными результатами повседневной деятельности войск (боевая подготовка и боевое дежурство; обеспечение жизнедеятельности частей и населения военных городков, хозяйственная деятельность; регламентное обслуживание и замена систем вооружения и техники; аварии на объектах соединений и промышленно-транспортных объектах), одной из приоритетных задач являются экологический мониторинг и контроль.

Для комплексного решения задачи дистанционного мониторинга химических загрязнений атмосферы был создан мобильный лидарный комплекс «Смуглянка 1Л» (МЛК), разработанный компанией НПП «Лазерные системы» в интересах Министерства обороны РФ. Лидарный комплекс предназначен для оперативного дистанционного определения физического и химического состава атмосферы в районах экологических катастроф или военных действий с возможным применением химических отравляющих веществ [1].

Планирование применения комплексов данного типа представляет собой задачу оптимального покрытия района базирования, в границах которого производится мониторинг экологической обстановки, зонами обслуживания. При этом покрытие должно быть с минимальным перекрытием зон обслуживания, покрываемых отдельными средствами и с учетом динамических ограничений естественного и искусственного характера, а также с покрытием зонами обслуживания специальных объектов контроля (СОК). Стоит отметить, что период планирования задается согласно техническим возможностям комплексов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ РАЙОНА БАЗИРОВАНИЯ ЗОНАМИ ОБСЛУЖИВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ЛИДАРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Управление группой средств контроля, целью которого является покрытие района базирования, относится к классу задач теории расписаний [1–3]. В ходе управления группой средств решается следующая задача целочисленного программирования. Требуется распределить позиции p между средствами i и построить план их применения. При этом под распределением позиций будем понимать: распределение средств по позициям, прибытие на

позицию, развертывание и производство мониторинга экологической обстановки. Стоит отметить, что задача может быть декомпозирована на две подзадачи, а именно покрытие зонами обслуживания большей площади района или большего количества СОК, чтобы привести к максимуму целевую функцию:

$$U = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P w_{i,p} e_{i,p} o_p q_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

при ограничении

$$w_{i,p} \geq 0, \quad (2)$$

где U – функция, характеризующая покрытие района;

$i = \overline{1, I}$ – номер мобильного лидарного комплекса;

$p = \overline{1, P}$ – номер позиции (цели);

$w_{i,p}$ – параметр, характеризующий покрытие района i -м средством при выборе позиции p ;

$e_{i,p}$ – признак, характеризующий состояние p -й позиции и определяющийся как

$$e_{i,p} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-е средство выбрало позицию } p, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (3)$$

o – признак, характеризующий состояние p -й позиции применения;

q – признак, характеризующий состояние i -го мобильного лидарного комплекса.

Рассмотрим более подробно каждый параметр целевой функции (1). Параметр $w_{i,ja}$ зависит от поставленной задачи, которую решает группа МЛК, кроме того, зависит либо от площади покрытия района базирования i -м средством, либо от количества специальные объект контроля и определяется по формуле

$$w_{i,p} = \begin{cases} w_{i,p}^o w_p^s, & \text{при решении задачи покрытия площади,} \\ w_{i,p}^o w_p^z, & \text{при решении задачи покрытия специальных объектов.} \end{cases} \quad (4)$$

При этом параметр $w_{i,p}^o$, зависящий от расстояния от средства i до позиции, определяется по следующей формуле:

$$w_{i,p}^o = \begin{cases} 1, & \text{если } W_{i,p}^o < W_{\max}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (5)$$

где $W_{i,p}^o$ – расстояние от i -го комплекса до позиции, которое определяется как

$$W_{i,p}^o = \left[\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2} \right]; \quad (6)$$

W_{\max} – дистанция, на которую могут переместиться средства за один субпериод.

Величина W_{\max} определяется, например, запасом хода средства или временем, отведенным для достижения позиции.

Параметр w_p^s зависит от дистанции между p -й позицией и позицией, которая уже достигнута или недоступна, т. е. $o_h = 0$ или $o_h = -1$ ($h \neq p$) и которая определяется как

$$w_p^s = \begin{cases} 1 - \frac{|2r - W_p^s|}{2r}, & \text{если } W_p^s \leq 2r, \\ 0, & \text{если } W_p^s \geq W_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Величина W_p^s определяется как расстояние между позицией p , для которой рассчитывается параметр w_p^s , и ближайшей позицией $P_h \in P^c$, т. е.

$$W_p^s = \min_{P_h \in P^c} \left(\left[\sqrt{(x_h - x_p)^2 + (y_h - y_p)^2} \right] \right). \quad (8)$$

Параметр w_p^z зависит от расстояния между p -й позицией и ближайшим специальным объектом контроля, подлежащим покрытию. Этот параметр определяется следующим образом:

$$w_p^z = \sum z_p | W_p^z < r_{\max}, \quad (9)$$

где

$$z_p = \begin{cases} 1, & \text{при } k=1, \\ 0, & \text{при } k=0, \end{cases} \quad (10)$$

а W_p^z определяется как расстояние между позицией p , для которой рассчитывается параметр w_p^z , и ближайшей позицией $p \in P^c$, т. е.

$$W_p^z = \left[\sqrt{(x_l - x_p)^2 + (y_l - y_p)^2} \right], \quad (11)$$

где l – номер позиции со специальным объектом контроля при $l \in P$.

Район базирования представляется в виде координатной сетки, ячейки которой являются позициями и ограничены размерами $\Delta x \times \Delta y$, при этом $\Delta x = \Delta y$, т. е. позиция расположена на участке поверхности, ограниченном квадратом [3, 4]. Размеры района, на котором применяются МЛК, разумно представить в дискретной системе координат:

$$\begin{aligned} X &= \lfloor X_p / \Delta x \rfloor, \\ Y &= \lfloor Y_p / \Delta y \rfloor, \end{aligned} \quad (12)$$

где X_p и Y_p – размеры района базирования в неразрывной системе координат.

Каждой позиции определяется номер p и соответствующие дискретные координаты x и y по формуле

$$p = y(X + 1) + x + 1 \quad (x = \overline{0, X}, y = \overline{0, Y}). \quad (13)$$

Позиции для мобильных лидарных комплексов могут быть открытыми для применения т. е. пригодными, и закрытыми для применения, недоступными, в силу факторов различного характера (недостаток времени для прибытия на позицию, неблагоприятные условия применения естественного и искусственного характера, такие как дождь, снег, туман, густая дымка, облачность высокой интенсивности). При этом ячейки координатной сетки формируют совокупность позиций P общей численностью $(X + 1)(Y + 1)$. Совокупность позиций P формируется из подмножества открытых позиций $P^e \subset P$, $P_k^e \subset P^e$ ($k = \overline{1, K}$), подмножества закрытых позиций (это могут быть ячейки с ограничениями различного характера – как естественного, так и искусственного характера) $P^d \subset P$, $P_l^d \subset P^d$ ($l = \overline{1, L}$) и подмножества позиций, выбранных ранее $P^c \subset P$, $P_m^c \subset P^c$ ($m = \overline{1, M}$) (при этом изначально $P^c = 0$). Однако $P^e \cup P^d \cup P^c = P$ и $P^e \cap P^d \cap P^c = 0$. Также в подмножество P^c могут входить только позиции, ранее идентифицированные как подмножество P^e .

Отметим, что статус каждой позиции p определяется кортежем $\langle x_p, y_p, o_p, k_p \rangle$, где o_p – признак состояния позиции p , который описывается следующим образом:

$$o_p = \begin{cases} 1, & \text{если } p \in P^e, \\ -1, & \text{если } p \in P^d, \\ 0, & \text{если } p \in P^c, \end{cases} \quad (14)$$

k_p – признак состояния позиции p , который определяется следующим образом:

$$k_p = \begin{cases} 1, & \text{если на позиции } p \text{ находится объект контроля,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (15)$$

Группа мобильных лидарных комплексов развернута в районе базирования для решения задачи оптимального покрытия района базирования зонами обслуживания, площадь которых определяется в дискретной системе координат как $Sq_i = \lceil (\lfloor r / \Delta x \rfloor)^2 \pi \rceil$, где r – радиус зоны, покрываемой отдельным средством. При этом задача состоит в том, чтобы обеспечить зоной покрытия большую площадь всеми средствами, т. е. $\bigcup_{i=1} Sq_i \rightarrow \max$, с охватом, обеспечивающим максимальную зону покрытия, созданную средствами, иными словами, зоны покрытия должны минимально налагаться друг на друга, т. е. $\bigcap_{i=1} Sq_i \rightarrow \min$. Кроме того, необходимо обеспечить сплошное покрытие зонами контроля, т. е. полученная зона контроля должна быть по возможности максимально непрерывная или затрагивать максимально специальные объекты контроля.

Предположим, что ориентация в пространстве мобильных лидарных комплексов описывается с помощью дискретной системы декартовых координат той же, что и расположение позиций XOY . Таким образом, положение каждого средства контроля задается координатами x_i и y_i . В результате состояние i описывается картежем $\langle x_i, y_i, q_i \rangle$, где q_i – признак выбора i какой-либо из позиций, который определяется следующим образом:

$$q_i = \begin{cases} 0, & \text{если } i\text{-е средство выбрало позицию,} \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (16)$$

Отметим, что в автоматизированной системе планирования применения формируются два перечня: перечень позиций p , элементами которого являются $p = \langle x_p, y_p, o_p, k_p \rangle$, и перечень группы мобильных лидарных комплексов, элементами которого являются $i = \langle x_i, y_i, q_i \rangle$.

Стоит отметить, что при применении нескольких мобильных лидарных комплексов при условии их параллельной работы весь период планирования необходимо разбить на субпериоды, которые формируются исходя из особенностей решаемых задач.

Необходимо найти оптимальный план применения мобильных лидарных комплексов на весь период планирования таким образом, чтобы целевая функция (1) была приведена к максимуму. Поэтому далее будет рассмотрен алгоритм планирования оптимального покрытия района базирования в субпериод, учитывающий динамические ограничения и позволяющий использовать метод динамического программирования для нахождения оптимального плана применения на весь период планирования [5, 6].

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ РАЙОНА БАЗИРОВАНИЯ ЗОНАМИ ОБСЛУЖИВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ЛИДАРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрим алгоритм решения задачи планирования оптимального покрытия района зонами обслуживания группы мобильных лидарных комплексов для начального субпериода.

Шаг 1. Формирование периода и субпериодов планирования применения мобильных лидарных комплексов исходя из складывающейся обстановки с учетом расположения специ-

альных объектов контроля и динамических ограничений, которые образуются вследствие неоднородностей среды на весь период планирования.

Шаг 2. Выбор для какого-либо средства первой позиции. В качестве первой позиции целесообразно выбрать ячейку, которая располагается в центре (или близко от него) области, занимаемой МЛК (рис. 1).

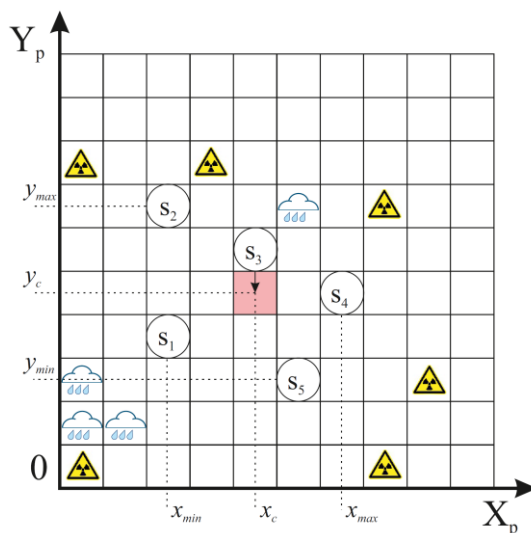


Рис. 1. Расчет первой позиции

Координаты первой ячейки определяются следующим образом:

$$x_c = \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^I \max(x_i) + \sum_{i=1}^I \min(x_i)}{2} \right\rfloor, \quad (17)$$

$$y_c = \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^I \max(y_i) + \sum_{i=1}^I \min(y_i)}{2} \right\rfloor,$$

где $\sum_{i=1}^I \max(\bullet)$, $\sum_{i=1}^I \min(\bullet)$ – процедура определения максимального и минимального значения координат средств i соответственно;

$\lfloor \bullet \rfloor$ – скобки, обозначающие целую часть числа, округленную в меньшую сторону.

В качестве МЛК, который займет центральную позицию, необходимо выбрать то средство, которое расположено ближе к ней, т. е. средство S_3 (рис. 1).

Шаг 3. Распределение оставшихся комплексов. Расчет выбора позиций происходит в порядке очередности, определенной порядковым номером комплекса, за исключением уже назначенного на новую позицию. Каждый МЛК i передает свои координаты (x_i, y_i) в автоматизированную систему управления, где определяются координаты первой позиции для каждого средства контроля по следующему соотношению:

$$W_{i,p} = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2}. \quad (18)$$

Также возможен случай, при котором $p(x_c, y_c) \in P^d \lim_{x \rightarrow \infty}$, т. е. позиция является закрытой. Тогда производится выбор любой другой открытой позиции, находящейся ближе всего $p \in P^e$, т. е. имеет признак $o_p = 1$.

Последующий этап заключается в том, что для комплексов I , еще не переместившихся, для всех позиций P рассчитывается параметр $w_{i,p}$ по формуле (4).

Затем для каждого средства экологического контроля определяется значение параметра $w_{i,p}$. Позиция прикрепляется к средству, у которого значение $w_{i,p}$ максимальное, иными словами, позиция, на которой площадь покрытия района зоной обслуживания максимальна. Для этого производится процедура поиска максимального значения в области допустимых значений из значений параметров для каждого средства экологического контроля. При этом, если таких средств несколько, т. е. не одно, позиция прикрепляется к комплексу, чей порядковый номер меньше. При этом параметру $w_{i,p}$ присваивается значение 0, иными словами, позиция $p(x_p, y_p)$ является прикрепленной. Также одновременно с этим для комплекса, выбравшего цель, признаку o_i присваивается значение 0.

Для примера рассмотрим процесс расчета параметров $w_{i,p}^o$, w_p^s и w_p^z , которые рассчитываются по формулам (5), (7) и (9), для средства S_1 , при $w_{max} = 3\Delta x$, $r = 2\Delta x$, $o_{45} = 0$ и $o_3 = 0$. На рис. 2 в клетках, соответствующих пригодным позициям, вписаны значения параметров $w_{i,p}^o$, w_p^s и w_p^z . Ячейки, соответствующие ранее выбранным позициям или недоступным позициям, отмечены как 0. При этом $w_{i,p}$ удовлетворяет условию

$$w_{i,p} > 0. \tag{19}$$

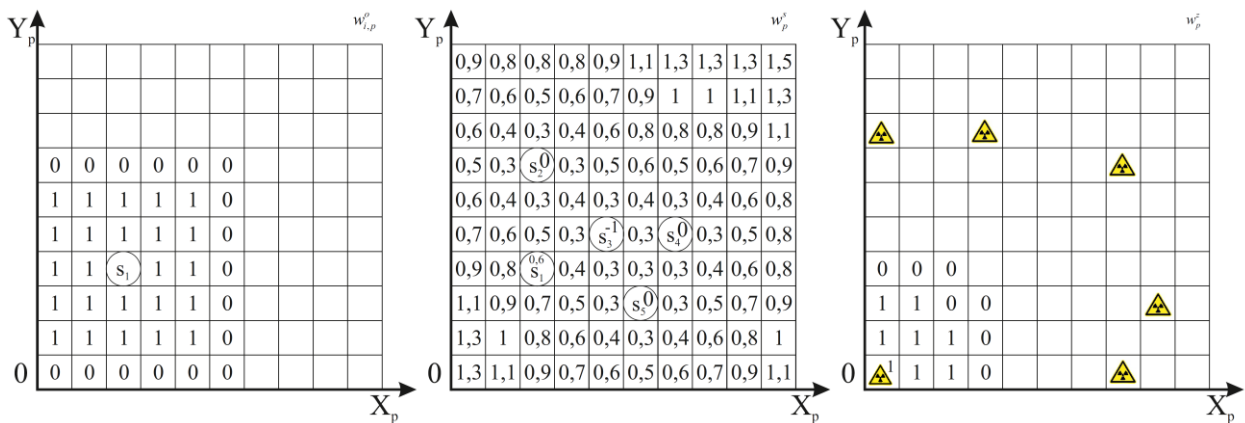


Рис. 2. Вычисление значений параметров $w_{i,p}^o$, w_p^s и w_p^z

Индекс p обозначает порядковый номер позиции, прибытие на которую i -м мобильным лидарным комплексом является оптимальным в данном случае, т. е. для решения конкретной задачи. Стоит отметить, что при ситуации, когда некоторое количество позиций имеет значения, которые являются максимальными, то тогда необходимо выбирать ту, у которой значение индекса p является наименьшим. Значение параметра $w_{i,p} = 0$ показывает, что позиция была уже выбрана другим средством на прошлом шаге, а $w_{i,p} < 0$ – что позиция либо закрыта, либо уже достигнута (другими словами, задача либо невыполнима для данного средства, либо уже выполнена ранее одним из группы мобильных лидарных комплексов).

Далее находится параметр $w_{i,1}$ по формуле (4) при решении задачи покрытия большей площади района базирования зонами обслуживания (рис. 3).

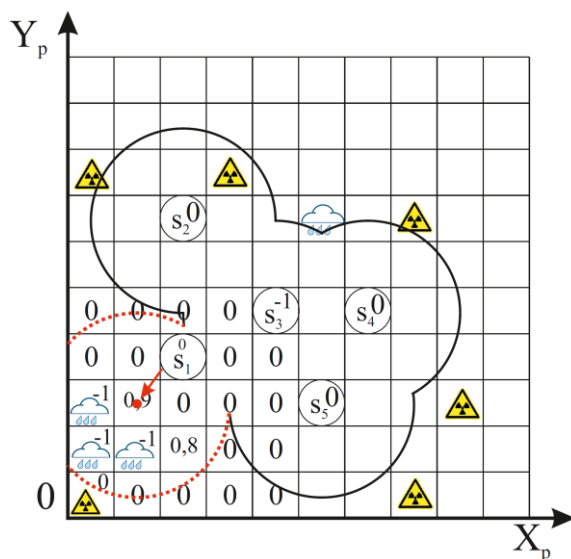


Рис. 3. Вычисление значений показателя $w_{i,1}$

В результате вычислений мобильный лидарный комплекс с номером 1 назначен на позицию $p = 21$ с наибольшим значением параметра $w_{i,1} = 0,9$.

Процедура выбора позиций продолжается до тех пор, пока все мобильные лидарные комплексы не будут распределены по позициям на заданном субпериоде. При этом, если для каких-либо средств не выбраны позиции (т. е. нет целей, которых бы они могли достичь), то они остаются в резерве, т. е. не меняют позицию, даже если они попадают в области, покрываемые другими средствами.

Шаг 4. Расчет целевой функции (1) для субпериода.

Схему алгоритма планирования покрытия района базирования зонами обслуживания МЛК представим, как показано на рис. 4.

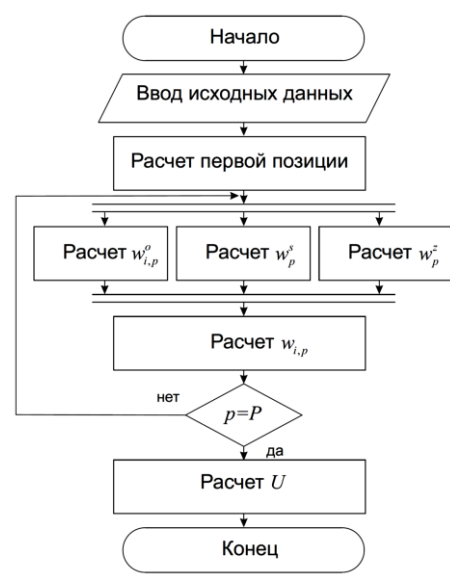


Рис. 4. Схема алгоритма планирования оптимального покрытия района зонами обслуживания МЛК

Для дальнейшего расчета плана после достижения первых целей утверждаются ограничения для целей на следующий подпериод и алгоритм, описанный выше, повторяется, пока не будет составлен план перемещений на весь период планирования. В результате формируется плановая таблица. При этом возможно использование метода динамического программирования для повышения результативности. Стоит отметить, что оператор автоматизированной системы планирования применения может вносить корректировки в плановую таблицу исходя из директивных указаний, поступающих из различных источников, например: при поломке МЛК, неоправданном прогнозе погодных явлений на позиции применения и т. д.

Схема метода планирования оптимального покрытия района базирования зонами обслуживания МЛК представлена на рис. 5.

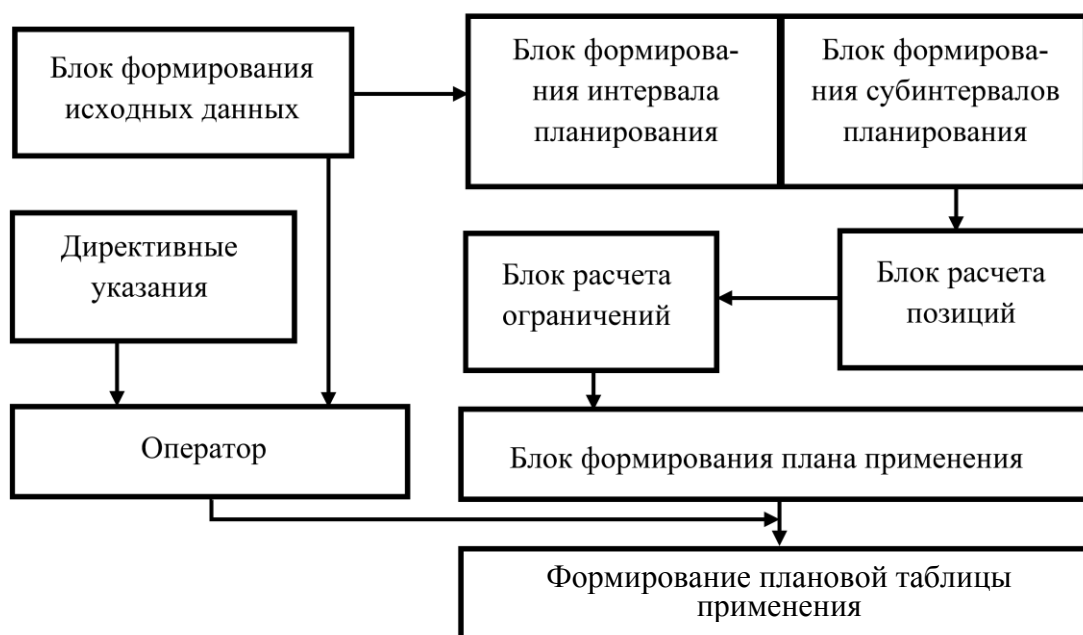


Рис. 5. Схема метода оптимального покрытия района базирования

На практике при формировании плана применения используется «жадный» алгоритм, который не всегда предоставляет оптимальное решение, его использование в полной мере затрудняется необходимостью учета вышеописанных ограничений и условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ЛИДАРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ЦЕЛЯХ ПОКРЫТИЯ РАЙОНА БАЗИРОВАНИЯ

Для апробации предложенного метода были проведены экспериментальные исследования решения задачи оптимального покрытия района базирования зонами обслуживания мобильных лидарных комплексов. Для расчетов в качестве исходных данных был принят следующий численный состав в районе базирования: мобильных лидарных комплексов – 5 единиц и специальных объектов контроля – 6 единиц. Район базирования специальных объектов контроля составляет 10 000 кв. км, радиус зоны обслуживания – 20 км. Для оценки эффективности предложенного подхода эксперименты на модели проводились для одних и тех же начальных условий (количество и их начальное положение, радиус покрытия, общая площадь, ограничения целей, цели для наблюдения). При этом использовались различные алгоритмы выбора позиций – алгоритмы ветвей и границ, полного перебора, а также предложенный метод с применением динамического программирования.

Результаты, полученные в ходе расчетов, включающие в себя такие показатели, как доля покрытой поверхности и доля объектов контроля, представлены на рис. 6.

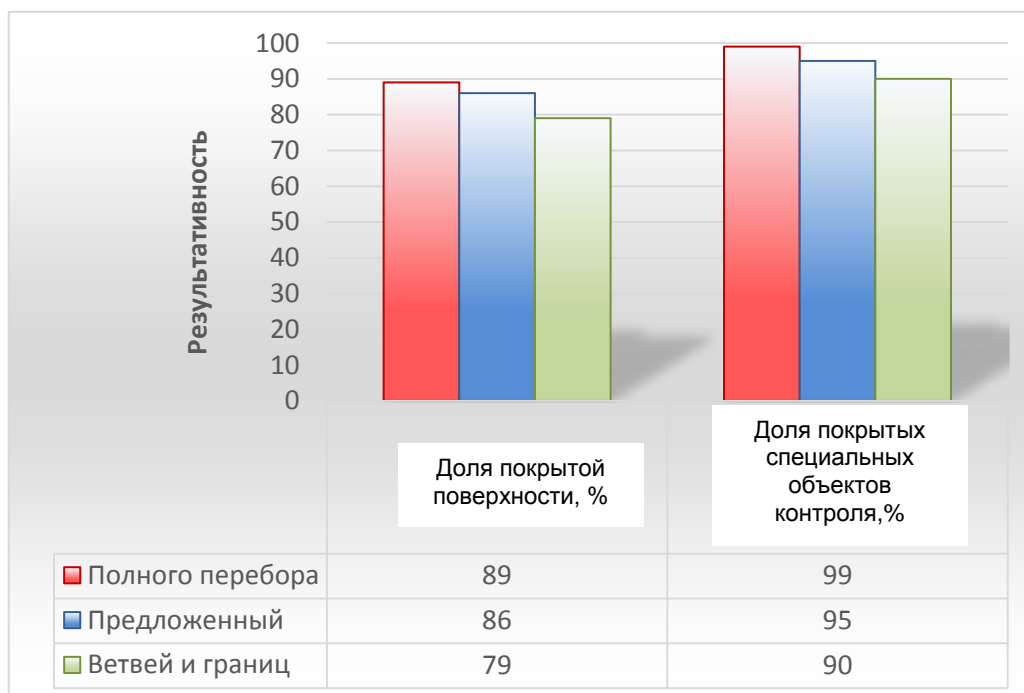


Рис. 6. Результаты опробации метода

Вывод. Разработанный метод позволяет при поиске оптимального плана применения учитывать ограничения динамического характера, представленные в виде ресурсной и логической составляющих, в том числе связанных с ограниченностью применения мобильного лидарного комплекса из-за факторов среды и динамических ограничений.

Список используемых источников

1. Военные применения лазеров / под ред. А.С. Борейшо; Балт. Гос. Тех. Ун-т. – СПб., 2015. – 103 с.
2. Беллман Р. Процессы управления с адаптацией. – М.: Наука, 1964. – 360 с.
3. Бурштейн И.М. Динамическое программирование в планировании. – М.: Экономика, 1966. – 127 с.
4. Калинин В.Н. Теория управления космическим аппаратом (на основе концепции активного объекта): моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 182 с.
5. Калинин В.Н. О некоторых задачах оптимального управления информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 41. – С. 34–56.
6. Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л. Исследование процесса диагностирования бортовой аппаратуры автоматических космических аппаратов с использованием дискретно-событийной имитационной модели // Труды СПИИРАН. – 2018. – Вып. 56. – С. 95–121.

И.А. Ледянкин,
кандидат техн. наук;
О.Е. Нестеренко,
кандидат техн. наук;
С.А. Платонов,
кандидат техн. наук

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СИМПЛЕКС-МЕТОД ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ, РЕАЛИЗУЕМЫХ НА СРЕДСТВАХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ И БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Обоснована актуальность решения задачи оптимизации информационной структуры параллельной программы, реализующей алгоритм обработки информации. В статье продемонстрировано, что основным показателем эффективности функционирования средств автоматизированных систем мониторинга космических и баллистических объектов является производительность вычислительных комплексов, осуществляющих обработку радиолокационной информации.

В статье предложено использование модифицированного симплекс-метода решения задачи целочисленного линейного программирования для сокращения вычислительной сложности получения оптимальной информационной структуры параллельной программы, реализуемой на средствах автоматизированных систем мониторинга космических и баллистических объектов.

Ключевые слова: вычислительная система, вычислительный комплекс, оптимизация параллельных вычислений, планирование обработки информации, параллельные программы.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня происходят кардинальные изменения характера, способов и форм ведения боевых действий, обусловленные стремительным развитием информационных технологий и перемещением основных театров боевых действий в воздушно-космическую сферу.

В сложившейся ситуации особое значение приобретают вопросы обеспечения оперативности обработки радиолокационной информации на средствах автоматизированных систем мониторинга космических и баллистических объектов в условиях применения противником перспективных средств воздушно-космического нападения. В то же время одним из важнейших показателей эффективности функционирования средств автоматизированных систем мониторинга космических и баллистических объектов является *производительность вычислительных средств*, осуществляющих обработку радиолокационной информации.

Наиболее часто в современной литературе для оценивания производительности используется ее пиковое значение [1, 2]. Частными же показателями в этом случае является количество выполняемых операций с плавающей или фиксированной точкой в секунду. Тем не менее на практике при реализации конкретных параллельных программ на данных системах измеренное значение производительности колеблется в пределах 2–90% от пиковой [3]. Но в отношении автоматизированных систем мониторинга космических и баллистических объектов наиболее объективным показателем для оценивания производительности стала длительность обработки отдельных радиолокационных отметок, целей и траекторий или же длительность программ, реализующих данные алгоритмы.

Общепризнанными направлениями для повышения производительности вычислительных средств являются [1–3]:

- повышение тактико-технических характеристик используемого оборудования (тактовой частоты процессоров, доступного объема оперативного запоминающего устройства, объема кэш-памяти и др.);
- совершенствование архитектуры вычислительных средств;
- оптимизация алгоритмов обработки информации.

Первые два направления вполне очевидны и лежат в области достижений оборонно-промышленного комплекса. Третье же направление на некоторых классах задач обеспечивает значительно более высокий прирост производительности и к тому же вполне доступно для проведения исследований в научно-образовательных организациях.

Цель проведения оптимизации алгоритмов вычислительных задач состоит в минимизации длительности выполнения программ их реализующих. Кроме того, исследования в данной области являются, несомненно, важными не только для технических систем и объектов специального назначения, но и для ряда народно-хозяйственных областей науки и техники, и работы, выполненные на данную тему, не теряют своей актуальности [1–3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

В работе [4] предложен алгоритм оптимизации информационной структуры программы, предназначенной для выполнения на автоматизированных системах обработки радиолокационной информации в темпе ее поступления. Его особенность и преимущество заключаются в применении симплекс-метода, гарантирующего получение оптимального решения, в целочисленной постановке общей задачи линейного программирования. Однако рядом авторов [3, 5, 6] отмечается высокая вычислительная сложность данного метода для оптимизации информационной структуры программы и алгоритма вычислительной задачи, предназначенной для выполнения на автоматизированных системах обработки радиолокационной информации по отношению к применяемым повсеместно эвристическим методам. Таким образом, целью данной работы является сокращение вычислительной сложности формирования оптимальной структуры вычислительной задачи.

Вычислительная задача, в самом общем виде, представляет собой последовательность некоторых операций по преобразованию входных данных для получения выходных значений. Каждую операцию можно описать множеством входных значений, выходных значений, а также длительностью ее выполнения. Таким образом, вычислительную задачу можно представить в виде ориентированного графа, узлами которого будут являться операции, а ветви между ними будут расставляться в случае наличия общих входных переменных у одной операции и выходных переменных – у предшествующих.

Предположим, что задан ориентированный граф $G(V, U)$, описывающий структуру информационных связей $u_j (j = \overline{0, n})$ между операциями $v_j (j = \overline{0, m})$, заданный в форме матрицы инцидентности $M = \|m_{ij}\|_{n \times m}$. При этом $T = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$ – множество значений длительностей выполнения операций вычислительной задачи.

Необходимо найти $\vec{x} = (x_0, x_1, \dots, x_m)$, компонентами которого являются моменты $x_j (j = \overline{0, m})$ начала операций v_j , обеспечивающих минимум длительности выполнения, т. е.

$$\vec{x}^* = \arg \min_{x \in \Delta} (x_m - x_0),$$

где Δ – множество целочисленных неотрицательных значений компонентов вектора \vec{x} .

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБЩЕЙ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Задачи минимизации суммарной длительности операций сложных технологических процессов, в работах различных авторов [5, 6], решаются как экстремальные задачи сетевого планирования на графе. При этом методы их решения можно классифицировать как *эвристические*, *комбинаторные* и *аналитические*. Эвристические методы, как правило, отличаются простотой и позволяют получить удовлетворительные решения задач, однако применимы к узкому классу задач [6]. Комбинаторные и аналитические методы применимы к широкому классу задач и позволяют получить оптимальные решения, но обладают высокой вычислительной сложностью [5, 6].

Достоинством аналитических и комбинаторных методов является гарантированное получение оптимальных решений. Тем не менее при всей привлекательности этих методов системы ограничений для аналитических методов не всегда корректно формализуются, а вычислительная сложность комбинаторных методов сопоставима с полным перебором множества допустимых решений.

Для однозначного определения стока и истока графа предлагается ввести дополнительные вершины нулевой длительности (пример показан на рис. 1), такие, при которых

$$x_0 \leq x_p \text{ и } x_{m+1} \geq x_q,$$

где p и q – номера истоков и стоков на исходном графе $G(V, U)$.

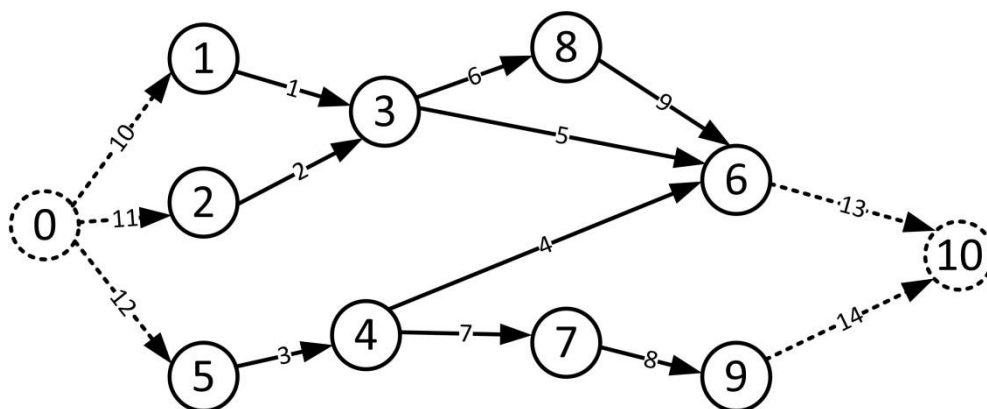


Рис. 1. Пример исходного графа с добавленными вершинами

Программа, реализующая алгоритм обработки информации, – это последовательность некоторых операций, на которую накладываются ограничения, определяющие порядок их следования. Если принять, что $x_j (j = \overline{0, m})$ – это моменты начала операций v_j , то система ограничений примет вид

$$x_j + x_i \leq x_k, \text{ при } k > j,$$

где k и j – номера двух операций, имеющих информационную связь на графе $G(V, U)$.

Если привести эти выражения к виду

$$x_j - x_i \leq -t_j, \text{ при } k > j$$

и определить целевую функцию

$$L(\vec{x}) = x_m - x_0 \rightarrow \min,$$

то задачу можно свести к общей задаче линейного программирования и решать ее соответствующими методами.

Известно, что любые вычислительные системы работают в пределах тактовых импульсов, генерируемых микропроцессорами.

Таким образом, длительность отдельных операций возможно определять в виде целых значений количества дискретных тактовых импульсов, необходимых для их выполнения. Тогда исходная симплекс-таблица с необходимым количеством дополнительных коэффициентов при базисных переменных примет вид табл. 1.

Таблица 1

Исходная симплекс-таблица

	x_0	x_1	x_2	...	x_{m+1}	x_{m+2}	...	x_{m+n+1}	b
x_{m+2}	1	-1	0	...	0	1	...	0	0
x_{m+3}	0	1	-1	...	0	0	...	0	-5
...
x_{m+n+1}	0	0	1	...	-1	0	...	1	-7
$L(\vec{x})$	-1	0	0	...	1	0	...	0	

Нетрудно заметить, что в узлах симплекс-таблицы находятся целые коэффициенты, поэтому возможно сформулировать гипотезу о том, что *сокращение вычислительной сложности симплекс-метода возможно за счет использования при вычислениях целочисленных типов данных*.

На каждой итерации симплекс-метода производятся симплекс-преобразования, заключающиеся в следующем.

1. Разрешающий элемент устанавливается в 1, т. е. $a_{rs}^* = 1$, где r – номер разрешающего столбца, а s – номер разрешающей строки.

2. Элементы разрешающей строки делятся на разрешающий элемент, т. е.

$$a_{rj}^* = \frac{a_{rj}}{a_{rs}}.$$

3. Элементы разрешающего столбца устанавливаются в 0, т. е. $a_{is}^* = 0$.

4. Остальные элементы рассчитываются по правилу

$$a_{ij}^* = a_{ij} - \frac{a_{is} a_{rj}}{a_{rs}}.$$

Учитывая, что разрешающий элемент всегда равен единице ($a_{rs} = 1$), можно сделать вывод, что п. 1 и 2 являются избыточными, а п. 4 модифицируется следующим образом:

$$a_{ij}^* = a_{ij} - a_{is} a_{rj}.$$

Очевидно, что данные модификации позволяют сократить длительность симплекс-преобразований.

Кроме того, в текущей постановке симплекс-таблица является сильно разреженной (т. е. в ней присутствует множество нулевых значений коэффициентов), причем степень разреженности возрастает при увеличении размерности исходной задачи. Данная особенность также позволяет сократить вычислительную сложность алгоритма симплекс-метода за счет введения дополнительной проверки на 0 в п. 4 симплекс-преобразований, т. е.

$$a_{ij} = \begin{cases} a_{ij} - a_{is} a_{rj}, & \text{при } a_{is}, a_{rj} \neq 0 \\ a_{ij}, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Общая схема модифицированного симплекс-метода представлена рис. 2.

Для оценивания практической вычислительной сложности модифицированного метода была разработана программа для ЭВМ. В качестве языка программирования для разработки выбран C++ (Qt). Программа осуществляет решение общей задачи линейного программирования в целочисленной постановке классическим, а также модифицированным симплекс-методом. Для подтверждения гипотезы о возможности сокращения вычислительной сложности табличного симплекс-метода за счет использования при вычислениях целочисленных типов данных, а также получения сравнительной оценки длительности получения оптимального решения классическим и модифицированным методом проведен численный эксперимент.

С целью получения длительности выполнения программы при расчетах классическим методом для хранения необходимых значений использовались контейнеры QVector вещественных (float) типов данных. А при расчетах модифицированным – целочисленных (int) типов данных.

В качестве исходных данных использовался граф информационной структуры алгоритма сопровождения траектории цели, реализуемого на вычислительных средствах автоматизированной системы мониторинга космических и баллистических объектов. Исходный граф включал 118 вершин и 167 ветвей. Для измерения длительности получения оптимального решения использовалась библиотека QElapsedTime, в частности метод nsecsElapsed().

Для проведения численного эксперимента применялась ПЭВМ на базе микропроцессора Intel Pentium G4600 с 8 Гбайт ОЗУ под управлением ОС Astra Linux 1.5. На одном наборе исходных данных проводилось 100 измерений длительности получения оптимального решения классическим методом и модифицированным. Измерения проводились без учета операций ввода-вывода. Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и в табл. 2 (единицы измерения – наносекунды). На представленном графике присутствуют незначительные единичные флуктуации измерений, обусловленные многозадачным режимом функционирования ПЭВМ и не оказывающие значительного влияния на результаты измерений.

Таблица 2

Обобщенные статистические данные о проведенном эксперименте

Характеристики	Классический метод	Модифицированный метод	Прирост, %
Количество измерений	100	100	–
Минимальное значение, нс	785873344	328363475	41,8
Максимальное значение, нс	821780340	361052859	43,9
Среднее значение, нс	790456736	329993469	41,7
Медиана, нс	789090366	328818782	41,7
Дисперсия результатов, нс	35906996	32689384	–

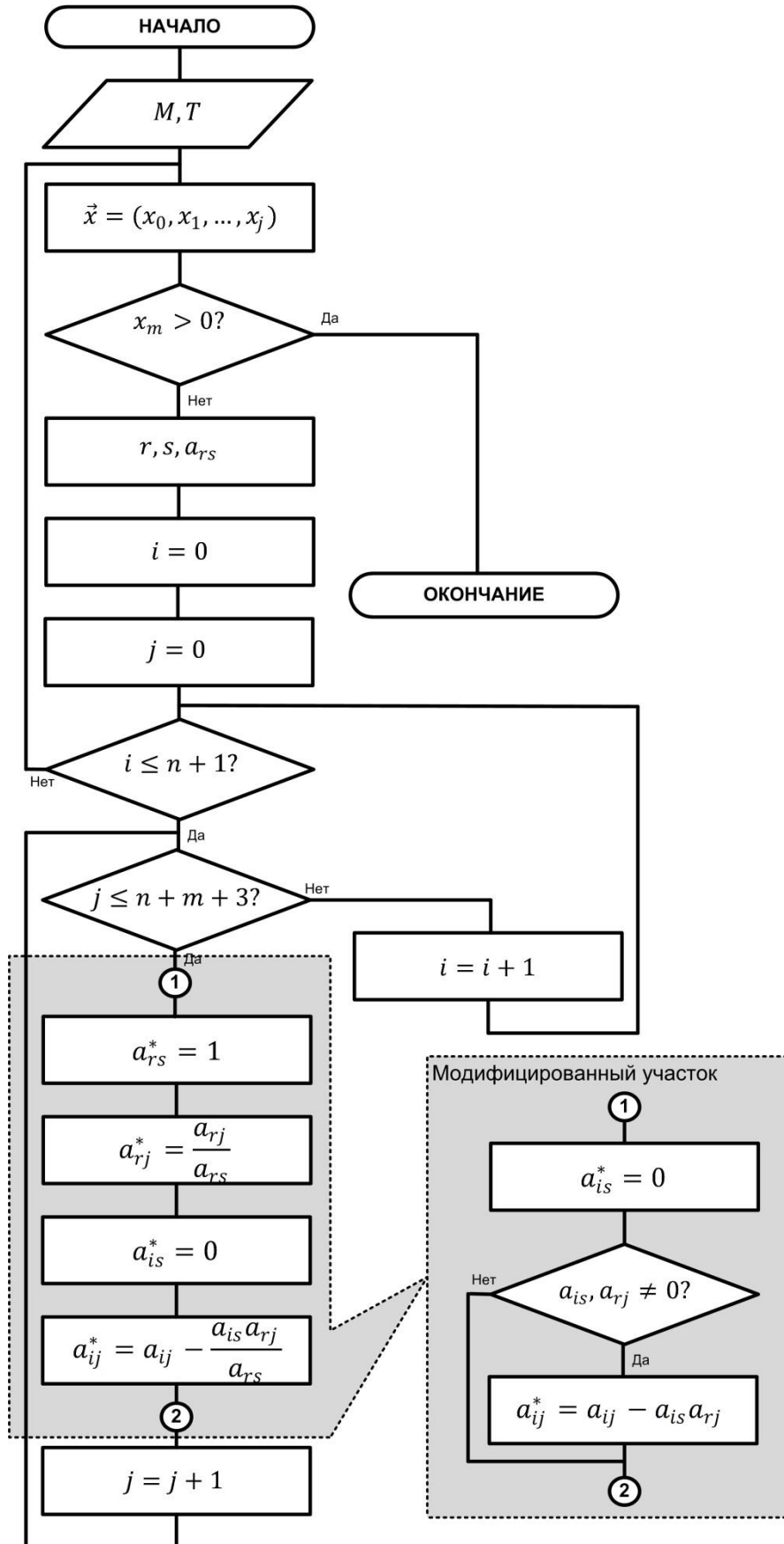


Рис. 2. Схема модифицированного алгоритма симплекс-метода

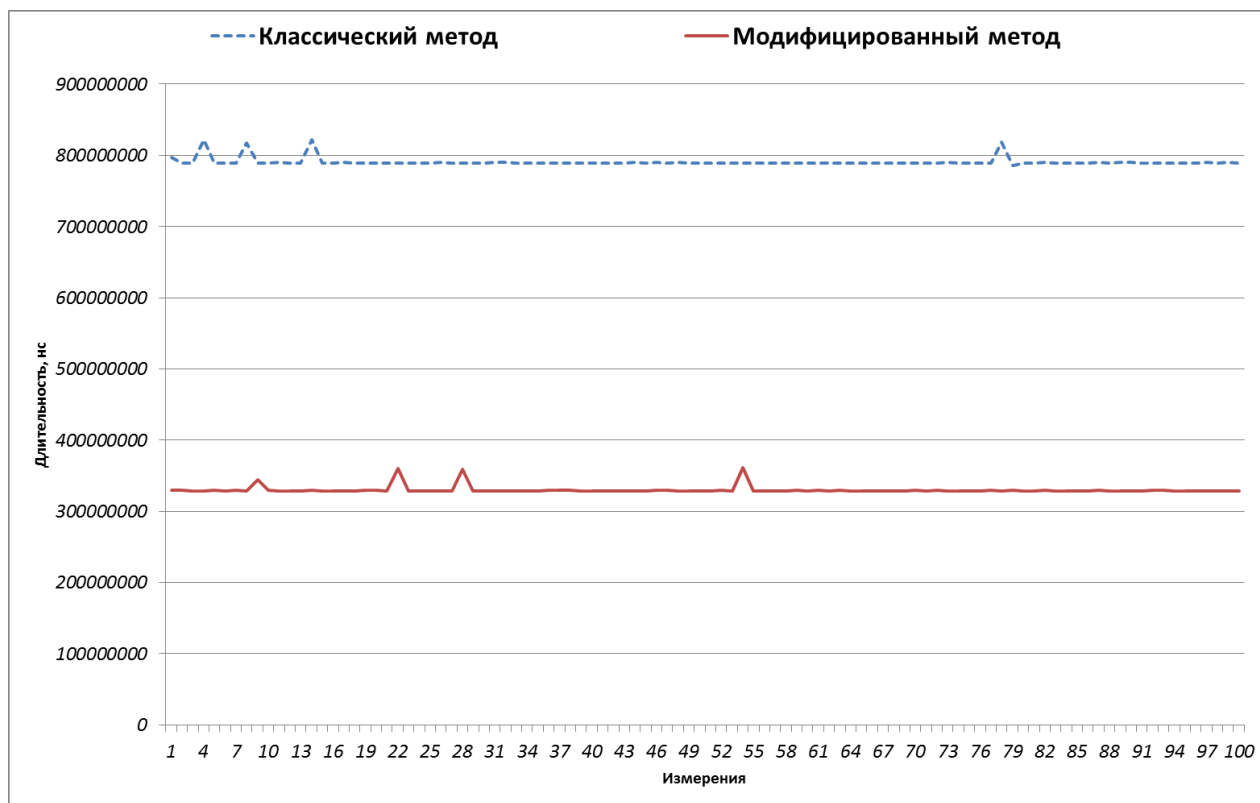


Рис. 3. Результаты проведенных измерений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислительная техника в современных автоматизированных системах играет ключевую роль, существенно влияя на их тактико-технические характеристики. Это в полной мере относится и к системам мониторинга баллистических и космических объектов, определяющим в значительной степени уровень обороноспособности страны в целом.

Развитие данных систем объективно связано с повышением степени их автоматизации, усложнением программно-алгоритмического обеспечения, повышением производительности обработки информации в режиме реального времени. В этой связи актуальными являются вопросы оптимизации структур параллельных программ, реализующих алгоритмы обработки радиолокационной информации вычислительными средствами автоматизированных систем мониторинга космических и баллистических объектов, а использование модифицированного симплекс-метода позволяет сократить на 40% длительность получения оптимального плана выполнения операций вычислительной задачи.

Список используемых источников

1. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
2. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.
3. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1967. – 400 с.
4. Легков К.Е., Нестеренко О.Е. Алгоритм формирования информационной структуры параллельных программ иерархической вычислительной системы // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 52–59.

5. *Зуховицкий С.И., Радчик И.А.* Математические методы сетевого планирования. – М.: Наука, 1965. – 296 с.
6. *Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю.* Дискретное программирование. – М.: Наука, 1969.
7. Линейные неравенства и смежные вопросы: сб. статей / под ред. Г.У. Куна и А.У. Таккера. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1959.

Е.В. Котьяшов,
кандидат техн. наук

КОНЦЕПТУАЛЬНО-СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

В статье приводится описание модели функционирования орбитальной системы космических аппаратов наблюдения и предупреждения опасных ситуаций на геостационарной орбите. Представленная модель может быть использована как инструментарий при обосновании баллистической структуры и количественного состава орбитальной системы космических аппаратов наблюдения на геостационарной орбите.

Ключевые слова: геостационарная орбита, объект космического мусора, система контроля космического пространства, космический аппарат, предупреждение опасных ситуаций.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема наличия космического мусора в околоземном космическом пространстве (ОКП) с каждым годом требует к себе все более пристального внимания. Особенно остро она стоит для орбит, часто используемых для работы космических аппаратов (КА). Это низкие околоземные орбиты, геостационарная орбита (ГСО) и солнечно-синхронные орбиты. Долгосрочное прогнозирование процесса засорения ОКП показывает, что даже при самых решительных мерах, таких как немедленное прекращение всех запусков и деятельности в космосе, связанных с образованием объектов космического мусора (ОКМ), стабильность космической среды не может быть обеспечена. Все известные меры борьбы с ОКМ, кроме принудительного снятия его с орбиты, пока могут только замедлить темп засорения ОКП, но не снизить общую массу ОКМ. Наблюдение за космическим мусором ведут национальные службы контроля космического пространства различных стран с использованием в основном наземных радиолокационных и оптических средств. Вместе с тем космические средства могут существенно расширить способности этих служб.

Для защиты КА от ОКМ в настоящее время, как правило, используют пассивные способы, такие как защитное маневрирование, усиление корпуса КА и т. д. [1]. При этом также прорабатываются активные способы борьбы с космическим мусором орбитальными средствами. К ним относятся следующие [1]:

- создание небольших КА-уборщиков, которые могли бы присоединяться к крупным обломкам ОКМ и за счет собственных двигательных установок уводить их с орбиты;
- создание КА, несущего на борту несколько КА-уборщиков, которые прикрепляются к крупным обломкам, возвращаются с «добычей», а затем коллективно самоуничтожаются;
- использование на КА электромагнитного привода – длинного кабеля, который по окончании срока службы КА выполняет функцию спуска отработавшего спутника в атмосферу Земли;
- использование мощного наземного лазера. Он должен испарять часть материала на поверхности ОКМ. Это, в свою очередь, создает импульс, который изменит орбиту объекта (ее эксцентриситет), что повлечет за собой торможение в верхних слоях атмосферы и сократит время жизни обломка в космосе.

Наибольшие опасения с точки зрения количества ОКМ вызывает «захламленность» ГСО, где по разным источникам насчитывается около десяти тысяч объектов различной величины [1]. Космическим мусором становятся отработанные ступени ракет-носителей, разгонные блоки, потерявшие управление КА, а также их элементы и фрагменты [1]. Для геостационарной орбиты, в силу ее удаленности от Земли, наиболее приемлемым вариантом является создание орбитальной системы наблюдения и предупреждения опасных ситуаций (ОС НПОС), которая будет состоять из нескольких КА предупреждения опасных ситуаций (КАПОС). КАПОС будут оснащены бортовой оптико-электронной аппаратурой (БОЭА) наблюдения для контроля ОКП и выявления эволюции орбит ОКМ. На борту каждого КАПОС будут располагаться несколько КА-уборщиков (КА-У) – это малые КА, которые по выданным целеуказаниям должны сблизиться с ОКМ, представляющим угрозу отечественным КА, затем закрепиться на нем и транспортировать на орбиту «захоронения».

Таким образом, ОС НПОС должна выявлять потенциальные угрозы, предупреждать об опасных сближениях, осуществлять контроль выведения аппаратов на орбиту, а также в «рамки обязанностей» системы входит захоронение крупных ОКМ.

Следует отметить, что создание ОС НПОС может быть осуществлено согласно Федеральной космической программе России на 2016–2025 годы, где указана разработка к 2025 году космических аппаратов – «уборщиков» мусора с геостационарных орбит [2].

Для обоснования состава и баллистической структуры ОС НПОС необходимо провести исследования эффективности ее применения. Основным средством исследования свойств космической системы (КС), частью которой является ОС, становится математическое моделирование. Как известно, математическая модель представляет собой [3, 4] знаковую систему, намеренно упрощенно воспроизводящую интересующие исследователя свойства и поведение объекта исследования. Как и всякая система, математическая модель состоит из взаимосвязанных компонент и имеет определенную структуру. В зависимости от конкретных задач модели могут иметь различную степень сложности и могут реализовываться посредством различного научно-методического аппарата.

Таким образом, создание модели ОС НПОС, представляющей собой систему логико-математических описаний зависимостей между показателями качества и эффективности, с одной стороны, и параметрами, характеризующими функционирование ОС, ее операции и внешнюю среду – с другой, является актуальной задачей для оценивания и парирования опасных сближений отечественных КА с ОКМ на ГСО.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

ОС НПОС будем рассматривать как сложную систему [4], поскольку при ее исследовании, необходимо учитывать большое количество взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, обеспечивающих выполнение целевых задач. Особенности процесса функционирования ОС НПОС и число анализируемых в ней факторов и связей таковы, что возникает необходимость использования иерархического подхода, при котором общая задача исследования декомпозируется на ряд частных подзадач различного уровня, связанных друг с другом функционально по входным и выходным параметрам.

При моделировании и комплексном исследовании вопросов, связанных с динамикой функционирования ОС НПОС всю совокупность параметров можно разделить на следующие структурные группы:

- временные параметры функционирования;
- параметры ОС НПОС;
- параметры отдельного КАПОС;
- параметры отдельного КА-У;
- параметры БОЭА КАПОС;

- параметры БОЭА КА-У;
- параметры фоноцелевой обстановки в ОКП.

Соответствующий перечень компонент будет определять информационную структуру объекта моделирования, в качестве которого выступает процесс функционирования ОС НПОС при решении целевых задач.

Модель устанавливает алгоритмическую зависимость выходного эффекта системы, определяемого заданным показателем эффективности или качества.

Для получения значений показателей эффективности в модели орбитальной системы необходимо отображать следующие процессы:

- движение КА в ОКП (управляемое движение КА при совершении маневров и движение КА по орбите без включения двигательных установок);
- движение ОКМ в ОКП;
- агрегированное функционирование БОЭА и бортового информационно-вычислительного комплекса КА в ходе сбора, накопления и обработки информации на борту;
- расчет плана применения КАПОС и КА-У по выполнению задач наблюдения и увода с ГСО ОКМ за заданный интервал времени.

Перечисленные основные процессы определяют структуру и состав компонент обобщенной модели применения ОС НПОС (рис. 1).

Исходными данными для модели являются:

- координаты КАПОС и ОКМ в начальный (заданный) момент времени;
- параметры ДУ, БОЭА КАПОС и КА-У;
- требования к показателям оперативности и результативности применения ОС НПОС;
- координаты Луны, Солнца, планет, параметры гравитационного поля Земли.

Вычислительными компонентами модели являются:

- модель пассивного (неуправляемого) движения ЦМ КА и ОКМ – описание движения космических объектов в ОКП под действием центральной силы земного притяжения;
- модель возмущающих воздействий – математическое описание влияния на движение КА помимо центральной (основной) силы земного притяжения дополнительных (возмущающих) сил;
- алгоритм планирования применения КАПОС и КА-У – алгоритм определения, какие ОКМ будут «обслужены» КАПОС и КА-У, исходя из энергетических возможностей КА и приоритета обслуживания ОКМ;
- модель активного (управляемого) движения ЦМ КА – описание маневрирования КА в ОКП;
- модель отделения КА-У от КАПОС – описание процесса отделения КА-У от КАПОС, включает процессы успокоения ориентации КА-У после отделения;
- блок расчета включений ДУ КА, определяются интервалы включения ДУ КА при выполнении маневров;
- блок расчета показателей эффективности применения ОС НПОС, включает в себя модель процесса наблюдения (описание проведения съемки ОКМ с помощью БОЭА) и модель процесса увода ОКМ (описание сближения КА-У с ОКМ и увод на орбиту «захоронения»).

В качестве целевых (функциональных) показателей эффективности функционирования ОС НПОС могут выступать [5]:

- информационная оперативность – математическое ожидание суммарного времени, затрачиваемого системой на получение и доведение до потребителя необходимого объема достоверной информации об ОКМ;
- баллистическая периодичность – значение интервала времени между последовательными наблюдениями одного и того же ОКМ, определяемое только баллистической структурой ОС НПОС;

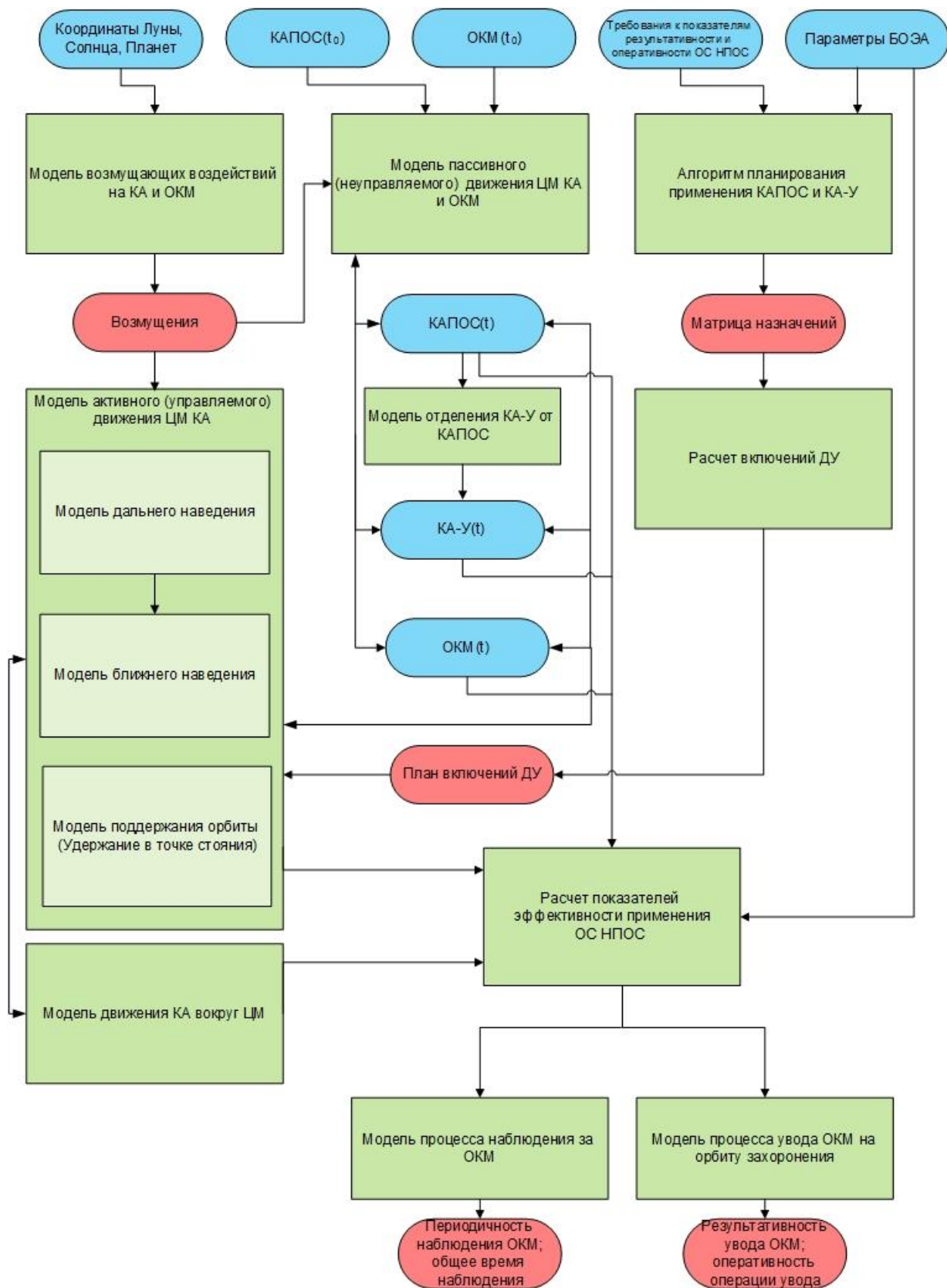


Рис. 1. Структурная схема модели применения ОС НПОС на геостационарной орбите

– эффективная периодичность – значение интервала времени между последовательными наблюдениями одного и того же ОКМ, определяемое не только баллистической структурой ОС НПОС, но и возможностями БОЭА в заданных условиях наблюдения;

– целевая оперативность – значение интервала времени с момента выдачи целеуказания КА-У до момента увода ОКМ с ГСО;

– результативность – количество ОКМ, удаленных (уведенных) с ГСО с помощью КА-У за заданное время.

Новизна представленной модели заключается в комплексном описании процесса функционирования сложной технической системы, представляющей собой совокупность средств контроля космического пространства и увода с ГСО ОКМ наиболее опасных для отечественных КА.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО СЕГМЕНТА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

В модели функционирования ОС НПОС определяются характеристики анализируемых величин. В частности, с точки зрения оценивания целевой эффективности процесса функционирования орбитальной системы наибольший интерес представляют средние значения показателей периодичности и оперативности:

– периодичность наблюдения ОКМ на ГСО – интервал времени между последовательными наблюдениями одного и того же ОКМ с КАПОС;

– оперативность увода ОКМ – интервал времени с момента выдачи целеуказания КА-У до момента увода ОКМ с ГСО.

Для определения стратегии применения ОС НПОС необходимо рассчитать возможности КА по информационному сопровождению опасных сближений и увода ОКМ с ГСО на орбиту захоронения. Моделирование функционирования ОС НПОС выполнялось при следующих исходных данных:

– масса КАПОС – 400 кг;

– масса КА-У – 100 кг;

– тяга ДУ КАПОС – 10 Н;

– тяга ДУ КА-У – 1 Н;

– запас характеристической скорости КАПОС – 300 м/с;

– запас характеристической скорости КА-У – 100 м/с.

При моделировании предполагалось, что состав ОС НПОС предусматривает четыре КАПОС, каждый из которых оснащен тремя КА-У.

Оценки возможностей ОС НПОС позволили сформировать варианты построения орбитальной группировки:

Вариант 1. Один КАПОС расположен на орбите «захоронения», а три КАПОС, охватывающие 30-градусный сектор каждый, покрывают территорию России (рис. 2,а);

Вариант 2. Три КАПОС располагаются равномерно через 120 градусов на орбите «захоронения», а один КАПОС располагается в точке стояния, соответствующей 90 градусам восточной долготы (рис. 2,б);

Вариант 3. Четыре КАПОС располагаются равномерно через 90 градусов на орбите «захоронения» (рис. 2,в).

В табл. 1 представлены рассчитанные показатели функционирования ОС НПОС в соответствии с предложенными вариантами орбитального построения.

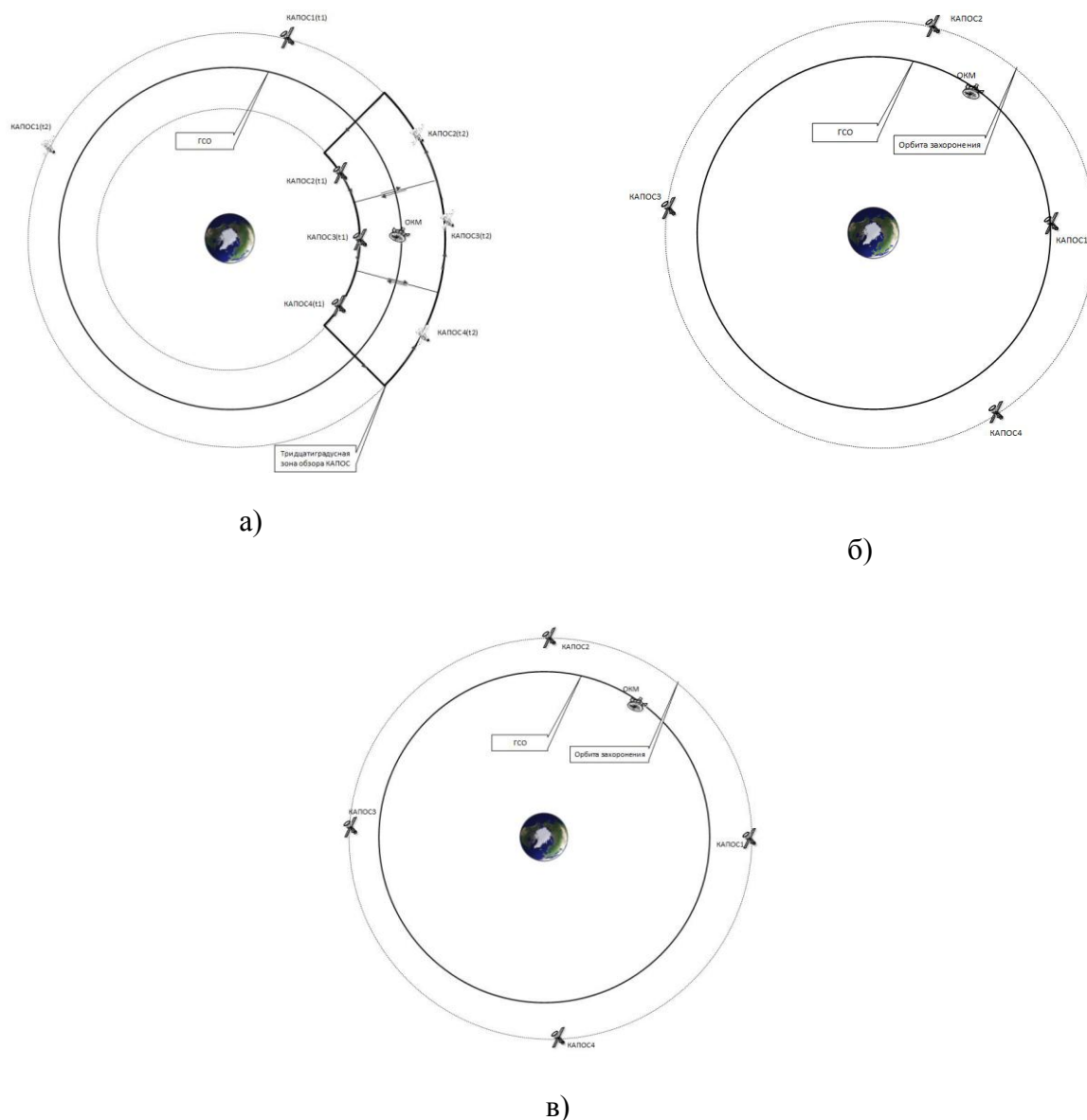


Рис. 2. Схематичное изображение вариантов построения ОС НПОС, состоящей из четырех КА:

а – первый вариант построения; б – второй вариант построения;
в – третий вариант построения

Таблица 1

Сравнение вариантов построения ОС НПОС

№ п/п	Показатели эффективности ОС НПОС	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	Периодичность наблюдения ОКМ на ГСО, сут.	142	43	33
2	Периодичность наблюдения ОКМ на ГСО над территорией РФ, сут.	24	43	33
3	Оперативность увода ОКМ, ч	120	60	45
4	Оперативность увода ОКМ, расположенного над территорией РФ, ч	40	50	45

Оптимальным с точки зрения решаемых задач является третий рассмотренный вариант построения ОС НПОС. Тем не менее исходя из конкретного назначения системы и перечня целевых задач можно использовать любой из представленных вариантов либо их комбинации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в статье модель реализована в среде разработки приложений Qt и интегрирована в программный комплекс оценивания эффективности применения космических комплексов [6]. Структура программного комплекса показана на рис. 3.

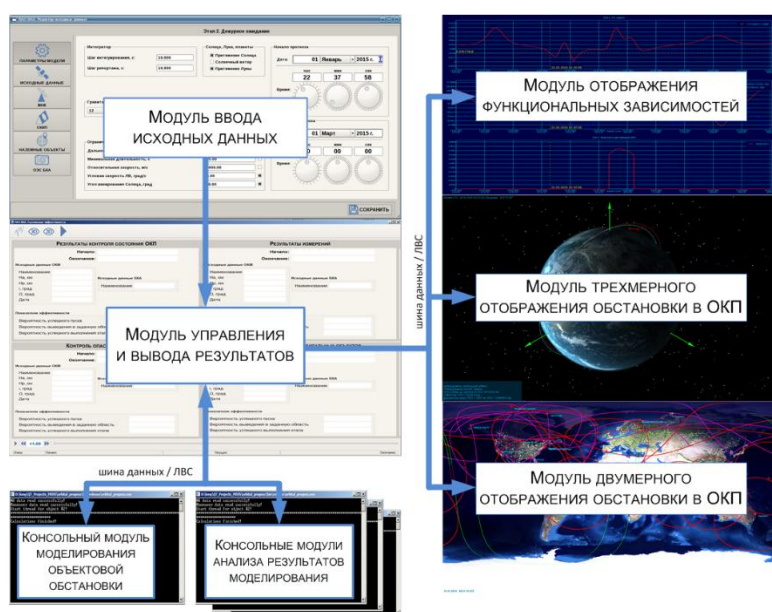


Рис. 3. Структура программного комплекса

Он включает унифицированные кросс-платформенные библиотеки визуальных и невизуальных классов, предназначенные для следующих действий:

- моделирования применения наземных и орбитальных космических средств (комплексов, систем);
- оценивания эффективности применения орбитальных группировок, решающих задачи воздушно-космической обороны;
- визуализации (2D, 3D) динамики изменения обстановки и результатов моделирования.

Предложенное в статье описание технологии моделирования процесса функционирования орбитальной системы космических аппаратов наблюдения для оценивания и парирования опасных сближений отечественных КА с ОКМ позволяет обосновать варианты баллистического построения, состав и порядок функционирования орбитальной группировки КА предупреждения опасных ситуаций и КА-уборщиков для их применения в окрестности ГСО.

Список используемых источников

1. Вениаминов С.С. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 208 с.
2. Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы. – URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 12.01.2020).

3. *Мышкис А.Д.* Элементы теории математических моделей. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
4. *Москвин Б.В.* Теория принятия решений. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 383 с.
5. *Минаков Е.П., Шафигуллин И.Ш.* Модели оценивания эффективности применения орбитальных группировок космических систем. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 98 с.
6. Свид. о регистрации № 2017662709. Программный комплекс оценивания эффективности применения космических комплексов: программа для ЭВМ / М.Г. Кудинов, Е.В. Котяшов, В.А. Чернявский и др.

Е.В. Котяшов,
кандидат техн. наук;
О.Л. Куваев;
А.В. Чарушников,
доктор военных наук, профессор

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Предлагается метод планирования применения орбитальной системы мониторинга космической обстановки, предназначенной для обслуживания орбитальных объектов на геостационарной орбите. Приводится численный пример реализации предложенного метода.

Ключевые слова: система мониторинга космической обстановки, области достижимости космического аппарата, космический аппарат, орбитальный объект.

ВВЕДЕНИЕ

Орбитальная система мониторинга космической обстановки (ОС МКО) на геостационарной орбите (ГСО) представляет собой совокупность нескольких космических аппаратов носителей (КАН) с расположенными на их борту отделяемыми автономными модулями обслуживания (АМО). КАН предназначен для наблюдения за орбитальными объектами (ОО) и способен выполнять маневры в плоскости своей орбиты с целью создания благоприятных условий для последующей автономной работы АМО, который предназначен для сближения с ОО с целью проведения технического обслуживания и текущего ремонта.

Задача планирования применения ОС МКО заключается в составлении плана обслуживания группы ОО с целью устранения неисправностей, возникающих при чрезвычайных ситуациях и может быть представлена как задача распределения ресурсов между потребителями. При этом в качестве потребителей выступают ОО, в качестве производителя – орбитальные средства ОС МКО, в качестве ресурса – АМО.

Существующие методы решения задачи распределения ресурсов [1–4, 13] не позволяют учесть особенности орбитальных средств ОС МКО, заключающиеся в следующем:

- КАН и АМО имеют ограниченный запас характеристической скорости, определяющий их возможности по маневрированию и сближению с ОО;
- продолжительность активного функционирования АМО, вследствие конструктивных особенностей (отсутствие панелей солнечных батарей), ограничена ресурсом работы бортовых батарей системы электропитания;
- каждый ОО имеет свой приоритет обслуживания;
- продолжительность проведения операции обслуживания ограничена;
- каждый из АМО может произвести обслуживание не более одного ОО.

Цель проведенной работы – это разработка метода планирования применения ОС МКО, позволяющего решить задачу распределения АМО с учетом продолжительности их функционирования и ограниченности запасов характеристической скорости КАН и АМО.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

Формальная постановка задачи имеет следующий вид.

Дано:

– исходное состояние множества орбитальных средств ОС МКО

$$B = \{b_j\}, \quad (1)$$

где $j = 1..J$ – номер КАН,

$$b_j = \langle \varphi_j^{\text{КАН}}, V_j, K_j, \mathbf{c}_j \rangle,$$

где $\varphi_j^{\text{КАН}}$ – долгота подспутниковой точки («точка стояния») КАН на ГСО;

V_j – запас характеристической скорости КАН;

K_j – количество АМО на j -м КАН;

\mathbf{c}_j – вектор, характеризующий множество АМО на борту j -го КАН,

$$\mathbf{c}_j = \{V_m^j, t_m^j\},$$

где V_m^j – запас характеристической скорости m -го АМО j -го КАН;

t_m^j – продолжительность функционирования m -го АМО после отделения от j -го КАН,

$m = 1..K_j$;

– исходное состояние множества ОО

$$A = \{a_i\}, \quad (2)$$

где $i = 1..I$ – номер ОО,

$$a_i = \langle \varphi_i^{\text{ОО}}, w_i \rangle,$$

где $\varphi_i^{\text{ОО}}$ – долгота подспутниковой точки («точка стояния») ОО на ГСО;

w_i – приоритет обслуживания i -го ОО, причем

$$\sum_{i=1}^I w_i = 1. \quad (3)$$

Необходимо: найти план применения ОС МКО:

$$\mathbf{p}^* = \arg \max_{\mathbf{p} \in \mathbf{P}} W(\mathbf{p}), \quad (4)$$

где \mathbf{P} – множество планов применения ОС МКО;

$W(\mathbf{p})$ – сумма приоритетов ОО, назначенных для обслуживания,

$$W(\mathbf{p}) = \sum_{k=1}^K w_k,$$

где k – номера ОО, назначенных для обслуживания;

\mathbf{p} – матрица целераспределения орбитальных средств ОС МКО, $\mathbf{p} = \|p_{(jm)i}\|$,

$$p_{(jm)i} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й АМО } j\text{-го КАН обслуживает } i\text{-й ОО,} \\ 0, & \text{в противоположном случае,} \end{cases}$$

с учетом ограничений:

$$\forall b_j : \Delta V_m^j \leq V_m^j, \Delta V_j \leq V_j; \quad (5)$$

$$t_{\text{оп}}(\mathbf{p}) \leq T_{\text{зад}}. \quad (6)$$

Здесь ΔV_m^j – затраты характеристической скорости m -го АМО j -го КАН;

ΔV_j – затраты характеристической скорости на выполнение операций плана j -го КАН;

$t_{\text{оп}}(\mathbf{p})$ – время, затраченное на проведения операции обслуживания назначенных ОО;
 $T_{\text{зад}}$ – заданная продолжительность проведения операции обслуживания.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Метод состоит из нескольких этапов.

Этап 1. Построение пространственно-временных областей достижимости АМО $g^{\text{АМО}}$ и КАН $g^{\text{КАН}}$, под которыми понимается множество точек пространства, достижимых АМО (КАН) при полном (отведенном на выполнение операции) расходе характеристической скорости $\Delta V_{(m)j}$ [6, 7] за время $t_{\text{оп}}$. Тогда

$$g^{\text{АМО(КАН)}} = f(V_m^j, t_{\text{оп}}). \quad (7)$$

Для построения областей достижимости используется аналитическое решение оптимизационной задачи двухимпульсного перелета космического аппарата из точки в точку по критериям минимума (максимума) времени на основе математического аппарата теории годографов перелета [8]. Общий вид области достижимости КА на ГСО представлен на рис. 1.

Точки пересечения области достижимости КА с траекторией движения ОО позволяют определить фазовые углы, которые характеризуют возможность сближения с обслуживаемым ОО при заданном расходе характеристической скорости и продолжительности функционирования АМО [5].

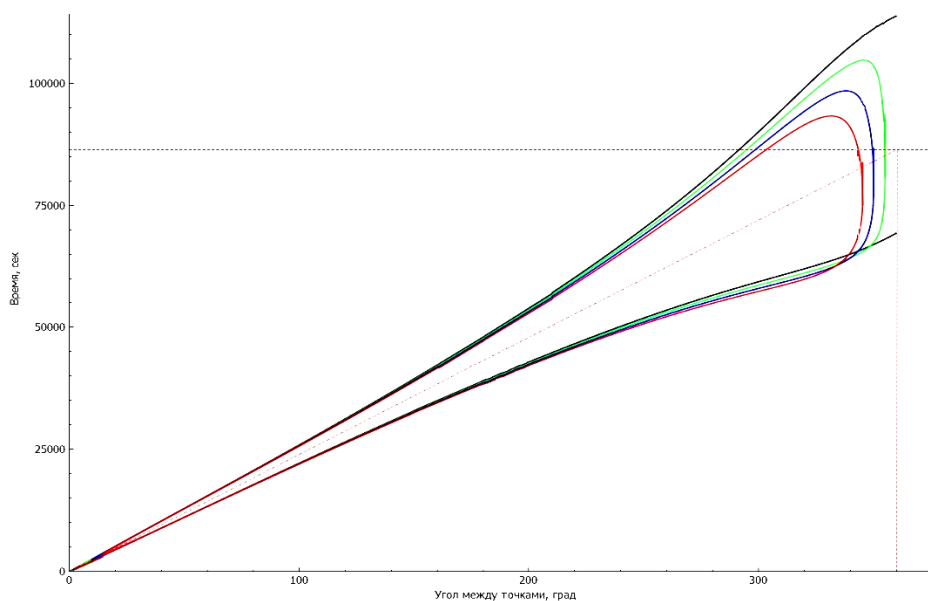


Рис. 1. Общий вид области достижимости КА

Этап 2. Определение возможностей ОС МКО по обслуживанию ОО при ограничениях на запас характеристической скорости КАН и АМО, а также продолжительность функционирования АМО.

Результаты анализа взаимного расположения пространственно-временных областей достижимости АМО и траекторий движения ОО позволяют сформировать матрицу достижимости ОС МКО $\mathbf{D} = \|\mathbf{d}_{in}\|$, $n=1...N$, число строк которой равно общему количеству АМО N , $N = \sum_{j=1}^J K_j$, число столбцов – количеству ОО, а элементы принимают значение, равное единице, если i -й ОО достижим для соответствующего АМО, и нулю – в противном случае. Общий вид матрицы достижимости представлен на рис. 2.

Номер КАН	Номер АМО	Номер ОО					
		1	2	3			N
1	1	1	0	0			1
	2	1	0	0			1
	
	K_j	1	0	0			1
...	
j	1	1	1	0		...	0
	2	1	1	0			0
	K_i	1	1	0			0
...	
J	1	0	0	1			1
	1
	K_j	0	0	1			1

Рис. 2. Общий вид матрицы достижимости

Матрица достижимости характеризует возможности ОС МКО по обслуживанию ОО, причем для всех АМО, принадлежащих одному КАН, значения в матрице будут совпадать.

Этап 3. Распределение ресурсов ОС МКО по ОО. Для распределения ресурсов ОС МКО по ОО строится матрица \mathbf{D}^* , размерность которой равна матрице \mathbf{D} , а значения – произведению приоритета обслуживания w_i i -го ОО на значения i -го столбца.

Содержание подэтапа сводится к задаче о взвешенном паросочетании в двудольном графе. Данную задачу можно решать, применяя метод, называемый в частном случае венгерским [1, 2, 13], суть которого заключается в том, что на каждой итерации исходная матрица \mathbf{D}^* изменяется путем добавления одной и той же величины ко всем элементам одной из строк или одного из столбцов. Целью этой процедуры является увеличение количества нулевых элементов матрицы \mathbf{D}^* . Часть нулевых элементов называется независимыми нулями. В каждой строке и столбце может быть не более одного независимого нуля. Основной особенностью данной процедуры является то, что на каждой итерации определяется количество независимых нулей. Если оно меньше размерности матрицы, то вычисления продолжаются, в противном случае – прекращается. Результатом решения является матрица назначений $\mathbf{p} = \|p_{(jm)i}\|$, где $p_{(jm)i}$ принимают значение единицы в случае, если m -й АМО j -го КАН обслуживает i -й ОО, и нуля – в противном случае.

Этап 4. Расширение возможностей ОС МКО с использованием маневра КАН.

При возможности совершения маневра КАН план применения АМО может быть уточнен с целью максимизации суммы приоритетов обслуживаемых ОО. Для этого строится матрица достижимости с учетом зон достижимости КАН. Так как КАН может совершать маневр относительно точки стояния условно по часовой стрелке или против часовой стрелки, количество матриц достижимости, которые необходимо построить, будет равно 2^J , где J – количество КАН. Далее для каждой матрицы достижимости ищется матрица назначений \mathbf{p} . В результате вычислений выбирается матрица назначений, для которой сумма приоритетов обслуживаемых объектов будет максимальной.

Для сокращения времени вычислений можно найти рациональный план применения ОС МКО, используя для определения направления маневра КАН график, представленный на рис. 3. На графике показаны результаты ранжирования и оценивания потенциальных возможностей обслуживания ОО. Значения изменения суммы рангов обслуживаемых ОО в зависимости от точки стояния КАН получают следующим образом:

$$d_q = f(\varphi_q^{\text{КАН}}) = \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^I k_q w_i, k_q = \begin{cases} 1, & \text{если } \varphi_i^{\text{ОО}} \in (\varphi_j^{\text{КАН}} \pm \mathcal{G}(g^{\text{АМО}})) \\ 0, & \text{если } \varphi_i^{\text{ОО}} \notin (\varphi_j^{\text{КАН}} \pm \mathcal{G}(g^{\text{АМО}})) \end{cases} \quad (8)$$

где $\varphi_q^{\text{КАН}}$ – потенциальное расположение КАН на ГСО, $\varphi_q^{\text{КАН}} = q \cdot Sq$;
 Sq – шаг дискретизации потенциальных мест расположения КАН, $q = 0 \dots Q - 1$,
 $Q = \text{Int}[360/Sq]$;
 $\mathcal{G}(g^{\text{АМО}})$ – фазовый угол между АМО и ОО, характеризует расстояние, которое способен преодолеть АМО за заданное время с заданным запасом характеристической скорости.

На графике также представлены точки стояния КАН (долготы точек стояния на ГСО), расположение обслуживаемых ОО (высота линии соответствует рангу ОО), области достижимости КАН. При анализе графика выбираются максимальные значения суммы рангов ОО, попадающие в области достижимости соответствующего КАН. В зависимости от того, с какой стороны относительно точки стояния КАН будут находиться данные значения, выбирается направление маневра соответствующего КАН. Далее производится выполнение этапов 2 и 3 с учетом возможностей совершения маневров КАН.

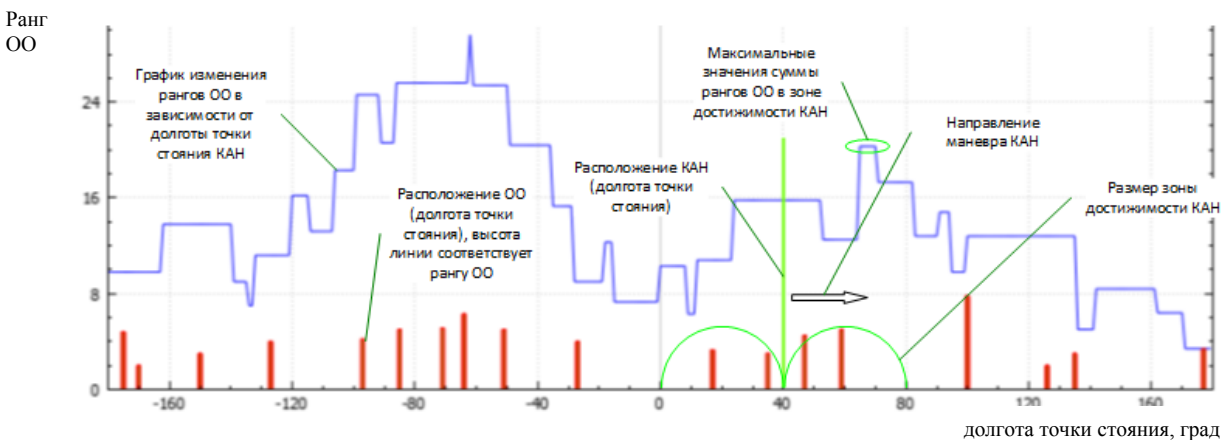


Рис. 3. График оценивания возможностей обслуживания ОО

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА

В качестве примера рассмотрена следующая ситуация.

Дано:

– орбитальная группировка, состоящая из 25 расположенных на круговой орбите ($i = 0^0$, $h = 35793$ км) ОО. Расположение ОО характеризуется долготой подспутниковой точки и приведено в табл.1;

– четыре КАН, каждый из которых имеет на борту по три АМО (табл. 2, столбцы 1 и 2);

– запасы характеристической скорости КАН и АМО равны 200 и 100 м/с соответственно.

Продолжительность автономного функционирования АМО после отделения от КАН не превышает 24 часов;

– продолжительность проведения операции обслуживания ОО не должна превышать 36 часов.

Таблица 1

Исходные данные по обслуживаемым ОО

Номер ОО	Долгота, град	Приоритет обслуживания ОО, %	Номер ОО	Долгота, град	Приоритет обслуживания ОО, %
1	2	3	1	2	3
1	175,5 з. д.	3,66	14	59 з. д.	2,89
2	169,5 в. д.	3,83	15	67 з. д.	4,08
3	150 в. д.	1,02	16	78 з.д.	5,36
4	127 в. д.	5,53	17	82 з. д.	5,87
5	97,5 в. д.	2,89	18	109 з. д.	4,00
6	85 в. д.	6,46	19	116,5 з.д.	3,06
7	71 в. д.	5,53	20	132 з. д.	4,93
8	63,8 в. д.	2,89	21	146 з. д.	3,06
9	51,3 в. д.	3,83	22	154,5 з. д.	3,91
10	27 в. д.	1,96	23	166 з. д.	4,00
11	17 з. д.	4,76	24	175 з. д.	3,06
12	35 з. д.	2,89	25	177 з. д.	4,76
13	47 з. д.	5,78			

Таблица 2

Исходные данные по КАН

Номер КАН	Долгота, град	Зона достижимости, град	Номера ОО
1	2	3	4
1	80 з. д.	35 з. д. – 125 з. д.	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
2	171 з. д.	116 з. д. – 216 з. д.	1, 20, 21, 22, 23, 24, 25
3	10 в. д.	35 з. д. – 55 з. д.	16, 17, 18, 19, 20, 21, 22
4	100 в. д.	55 в. д. – 145 в. д.	5, 6, 7

Требуется: построить план применения ОС МКО при исходных данных и приоритете обслуживания ОО, заданным столбцом 3 табл. 1.

Решение.

На рис. 4 представлен график (обозначение 2), характеризующий возможную результативность применения КАН в зависимости от долготы его точки стояния на ГСО.

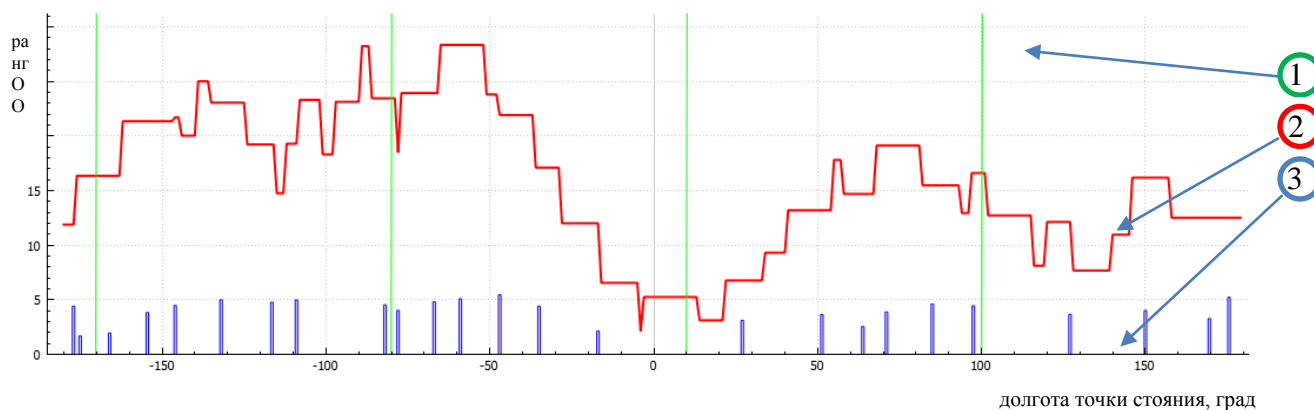


Рис. 4. Зависимость потенциальной результативности ОС МКО от долготы подспутниковой точки КАН:

- 1 – расположение КАН (долготы точек стояния на ГСО);
2 – график изменения результативности применения ОС МКО в зависимости от расположения КАН; 3 – расположение обслуживаемых ОО (высота линии соответствует рангу ОО)*

В столбцах 3 и 4 табл. 3 приведены оценки и состав ОО, попадающих в зону досягаемости КАН. В табл. 3 показаны результаты планирования применения ОС МКО в соответствии с предлагаемым методом с учетом и без учета возможности дополнительного маневрирования КАН.

Таблица 3

Возможности КАН по обслуживанию ОО

№ КАН	Планирование обслуживания ОО с использованием возможности маневрирования КАН					Планирование обслуживания ОО без учета возможности маневрирования КАН				
	Долгота точки стояния КАН, град	Результативность применения КАН, %	Ранг ОО	ΔV , м/с	t , ч	Долгота точки стояния КАН, град	Результативность применения КАН, %	Ранг ОО	ΔV , м/с	t , ч
1	67 з. д.	18	6	78	39	73 з. д.	16,5	5	55	27
2	147 з. д.	25	6	80	40	159 з. д.	23	4	60	35
3	75 в. д.	18,5	7	20 + 100	42	40 в. д.	5	5	60	35
4	152 в. д.	19,5	6	10 + 100	41	132 в. д.	17	3	80	40
	Σ	81		30 + 358		Σ	61,5		255	

Из анализа табл. 3 видно, что при использовании маневра КАН рост эффективности применения ОС МКО составляет 19,5% (от 1,5 до 13,5% для одного КАН) при увеличении суммарного расхода характеристической скорости на 133 м/с (от 20 до 60 м/с для одного КАН). При этом для третьего и четвертого КАН был достигнут предел запаса характеристической скорости АМО (100 м/с), а недостающий запас характеристической скорости был реализован за счет дополнительного маневрирования КАН (20 м/с и 10 м/с), что является допусти-

мым решением (запас характеристической скорости КАН, отводимый на маневрирование с целью увеличения эффективности системы составляет 200 м/с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод планирования применения ОС МКО позволяет определить распределение обслуживаемых ОО, учесть возможности по маневрированию КАН с целью создания благоприятных условий для последующей автономной работы АМО и увеличения эффективности применения всей системы в целом.

Практическая ценность предложенного подхода заключается в том, что его применение позволяет находить оптимальное решение за допустимое время, сократить потери на распределение ресурсов при простое и движении АМО с целью расширения функциональных возможностей и эффективности применения ОС МКО в целом.

Список используемых источников

1. *Вентцель Е.С.* Введение в исследование операций. – М.: Сов. радио, 1964. – 391 с.
2. *Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б.* Задачи линейного программирования транспортного типа. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
3. *Никифоров В.В.* Логистика. Транспорт и склад в цепи поставок. – М.: ГроссМедиа, 2008. – 192 с.
4. *Сток Д.Р., Ламберт Д.М.* Стратегическое управление логистикой. – М.: Инфра-М, 2005. – 830 с.
5. *Горбулин В.И., Котьяшов Е.В., Куваев О.Л.* Подход к планированию транспортной операции по уводу объектов космического мусора с геостационарной орбиты // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 9. – С. 358–370.
6. *Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г.* Основы механики космического полета. – М.: Наука, 1990. – 445 с.
7. *Бердышев Ю.И.* Нелинейные задачи последовательного управления и их приближение: моногр. – Е.: УрО РАН, 2015. – 193 с.
8. *Бурдаев М.Н.* Теория годографов в механике космического полета. – М.: Машиностроение, 1975. – 152 с.
9. *Микони С.В.* Теория и практика рационального выбора.: моногр. – М.: Маршрут, 2004. – 463 с.
10. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
11. *Бауэрсокс Д. Дж., Клосс Д. Дж.* Логистика: интегрированная цепь поставок. – 2-е изд. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2008. – 640 с.
12. *Дюран Б., Оддел П.* Кластерный анализ. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
13. *Триус Е.Б.* Задачи математического программирования транспортного типа. – М.: Сов. радио, 1967. – 208 с.
14. *Москвин Б.В.* Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 383 с.

Е.С. Абазина,

кандидат техн. наук;

А.В. Бусыгин

Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург;

С.М. Одоевский,

доктор техн. наук, профессор

Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ ВИДЕОТРАФИКА В ПЕРСПЕКТИВНОЙ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлен подход к обоснованию требований к пропускной способности канала связи для передачи видеотрафика за счет учета степени его самоподобия в интересах обеспечения требуемого качества обслуживания в перспективных мультисервисных сетях специального назначения.

Ключевые слова: видеотрафик, самоподобный трафик, качество обслуживания.

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением развития системы связи Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) как части инфраструктуры системы военного управления является переход к более совершенной форме ее построения и функционирования на основе внедрения передовых телекоммуникационных технологий. Создаваемая перспективная объединенная автоматизированная цифровая сеть связи ВС РФ ориентирована на передачу мультисервисной информации в интересах обеспечения процессов управления войсками и оружием. Анализ трафика, циркулирующего в подобных мультисервисных сетях специального назначения (МСС СН), показал, что доля видеоданных, в том числе потокового видео, в общем объеме передаваемой информации составляет 40–60% и имеет тенденцию роста.

Исследования видеотрафика последних десятилетий [1–3] позволили выделить такие его особенности, как пульсации и самоподобие, или фрактальность. Пульсирующий характер выражается в резком возрастании скорости передачи видеоданных, значительно отличающейся от средней скорости потока, что наблюдается при увеличении динамики сцен видеоряда: движение, взрывы, частая смена фона и т. д. Самоподобие (фрактальность) процесса передачи видеоданных неформально можно определить как случайный процесс, статистические характеристики которого проявляют свойства масштабирования. Самоподобный трафик существенно не меняет своего вида при рассмотрении в различных масштабах по шкале времени (рис. 1) [3]. При этом в отличие от трафика, не обладающего фрактальными свойствами, не происходит быстрого «сглаживания» пульсаций при усреднении по шкале времени.

Для передачи видеопотока по магистральным каналам связи существующих МСС СН осуществляется резервирование пропускной способности, соответствующей средней скорости передачи видеотрафика. При появлении пульсаций вследствие самоподобия потока видеоданных возникает проблемная ситуация, заключающаяся в нарушении требований, предъявляемых к качеству обслуживания (QoS), оцениваемому такими показателями, как средняя задержка пакетов τ , вариация задержек σ , вероятность потерь $p_{пот}$ и вероятность искажений пакетов $p_{ош}$ [4].

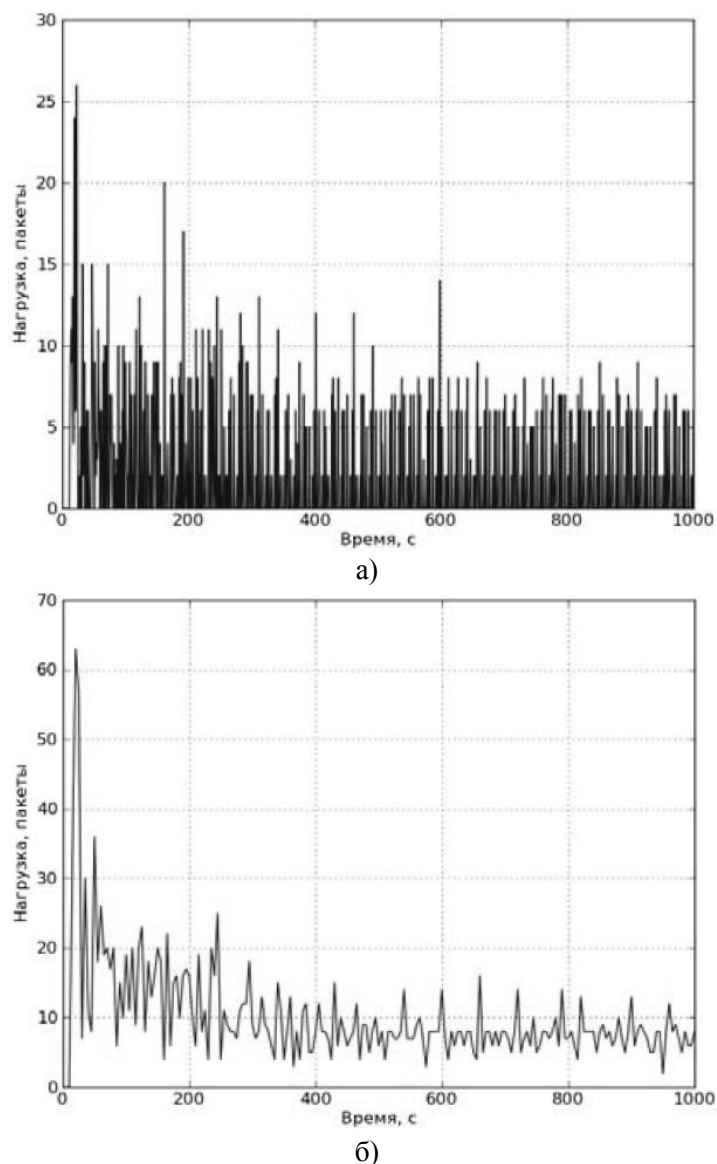


Рис. 1. Временная диаграмма агрегированного самоподобного трафика с разным временем усреднения – 1 с (а) и 5 с (б)

Для разрешения указанной проблемной ситуации необходимо подходить к обоснованию требований к пропускной способности каналов связи для передачи видеотрафика с учетом степени его самоподобия в интересах обеспечения требуемого качества обслуживания в перспективных мультисервисных сетях специального назначения.

ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОТРАФИКА С УЧЕТОМ СТЕПЕНИ ЕГО САМОПОДОБИЯ

Наиболее удобным показателем QoS для потокового видео реального времени является среднее время задержки пакетов τ , связанное с другими показателями качества, приведенными выше, монотонными зависимостями, что позволяет свести требования к нескольким разным показателям к требуемому значению одного этого показателя [5, 6].

В настоящей работе под *каналом связи* понимается магистральный канал передачи видеотрафика, связывающий два пограничных коммутационных устройства (КУ) МСС СН. Пропускная способность (требования к которой и надо обосновать) данного канала связи характеризуется интенсивностью обслуживания μ . Среднее время задержки пакетов τ (требования к которому считаются заданными) при обслуживании в КУ складывается из среднего времени ожидания $\tau_{ож}$ и среднего времени обслуживания $\tau_{об}$. Оба эти слагаемых времени задержки зависят от пропускной способности магистрального канала передачи видеотрафика μ , отмеченной выше. Время обслуживания $\tau_{об}$ является обратной величиной пропускной способности: $\tau_{об} = 1/\mu$. Зависимость времени ожидания $\tau_{ож}$ от пропускной способности μ является более сложной и определяется статистическими характеристиками видеотрафика и времени обслуживания, а также параметрами используемых в КУ механизмов обслуживания трафика (дисциплин обслуживания очереди).

Основной статистической характеристикой пуассоновского трафика является его интенсивность λ . Для учета самоподобных свойств видеотрафика дополнительно необходимо знать степень его самоподобия, в роли которой обычно используется показатель Херста H [1–3]. Такой показатель может принимать значения в интервале от 0,5 (минимальная степень самоподобия или фактически его отсутствие) до 1 (максимальная степень самоподобия, которая на практике не встречается). В настоящей работе оба параметра трафика λ и H считаются заданными. На практике они могут быть известны на основании ожидаемых (планируемых, моделируемых) характеристик входного трафика или могут оцениваться по результатам наблюдений (измерений) [1, 2]. При планируемом обслуживании видеотрафика можно задаваться наиболее часто встречающимся типовым значением $H \approx 0,7$ [3].

Кроме отмеченных основных статистических характеристик видеотрафика λ и H на вид зависимости времени ожидания $\tau_{ож}$ и, соответственно, времени задержки τ от пропускной способности μ существенно влияет вид распределений вероятностей, описывающих входной и выходной трафика (время обслуживания). В существующих МСС СН при резервировании пропускной способности магистрального канала передачи видеотрафика распределение времени обслуживания считается детерминированным ($D - Deterministic$) или распределенным по экспоненциальному закону (характерному для пуассоновского или марковского случайного процесса $M - Markovian$).

В качестве модели входного самоподобного трафика часто используется модель фрактального броуновского движения *fbm* (англ. *fractal brownian motion*), с помощью которой в работе [6] удалось получить аналитические выражения для расчета средней длины очереди L в системах массового обслуживания (СМО) типа *fbm/D/1* и *fbm/M/1*, дополненные производными аналитическими выражениями в [5–10] для расчета относительного времени ожидания и относительной задержки. Популярными также являются модели входного самоподобного трафика на основе распределений Парето ($P - Pareto$) и Вейбулла ($W - Weibull$) [6, 8, 11,12]. Однако точные аналитические зависимости средней длины очереди L или среднего времени ожидания $\tau_{ож}$ или средней задержки τ от интенсивности обслуживания μ и параметров входного трафика λ и H неизвестны. Хотя есть приближенные формулы, являющиеся аппроксимацией результатов, полученных при имитационном моделировании [13–16], или основанные на модификациях зависимостей, используемых для других СМО [9].

На основе имеющейся зависимости среднего времени задержки τ от интенсивности обслуживания μ , интенсивности входного самоподобного видеотрафика λ и его показателя Херста H можно подобрать такое минимальное требуемое значение пропускной способности $\mu_{тр}$, при котором рассчитанное значение времени задержки τ будет не более допустимой величины $\tau_{тр}$. Найденное значение $\mu_{тр}$ и будет результатом решения задачи обоснования требу-

емой пропускной способности канала связи для передачи видеотрафика с учетом его интенсивности λ и показателя Херста H .

ПРИМЕР ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОТРАФИКА

Для демонстрации предлагаемого подхода к обоснованию требуемой пропускной способности канала связи для передачи видеотрафика можно привести пример графоаналитического решения данной задачи для случая, когда процесс обслуживания видеотрафика в устройстве коммутации МСС СН представляется моделью СМО $fbm/M/1$. Для такой модели известна аналитическая зависимость $\tau_{ож}(\rho, H)$ [5, 6], где ρ – нагрузка, равная отношению λ/μ . Эту зависимость для среднего времени ожидания $\tau_{ож}$ можно преобразовать в зависимость для средней задержки $\tau(\rho, H) = \tau_{ож}(\rho, H) + \tau_{об} = \tau_{ож}(\rho, H) + 1/\mu$. С целью большей общности результатов (для разных исходных данных) можно представить среднюю задержку τ в нормированном виде $q = \tau/\tau_{вх}$ относительно среднего периода следования входных пакетов $\tau_{вх} = 1/\lambda$. Это позволит в качестве аргумента зависимости $q(\rho^{-1}, H)$ рассматривать величину $\rho^{-1} = \mu/\lambda$ (обратную нагрузке ρ), прямо пропорциональную пропускной способности μ :

$$q = \frac{(1/\rho^{-1})^{2-2H}}{\rho^{-1}(1-1/\rho^{-1})^{1-H}} + \frac{1}{\rho^{-1}} = \frac{(\lambda/\mu)^{2-2H}}{\mu/\lambda(1-\lambda/\mu)^{1-H}} + \frac{\lambda}{\mu}. \quad (1)$$

При значении параметра Херста $H = 0,5$ зависимость (1) вырождается в формулу расчета нормированной задержки в СМО $M/M/1$:

$$q = \frac{1}{\rho^{-1}-1} = \frac{\lambda}{\mu-\lambda}. \quad (2)$$

Задача обоснования требуемой относительной пропускной способности $\mu_{тр}/\lambda = \rho^{-1}_{тр}$ канала связи при заданной допустимой относительной задержке $\tau_{тр}/\tau_{вх} = \tau_{тр} \cdot \lambda = q_{тр}$ является обратной по отношению к задаче вычисления относительной средней задержки $q = \tau/\tau_{вх}$ при заданной относительной пропускной способности $\mu/\lambda = \rho^{-1}$ по формулам (1) и (2). Однако в аналитическом виде простую формулу для решения обратной задачи удается получить только из выражения (2), т. е. только для вырожденного самоподобного (фактически пуассоновского) трафика при $H=0,5$:

$$\rho_{тр}^{-1} = \frac{\mu_{тр}}{\lambda} = \frac{1}{q_{тр}} + 1 = \frac{\tau_{вх}}{\tau_{тр}} + 1 = \frac{1}{\lambda\tau_{тр}} + 1 \pm. \quad (3)$$

Представленная аналитическая зависимость (3) позволяет рассчитать нижнюю граничную оценку $\mu_{тр}/\lambda$ при резервировании пропускной способности магистрального канала передачи видеотрафика МСС СН.

Для обоснования требуемой пропускной способности при заданной допустимой задержке с учетом степени самоподобия входного трафика по показателю Херста, превышающему значение 0,5, можно построить графические зависимости относительного

среднего времени задержки $q = \tau/\tau_{\text{вх}}$ от относительной пропускной способности $\rho^{-1} = \mu/\lambda$, рассчитанные по формуле (1). На рис. 2 представлены полученные результаты для экспоненциального распределения входного трафика при значении параметра Херста $H = 0,5$ и для самоподобного агрегированного видеотрафика со значениями параметра Херста $H = 0,7$ и $H = 0,8$.

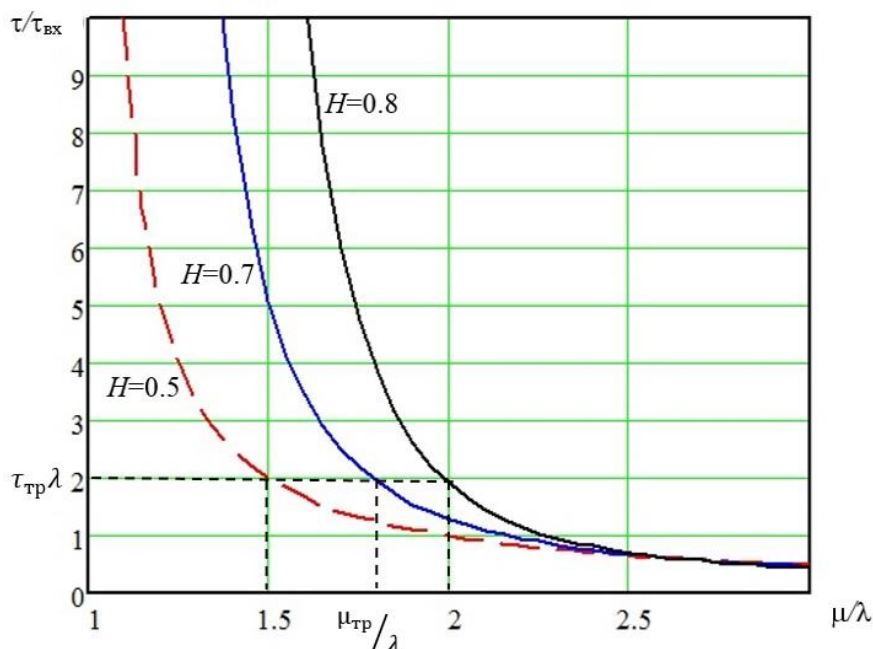


Рис. 2. Зависимости относительного среднего времени задержки $q = \tau/\tau_{\text{вх}}$ от относительной пропускной способности при разной степени самоподобия видеотрафика

Анализ графических зависимостей относительного среднего времени задержки от относительной пропускной способности позволяет определить необходимую относительную пропускную способность канала связи для видеотрафика с допустимой относительной задержкой $q_{\text{тр}} = \tau_{\text{тр}}/\tau_{\text{вх}} = \tau_{\text{тр}}\lambda = 2$ при разных значениях параметра Херста. Как видно из графиков на рис. 2, для самоподобного видеотрафика с параметром Херста $H = 0,8$ требуется пропускная способность $\mu_{\text{тр}}$, в 2 раза превышающая интенсивность входного трафика λ , в то время как для пуассоновского распределения входного трафика было бы принято решение о резервировании пропускной способности канала, превышающей интенсивностью видеотрафика лишь в 1,5 раза.

Представленные результаты свидетельствуют о необходимости резервирования пропускной способности канала передачи видеоданных в перспективных МСС СН с учетом контролируемой степени самоподобия видеотрафика по показателю Херста с целью обеспечения требуемого качества обслуживания видеотрафика между должностными лицами ВС РФ в процессе управления войсками и оружием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективным направлением совершенствования и развития сетей связи специального назначения является разработка сетей, ориентированных на передачу мультимедийной информации. Один из наиболее значимых вопросов, требующих решения при проектировании мультисервисных сетей, – это вопрос обеспечения заданного качества обслуживания, свя-

занный с учетом статистических характеристик трафика, создаваемого в данных сетях потоком вызовов и сообщений различных видов.

Значительную часть мультимедийной информации в сетях специального назначения составляют видеоданные, характеризующиеся свойством самоподобия. Подход к моделированию обслуживания видеотрафика в сетевом коммутационном устройстве как пуассоновского процесса приводит к ошибкам в прогнозах и недооценке реальной нагрузки в мультисервисных сетях. Учет свойств самоподобия видеотрафика позволяет более корректно обосновать требования к перспективным мультисервисным сетям связи специального назначения на основании заданных требований к качеству обслуживания

Список используемых источников

1. Шелухин О.И., Тенякиев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. – М.: Радиотехника, 2003. – 480 с.
2. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
3. Маколкина М.А., Прокопьев А.В. Зависимость параметра Херста от потерь при исследовании видеотрафика // 69-я научно-техническая конференция СПб НТОРЭС имени А.С. Попова: сб. тез. докл. – СПб., 2013.
4. Recommendation ITU-T Y.1541. Network Performance Objectives for IP Based Services. – Geneva, 2011.
5. Одоевский С.М., Хоборова В.П. Методы прогнозирования качества обслуживания самоподобного трафика в устройствах коммутации мультисервисной сети // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 3. – С.86–92.
6. Новиков Е.А., Зиннуров С.Х. Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов в земной станции спутниковой связи // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 1. – С. 98–115.
7. Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1995. – 13: 953-962.
8. Ковальский А.А., Митряев Г.А. Алгоритм и методика оперативного планирования и распределения радиоресурса системы спутниковой связи для организации устойчивого управления орбитальной группировкой космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – № 666. – С. 68–76.
9. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.
10. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
11. Лосев Ю.И., Руккас К.М. Анализ моделей вероятности потери пакетов в буфере маршрутизатора с учетом фрактальности трафика // Вестник ХНУРЭ. Сер. Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления. – Харьков: ХНУРЭ. – 2008. – № 833. – С. 163–169.
12. Ложковский А.Г., Вербанов О.В. Моделирование трафика мультисервисных пакетных сетей с оценкой его коэффициента самоподобности // Научные труды ОНАС имени А.С. Попова. – 2008. – № 1. – С. 57–62.
13. Ушанев К.В., Макаренко С.И. Показатели своевременности обслуживания трафика в системе массового обслуживания Ра/М/1 на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 1. – С. 42–65.

14. Оценка своевременности связи при передаче мультисервисного трафика в сети спутниковой связи специального назначения / Е.А. Новиков, Д.Р. Уткин, А.Г. Шадрин, М.Н. Квасов // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – №1 С. – 136–155.

15. Митряев Г.А., Новиков Е.А., Уткин Д.Р. Модель прогнозирования пользовательской нагрузки в обратном канале сети спутниковой связи на основе вейвлет-преобразования // Труды II межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях»: сб. – СПб., 2017. – С. 140–143.

16. Бусыгин А.В., Калюка В.И., Одоевский С.М. Аппроксимация статистических характеристик процесса обслуживания мультимедийного трафика на основе распределения Парето // Сборник научных статей XVI Международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии и системы». – Пенза, 2019. – С. 256–260.

С.Н. Агиевич*,
доктор техн. наук,
старший научный сотрудник;
Р.Д. Галл*,
А.Х. Кельян*,
кандидат техн. наук;
В.Е. Коновалов,
кандидат военных наук
Главный штаб ВМФ, г. Санкт-Петербург;
С.Г. Потапов*,
кандидат техн. наук,
старший научный сотрудник
*ООО НПП «НТТ», г. Санкт-Петербург

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАДИОМОНИТОРИНГА

В статье рассмотрены вопросы радиомониторинга наземных и морских источников радиоизлучений с помощью спутников-ретрансляторов, расположенных на геостационарной орбите. Определены основы технологии радиомониторинга и главные задачи, которые могут решаться в интересах контроля радиоэлектронной обстановки на морских направлениях. Предложены принципы обработки информации, полученной с помощью спутников-ретрансляторов.

Ключевые слова: радиомониторинг, спутник-ретранслятор, определение местоположения источников радиоизлучений, контроль радиоэлектронной обстановки.

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения местоположения (ОМП) наземных и морских источников радиоизлучений (ИРИ), как задача радиомониторинга, решается в том числе в интересах обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и контроля радиоэлектронной обстановки на морских направлениях.

Существует возможность решения задач радиомониторинга с использованием спутников-ретрансляторов (СР), находящихся на геостационарной орбите (ГСО), а также опорных наземных станций активной подсветки, местоположение которых заранее известно.

Например, в США разработана и действует глобальная система (двойного назначения) геопозиционирования через спутники ГСО SATID фирмы RT LOGIC, которая обеспечивает геопозиционирование объектов через СР на ГСО. Американцы также заявляют о создании глобальной системы геопозиционирования через выведенные на орбиту низкоорбитальные КА HawkEye360 [10].

В настоящей статье рассматриваются основные принципы использования геостационарных СР для ОМП ИРИ, сигналы которых ретранслируются СР, расположенными на ГСО, а также основные особенности ОМП наземных и морских ИРИ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ И МОРСКИХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ

В настоящее время на геостационарной орбите расположено большое число СР, осуществляющих ретрансляцию сигналов земных станций спутниковых систем связи (ССС). Каждый из геостационарных СР характеризуется определенным набором зон обзора (вещания) – областями на поверхности Земли, соответствующими диаграмме направленности (ДН) антенны данного СР. Кроме того, каждый СР характеризуется определенным частотным планом – диапазоном частот, принимаемых данным СР, и частотным сносом между Uplink-каналом и Downlink-каналом (между каналом «Земля – СР» и каналом «СР – Земля»).

В современных условиях развития систем и средств спутниковой связи, радионавигации и радиолокации ОМП наземных и морских ИРИ с использованием СР может быть применено для решения следующих задач радиомониторинга:

- поиска и ОМП наземных и морских источников непреднамеренных и преднамеренных помех;
- поиска и ОМП наземных и морских радиоэлектронных средств, нелегально использующих ресурс СР ССС;
- обнаружения, ОМП и установления фактов выхода в эфир радиоэлектронных средств, скрывающих свое местоположение и нарушающих частотный план;
- обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, работающих в близких выделенных частотных диапазонах.

Фрагмент частотного плана земных станций ССС, работающих через СР на ГСО, источников радиоизлучений представлен на рис. 1. Геостационарные СР ССС осуществляют прием сигналов в следующих диапазонах частот: ОВЧ/УВЧ: 280–400 МГц, L-диапазон, S-диапазон, C-диапазон: 5,725–6,725 ГГц, X-диапазон: 7,9–8,4 ГГц, Low-Ku-диапазон: 12,75–13,5 ГГц, Ku-диапазон: 13,75–14,5 ГГц, Ka-диапазон: 27,5–31 ГГц.

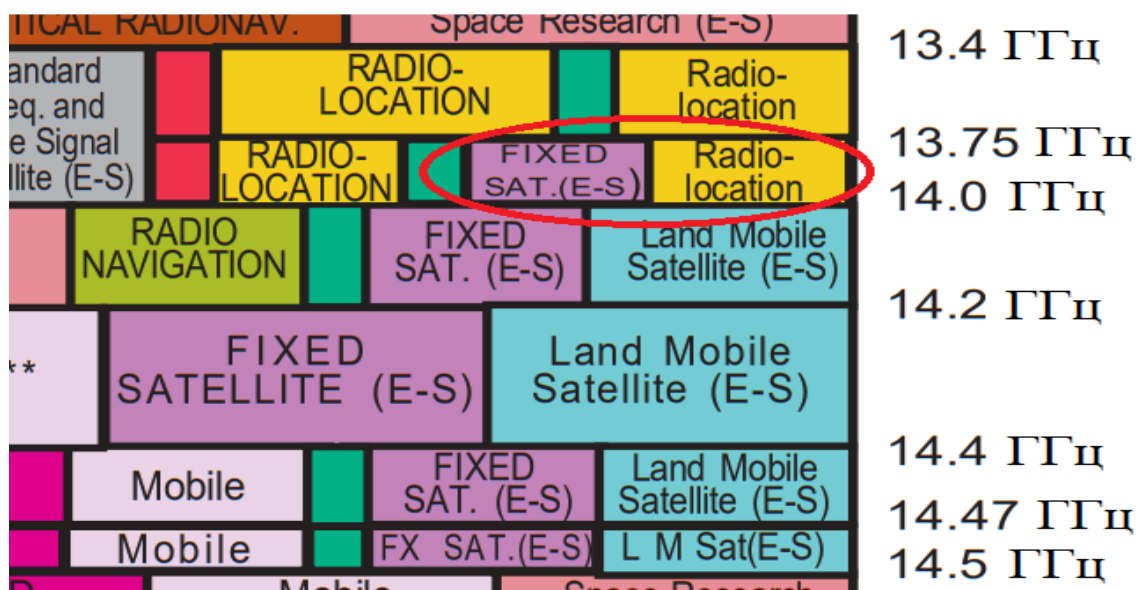


Рис. 1. Распределение диапазонов частот в Ku-диапазоне

Основу технологии ОМП источников радиоизлучений (ИРИ) с использованием геостационарных СР составляют следующие положения:

- наличие паразитного излучения сигнала ИРИ за счет боковых лепестков ДН их антенн;
- наличие большого количества СР на ГСО, что позволяет сформировать измерительную базу для ОМП ИРИ;
- неидеальность синхронных орбит, в том числе геостационарной, в силу чего образуется доплеровское смещение частоты.

Сигнал от ИРИ вследствие наличия боковых лепестков ДН антенны ретранслируется через несколько СР, расположенных на ГСО. На многопозиционной пассивной радиотехнической станции дальнего обнаружения (МПРТС ДО) могут быть измерены разность прихода сигналов через разные СР и разница доплеровских смещений их частоты. По результатам измерений указанных параметров строятся линии положения, пересечение которых указывает местоположение ИРИ. Для повышения точности ОМП ИРИ используют опорные станции активной подсветки, местоположение которых заранее известно.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ И МОРСКИХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ

При радиомониторинге наземных и морских радиоэлектронных средств с использованием геостационарных СР могут применяться следующие основные методы ОМП ИРИ:

- метод, основанный на измерении временных задержек (метод TDOA, от англ. *TimeDifferenceofArrival*, временная разность прибытия);
- метод, основанный на измерении разности доплеровских сдвигов частоты (метод FDOA, от англ. *FrequencyDifferenceofArrival*, частотная разность прибытия).

Рассмотрим метод TDOA. Принцип ОМП ИРИ с использованием данного метода поясняется рис. 2. На рисунке показаны: ИРИ, по которым производится радиомониторинг; МПРТС ДО – многопозиционная пассивная радиотехническая станция дальнего обнаружения, осуществляющая радиомониторинг; КА-1, КА-2 – СР, с помощью которых осуществляется радиомониторинг; $\vec{R}_{ИРИ-КА1}$, $\vec{R}_{ИРИ-КА2}$, $\vec{R}_{КА1-МПРТС\ ДО}$, $\vec{R}_{КА2-МПРТС\ ДО}$ – вектора, соединяющие ИРИ и КА-1, ИРИ и КА-2, КА-1 и МПРТС ДО, КА-2 и МПРТС ДО соответственно.

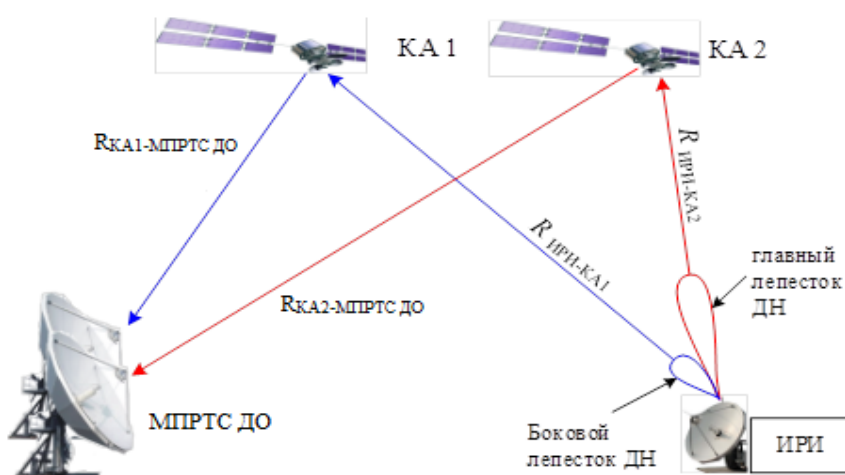


Рис. 2. Схема построения линии положения по методу TDOA

Основу метода TDOA в рамках решения задачи ОМП ИРИ составляет определение соответствующего набора координат возможного расположения ИРИ (линии положения TDOA) на поверхности Земли, соответствующей разнице во времени Δt прихода сигналов, принятых

с разных направлений: $R_{\text{ИРИ-КА2}} \rightarrow R_{\text{КА2-МПРТС ДО}}$ – основное излучение; $R_{\text{ИРИ-КА1}} \rightarrow R_{\text{КА1-МПРТС ДО}}$ – побочное излучение; $R_{\text{ИРИ-КА2}}$ и $R_{\text{КА2-МПРТС ДО}}$ – расстояния от ИРИ до КА-2 и от КА-2 до МПРТС ДО соответственно. При этом действительная разность во времени прихода $\Delta\tau$ прямо пропорциональна разнице расстояний между направлениями основного и побочного излучений

$$\Delta\tau = \frac{\left(R_{\text{ИРИ-КА2}} + R_{\text{КА2-МПРТС ДО}}\right) - \left(R_{\text{ИРИ-КА1}} + R_{\text{КА1-МПРТС ДО}}\right)}{c}, \quad (1)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Анализ источников [1–5] показал, что по существу определение линии положения TDOA сводится к решению последовательности оптимизационных задач при изменяющейся координате $z \in [z_{\max, \min}]$ по отысканию экстремума целевой функции невязки от двух недостающих аргументов x, y для получения линии в пространстве с учетом нелинейного ограничения, определяющего условие расположения ИРИ на поверхности Земли,

$$f_{TDOA}(x, y) = \left[\left[\left(R_{\text{ИРИ-КА2}}(x, y, z) + R_{\text{КА2-МПРТС ДО}} \right) - \left(R_{\text{ИРИ-КА1}}(x, y, z) + R_{\text{КА1-МПРТС ДО}} \right) - c \cdot \Delta\tau \right]^2 \right] \rightarrow \min_{x, y \in \mathbb{R}}, \quad (2)$$

При этом форма Земли аппроксимируется референц-эллипсоидом вида

$$\left(\frac{x}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{y}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{z \cdot \sqrt{1 - e_z^2}}{R_e} \right)^2 - 1 = 0, \quad (3)$$

где R_e – величина экваториального радиуса Земли,

$$R_e \approx 6378,13434 \text{ км};$$

e_z – эксцентриситет земного эллипсоида,

$$e_z = 0,08181913245.$$

Дальности $R_{\text{ИРИ-КА2}}(x, y, z)$ и $R_{\text{ИРИ-КА1}}(x, y, z)$ в выражении (2) задаются по правилу определения прямой между двумя соответствующими точками в прямоугольной системе координат:

$$R_{\text{ИРИ-КА2}}(x, y, z) = \sqrt{(x - x_{\text{КА2}})^2 + (y - y_{\text{КА2}})^2 + (z - z_{\text{КА2}})^2}, \quad (4)$$

Решение представленной оптимизационной задачи (2) с учетом ограничений (3) на практике, как правило, выполняется с применением численных градиентных релаксационных методов [6]. Решение условной оптимизационной задачи (2) с учетом ограничения (3) в виде равенства с применением метода множителей Лагранжа осуществляется путем введения в целевой функционал дополнительной переменной μ . С учетом этого итоговая функция Лагранжа запишется в виде

$$L_{TDOA}(x, y, \mu) = f_{TDOA}(x, y) + \mu \cdot \left[\left(\frac{x}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{y}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{z \cdot \sqrt{1 - e_z^2}}{R_e} \right)^2 - 1 \right] \rightarrow \min_{x, y, \mu \in \mathbb{R}}. \quad (5)$$

Отыскание оптимума сформированной задачи (5) осуществляется путем численного решения системы нелинейных уравнений вида

$$\begin{cases} \frac{\partial L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial \mu} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $\frac{\partial L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial x}$, $\frac{\partial L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial y}$, $\frac{\partial L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial \mu}$ – аналитические дифференциалы сформированной функции Лагранжа.

Решение системы нелинейных уравнений (6) согласно работе [6] наиболее эффективно осуществляется с применением метода Ньютона – Рафсона, стратегия которого заключается в итерационном построении последовательности точек $\{x^k, y^k, \mu^k\}$, $k = 0, 1, \dots$, таких, что $L_{TDOA}(x^{k+1}, y^{k+1}, \mu^{k+1}) < L_{TDOA}(x^k, y^k, \mu^k)$. При этом правило вычисления указанных точек последовательности $\{x^k, y^k, \mu^k\}$, $k = 0, 1, \dots$ приведено в работе [7].

В свою очередь, решение одномерной безусловной экстремальной задачи на каждой итерации производится гибридным оптимизационным методом нулевого порядка, представляющим собой комбинацию методов Фибоначчи и квадратичной интерполяции. Реализация указанного метода на основе матрицы Гессе $J_{TDOA}(x, y, \mu)$ приводится в работе [7]. При этом матрица Гессе представляется в виде

$$J_{TDOA}(x, y, \mu) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial x \partial \mu} \\ \frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial y \partial \mu} \\ \frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial \mu \partial x} & \frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial \mu \partial y} & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Матрица (7) является симметричной и включает в себя дифференциалы второго порядка функции Лагранжа: $\frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial y^2}$, $\frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial x \partial y}$, $\frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial x \partial \mu}$, $\frac{\partial^2 L_{TDOA}(x, y, \mu)}{\partial y \partial \mu}$. Построение последовательности $\{x^k, y^k, \mu^k\}$ заканчивается при выполнении условия $|L_{TDOA}(x^k, y^k, \mu^k)| \leq \varepsilon_1$, где ε_1 – малое положительное число, определяющее погрешность вычисления искомых координат кривой TDOA.

Зависимость точности вычисления координаты кривой TDOA от погрешности численного решения ε_1 представлена на рис. 3.

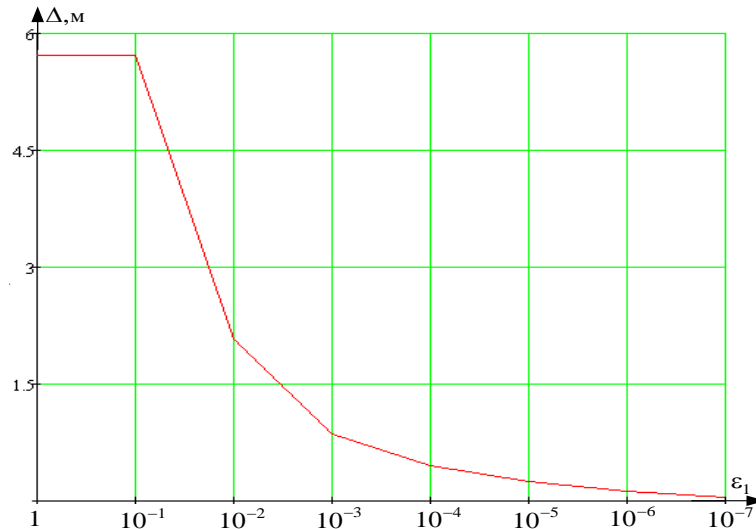


Рис. 3. Зависимость точности вычисления координаты кривой TDOA от задаваемой погрешности численного решения ϵ_1

Рассмотрим метод FDOA. Принцип ОМП ИРИ с использованием данного метода поясняется рис. 4. На рисунке показаны: ИРИ, по которым производится радиомониторинг; МПРТС ДО – многопозиционная пассивная радиотехническая станция дальнего обнаружения, осуществляющая радиомониторинг; КА-1, КА-2 – СР, с помощью которых осуществляется радиомониторинг; $\vec{V}_{КА1}$ и $\vec{V}_{КА2}$ – вектора скорости КА-1 и КА-2 соответственно; $\vec{R}_{ИРИ-КА1}$, $\vec{R}_{ИРИ-КА2}$, $\vec{R}_{КА1-МПРТС\ ДО}$, $\vec{R}_{КА2-МПРТС\ ДО}$ – вектора, соединяющие ИРИ и КА-1, ИРИ и КА-2, КА-1 и МПРТС ДО, КА-2 и МПРТС ДО соответственно.

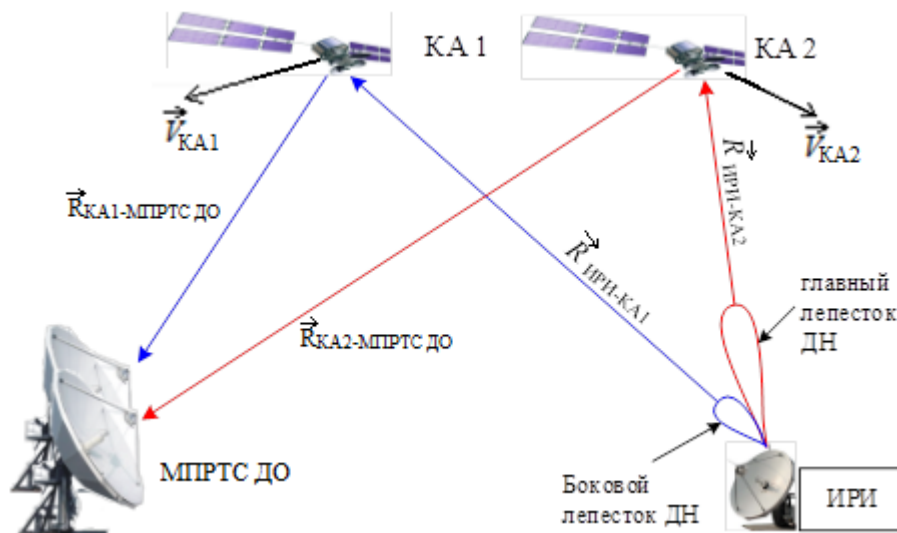


Рис. 4. Схема построения линии положения по методу FDOA

Для реализации метода FDOA помимо координат СР и МПРТС ДО должны быть известны вектора скорости СР, несущая частота ИРИ f_0 и значение переноса частоты транспондеров СР между линиями «вверх» и «вниз» $\Delta f_{КА}$.

Основу метода FDOA в рамках решения задачи ОМП ИРИ составляет определение соответствующего набора координат возможного расположения ИРИ (линии положения FDOA) на поверхности Земли, полученной в результате решения последовательности оптимизаци-

онных задач, заключающихся в поиске минимума целевой функции невязки от двух аргументов (x, y) при фиксированном значении параметра z из заданного диапазона $z \in [z_{\min}, z_{\max}]$, где (x, y, z) – координаты ИРИ в декартовой системе:

$$f_{FDOA}(x, y) = \left[\left(V_{КА2-ИРИ}^R(x, y, z) + V_{КА2-МПРТС\ ДО}^R - V_{КА1-ИРИ}^R(x, y, z) - V_{КА1-МПРТС\ ДО}^R \right) \cdot \frac{f_0}{c} + \left(V_{КА2-МПРТС\ ДО}^R - V_{КА1-МПРТС\ ДО}^R \right) \cdot \frac{\Delta f_{КА}}{c} - \Delta f_{2-1} \right]^2 \rightarrow. \quad (8)$$

$\min_{x, y \in \mathbb{R}}$

В формуле $V_{КА1-ИРИ}^R = \frac{\langle \vec{V}_{КА1}, \vec{R}_{КА1-ИРИ} \rangle}{R_{КА1-ИРИ}}$, $V_{КА1-МПРТС\ ДО}^R = \frac{\langle \vec{V}_{КА1}, \vec{R}_{КА1-МПРТС\ ДО} \rangle}{R_{КА1-МПРТС\ ДО}}$, $V_{КА2-ИРИ}^R = \frac{\langle \vec{V}_{КА2}, \vec{R}_{КА2-ИРИ} \rangle}{R_{КА2-ИРИ}}$,

$V_{КА2-МПРТС\ ДО}^R = \frac{\langle \vec{V}_{КА2}, \vec{R}_{КА2-МПРТС\ ДО} \rangle}{R_{КА2-МПРТС\ ДО}}$, а оператор $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ – скалярное произведение векторов;

Δf_{2-1} – разность значений изменений частоты, вызванных эффектом Доплера (разность доплеровских частот сигнала ИРИ, ретранслированного СР2 и СР1). При этом имеет место нелинейное ограничение вида (3), определяющее условие нахождения ИРИ на поверхности Земли.

Указанная оптимизационная задача решается по описанному выше методу множителей Лагранжа. Функция Лагранжа в данном случае имеет вид

$$F_{FDOA}(x, y, \lambda) = f_{FDOA}(x, y) + \lambda \cdot \left(\left(\frac{x}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{y}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{z \cdot \sqrt{1 - e_z^2}}{R_e} \right)^2 - 1 \right). \quad (9)$$

Минимум целевой функции невязки достигается при значениях (x, y) , являющихся решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial \lambda} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\frac{\partial F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial x} = 2 \cdot \left[\left(V_{КА2-ИРИ}^R(x, y, z) + V_{КА2-МПРТС\ ДО}^R - V_{КА1-ИРИ}^R(x, y, z) - V_{КА1-МПРТС\ ДО}^R \right) \cdot \frac{f_0}{c} + \left(V_{КА2-МПРТС\ ДО}^R - V_{КА1-МПРТС\ ДО}^R \right) \cdot \frac{\Delta f_{КА}}{c} - \Delta f_{2-1} \right] \times \left(\frac{\partial V_{КА2-ИРИ}^R(x, y, z)}{\partial x} - \frac{\partial V_{КА1-ИРИ}^R(x, y, z)}{\partial x} \right) \cdot \frac{f_0}{c} + 2 \cdot x \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{R_e} \right)^2;$$

$$\frac{\partial F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial y} = 2 \cdot \left(\left(V_{КА2-ИРИ}^R(x, y, z) + V_{КА2-МПРТС\ ДО}^R - V_{КА1-ИРИ}^R(x, y, z) - V_{КА1-МПРТС\ ДО}^R \right) \cdot \frac{f_0}{c} + \right. \\ \left. + \left(V_{КА2-МПРТС\ ДО}^R - V_{КА1-МПРТС\ ДО}^R \right) \cdot \frac{\Delta f_{КА}}{c} - \Delta f_{2-1} \right) \times \\ \times \left(\frac{\partial V_{КА2-ИРИ}^R(x, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial V_{КА1-ИРИ}^R(x, y, z)}{\partial y} \right) \cdot \frac{f_0}{c} + 2 \cdot y \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{R_e} \right)^2; \\ \frac{\partial F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial \lambda} = \left(\frac{x}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{y}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{z \cdot \sqrt{1 - e_z^2}}{R_e} \right)^2 - 1.$$

Аналогично описанному выше методу TDOA представленную систему нелинейных уравнений целесообразно решать по методу Ньютона – Рафсона. Здесь Матрица Гессе функции Лагранжа имеет вид

$$H_{TDOA}(x, y, \lambda) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial x \partial \lambda} \\ \frac{\partial^2 F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial y \partial \lambda} \\ \frac{\partial^2 F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial \lambda \partial x} & \frac{\partial^2 F_{FDOA}(x, y, \lambda)}{\partial \lambda \partial y} & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Итеративный поиск координат (x_k, y_k, λ_k) завершается при выполнении условия $|F_{FDOA}(x_k, y_k, \lambda_k)| \leq \varepsilon$, где заданное число ε определяет точность нахождения линии положения FDOA.

Для вычисления координат ИРИ (x, y, z) используются как методы, заключающиеся в нахождении пересечения линий положения одного типа (TDOA-TDOA, FDOA-FDOA), так и методы, заключающиеся в нахождении пересечения линий положения разного типа (TDOA-FDOA). При этом для вычисления координат ИРИ методами TDOA-TDOA и FDOA-FDOA требуется наличие трех СР: двух вспомогательных (КА-1 и КА-3) и основного (КА-2). Для вычисления координат ИРИ методом TDOA-FDOA достаточно наличия двух СР: одного вспомогательного (КА-1) и основного (КА-2).

При использовании метода TDOA-TDOA вычисление координат ИРИ сводится к поиску минимума функции невязки:

$$f_{TDOA-TDOA}(x, y, z) = \left(\begin{array}{l} \left[\left(R_{ИРИ-КА2}(x, y, z) + R_{КА2-МПРТС\ ДО} \right) - \right. \\ \left. - \left(R_{ИРИ-КА1}(x, y, z) + R_{КА1-МПРТС\ ДО} \right) - c \cdot \Delta \tau_{2-1} \right]^2 + \\ \left. + \left[\left(R_{ИРИ-КА2}(x, y, z) + R_{КА2-МПРТС\ ДО} \right) - \right. \\ \left. - \left(R_{ИРИ-КА3}(x, y, z) + R_{КА3-МПРТС\ ДО} \right) - c \cdot \Delta \tau_{2-3} \right]^2 \end{array} \right) \rightarrow \min_{x, y, z \in \mathbb{R}}, \quad (12)$$

где $\Delta \tau_{2-3}$ – разность времени прихода сигналов ИРИ в МПРТС ДО от КА-2 и от КА-3. При этом присутствует нелинейное ограничение (3), определяющее условие нахождения ИРИ на поверхности Земли.

При использовании метода FDOA-FDOA вычисление координат ИРИ сводится к поиску минимума функции невязки:

$$f_{FDOA-FDOA}(x, y, z) = \left[\begin{aligned} & \left(V_{КА2-ИРИ}^R(x, y, z) + V_{КА2-МПРТС\ до}^R - V_{КА1-ИРИ}^R(x, y, z) - V_{КА1-МПРТС\ до}^R \right) \cdot \frac{f_0}{c} + \\ & + \left(V_{КА2-МПРТС\ до}^R - V_{КА1-МПРТС\ до}^R \right) \cdot \frac{\Delta f_{КА}}{c} - \Delta f_{2-1} \end{aligned} \right]^2 + \left[\begin{aligned} & \left(V_{КА2-ИРИ}^R(x, y, z) + V_{КА2-МПРТС\ до}^R - V_{КА3-ИРИ}^R(x, y, z) - V_{КА3-МПРТС\ до}^R \right) \cdot \frac{f_0}{c} + \\ & + \left(V_{КА2-МПРТС\ до}^R - V_{КА3-МПРТС\ до}^R \right) \cdot \frac{\Delta f_{КА}}{c} - \Delta f_{2-3} \end{aligned} \right]^2 \rightarrow \min_{x, y, z \in \mathbb{R}} \quad (13)$$

где Δf_{2-3} – разность доплеровских частот сигнала ИРИ, ретранслированного КА-2 и КА-3. При этом присутствует нелинейное ограничение (3), определяющее условие нахождения ИРИ на поверхности Земли.

При использовании метода TDOA-FDOA вычисление координат ИРИ сводится к поиску минимума функции невязки:

$$f_{TDOA-FDOA}(x, y, z) = \left[\begin{aligned} & \left[\left(R_{ИРИ-КА2}(x, y, z) + R_{КА2-МПРТС\ до} \right) - \right. \\ & \left. - \left(R_{ИРИ-КА1}(x, y, z) + R_{КА1-МПРТС\ до} \right) - c \cdot \Delta \tau_{2-1} \right]^2 + \\ & + \left[\left(V_{КА2-ИРИ}^R(x, y, z) + V_{КА2-МПРТС\ до}^R - V_{КА1-ИРИ}^R(x, y, z) - V_{КА1-МПРТС\ до}^R \right) \cdot \frac{f_0}{c} + \right. \\ & \left. + \left(V_{КА2-МПРТС\ до}^R - V_{КА1-МПРТС\ до}^R \right) \cdot \frac{\Delta f_{КА}}{c} - \Delta f_{2-1} \right]^2 \end{aligned} \right] \rightarrow \min_{x, y, z \in \mathbb{R}} \quad (14)$$

при этом имеет место нелинейное ограничение вида (3), определяющее условие нахождения ИРИ на поверхности Земли.

Оценка величин разницы времени прихода сигнала и разницы частотных сдвигов (параметров TDOA и FDOA) может быть проведена с использованием вычисления корреляции между принятыми сигналами во временной и частотной областях. Получаемая при этом взаимная функция неопределенности (ВФН) является функцией двух переменных (τ, f) (корреляционная функция на плоскости «частота-время»), имеет максимум при соответствующих значениях временного и частотного сдвигов.

Общий вид ВФН определяется выражением

$$A(\tau, f) = \int_0^T s_1(t) s_2^*(t + \tau) \exp(-j2\pi f t) dt, \quad (15)$$

где

$$s_1(t) = u(t) \exp(j2\pi f_1 t) + n_1(t) \quad \text{и} \quad s_2(t) = u(t - \Delta T) \exp[j2\pi f_2(t - \Delta T)] + n_2(t)$$

– сигналы, принятые от основного и бокового лучей ДН ИРИ. В этих формулах введены следующие обозначения: f_1, f_2 – несущие частоты сигналов; ΔT – задержка распространения сигнала $s_2(t)$ относительно сигнала $s_1(t)$; $u(t)$ – модулированный комплексный сигнал в основной полосе частот; $n_1(t), n_2(t)$ – шумовые составляющие; T – время наблюдения.

Разность частот сигналов $s_2(t)$ и $s_1(t)$ определяется выражением

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \Delta f_g + \Delta f_d, \quad (16)$$

где Δf_g – разность установок гетеродинов СР;

Δf_d – разница доплеровских смещений, вызванных движением СР.

В дискретном виде ВФН описывается следующим образом:

$$A(m, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_1(n) s_2^*(n+m) \exp\left(-j2\pi \frac{kn}{N}\right), \quad (17)$$

где m – величина дискретного временного сдвига;

k – номер дискретной частоты;

n – номер отсчета сигнала;

N – количество отсчетов сигнала.

Выражение (17) можно рассматривать как последовательность дискретных преобразований Фурье (ДПФ) векторных произведений вида $s_1(n) \cdot s_2^*(n+m)$ при различных фиксированных значениях m . В том случае, когда число N представляет собой степень числа два, для вычисления $A(m, k)$ можно использовать алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ). При этом точность разрешения по частоте определяется величиной $\frac{1}{NT_s} = \frac{F_s}{N}$, где

F_s – частота дискретизации, T_s – период дискретизации.

Сдвиг по частоте Δf и сдвиг во времени ΔT находится в соответствии с положением максимального пика ВФН на плоскости «частота-время». Вид ВФН двух сигналов с фазовой манипуляцией ФМн-4 для $m = 0$ и на плоскости «частота-время» представлен на рис. 5. При этом параметры сигнала имеют следующие значения: скорость передачи – 1 Мбод, смещение по частоте – 10 Гц, смещение по времени – 1 мкс.

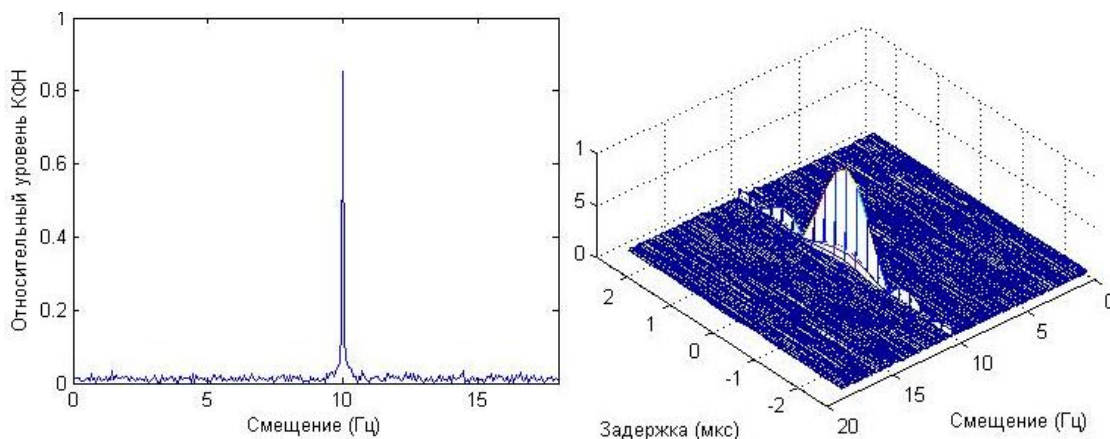


Рис. 5. Вид ВФН сигнала ФМн-4 при нулевом временном сдвиге (а), на «частотно-временной» плоскости (б)

Очевидно, что для увеличения разрешающей способности по частоте при вычислении дискретной ВФН необходимо увеличивать N . При использовании ДПФ частотное и временное разрешения задаются соотношениями: $\delta f = 1/(NT_s) = T$, $\delta \tau = 1/B$, где B – ширина поло-

сы частот сигнала. Так, для достижения частотного разрешения 1 Гц необходимо вычисление корреляции в течение 1 с, что при частоте дискретизации 1 МГц соответствует $N = 106$. С другой стороны, для получения точности по времени 1 мкс необходима полоса сигнала, равная 1 МГц.

Положение пика ВФН можно определить, используя метод максимального правдоподобия, путем поиска максимального значения $A(\tau, f) \rightarrow \max_{\tau, f}$ при переборе всех возможных

значений аргументов τ, f . Схема поиска пика ВФН по методу максимального правдоподобия представлена на рис. 6.

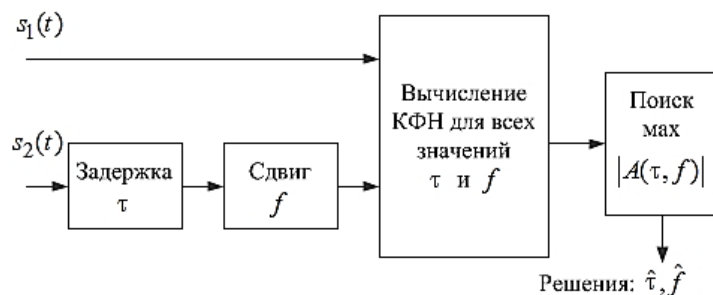


Рис. 6. Схема поиска пика ВФН по методу максимального правдоподобия

Отношение мощности главного значения ВФН к средней мощности шума на выходе коррелятора составляет величину [8]

$$\gamma_{\text{КНФ}} = 2BT\gamma, \quad (18)$$

где γ – эффективное значение отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе коррелятора.

Величина эффективного значения ОСШ определяется выражением

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} + \frac{1}{\gamma_1\gamma_2} \right], \quad (19)$$

где γ_1 и γ_2 – ОСШ сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ соответственно, значение которых определяется отношением средней мощности сигнала к мощности шума на входе коррелятора. При $\gamma_1 \gg \gamma_2$ и $\gamma_1 \gg 1$ выполняется приближение $\gamma \approx 2\gamma_2$. При $\gamma_1 \ll 1$ и $\gamma_2 \ll 1$ можно принять, что $\gamma \approx 2\gamma_1\gamma_2$.

Величина BT называется энергетическим выигрышем вычисления корреляции (ЭВК), в иностранной литературе – *processing gain*. Для дискретной ВФН вида (9) в том случае, когда сигнал дискретизируется с частотой Котельникова, величина BT принимает вид $2BT = N$.

Максимальная точность оценки сдвигов по времени и частоте $\hat{\tau}, \hat{f}$ определяется выражениями [9]:

$$\sigma_{\hat{\tau}} \approx \frac{0,55}{B} \frac{1}{\sqrt{BT\gamma}}, \quad \sigma_{\hat{f}} \approx \frac{0,55}{T} \frac{1}{\sqrt{BT\gamma}}, \quad (20)$$

откуда следует, что для повышения точности оценивания по времени необходимо увеличивать полосу сигнала, а для повышения точности оценивания частоты – время оценивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены основные принципы определения местоположения источников радиоизлучения с помощью спутников-ретрансляторов, размещенных на геостационарной орбите.

Для ОМП ИРИ при помощи СР могут быть применены как методы TDOA-TDOA или FDOA-FDOA, требующие использования трех СР, так и комбинированный метод TDOA-FDOA, требующий использования двух СР.

Проведенный анализ частотных планов СР на ГСО, а также диапазонов частот, выделенных для работы ИРИ, позволил сделать вывод, что при помощи СР на ГСО возможно ОМП ИРИ, частоты сигналов которых пересекаются с частотами Uplink-каналов СР.

Представленные результаты могут быть использованы для решения задач радиомониторинга любых систем связи и радиолокации, если диапазоны частот пересекаются с диапазоном существующих спутников-ретрансляторов, тем более что имеется установленное МККТТ (Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии) пересечение диапазонов. Но применительно к сигналам систем связи и РЛС существуют отличия, связанные со структурой сигналов. ОМП РЛС осложняется в связи с особенностями режимов работы РЛС и особенностями корреляционных свойств сигналов РЛС.

Математически возможно решение указанных задач по любым сигналам, если позволяет диапазон частот спутников-ретрансляторов на ГСО, а в перспективе возможно полнодиапазонное решение, если в РФ будет создана своя полноценная ГЛ группировка КА.

Список используемых источников

1. *Могучев В.И.* Доплеровская пеленгация земных станций через геостационарный спутник связи // *Электросвязь*. – 2003. – № 1.
2. *Могучев В.И.* Дифференциальная пеленгация земных станций через геостационарный спутник // *Электросвязь*. – 2004. – № 6.
3. *Yang Z.B., Qiu Y., Lu A.N.* PSO based passive satellite location using TDOA and FDOA measurements // 10th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science. – 2011. – P. 251–254.
4. *Ho K.C., Chan Y.T.* Solution and performance analysis of geolocation by TDOA // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 1993. – Vol. 29, № 4. – P. 1311–1322.
5. *Musicki D., Koch W.* Geolocation using TDOA and FDOA measurements. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Geolocation-using-TDOA-and-FDOA-measurements> (дата обращения: 20.01.2020).
6. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1980. – 520 с.
7. *Полянский И.С.* Метод одномерной безусловной оптимизации в задаче оценки развязки парциальных лучей многолучевой антенны зеркального типа // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 4.
8. *Марпл С.Л.* Цифровой анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
9. *Паутов Г.В.* Практика реализации геолокации и контроля полезного ресурса // *Технологии и средства связи. Спец. вып.: Спутниковая связь и вещание*. – 2011.
10. Сайт he360.com. Глобальная система геопозиционирования через низкоорбитальные КА *НавКЕуе360* (дата обращения: 20.01.2020).

П.Ю. Белов,
кандидат техн. наук
Военная академии РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха;
Е.А. Болотов,
кандидат техн. наук
АО «Международный концерн космической связи «КОСС», г. Москва;
А.Н. Мартьянов,
доктор техн. наук, профессор
Военная академии РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ БИТОВЫХ ОШИБОК В ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ПО РАДИОКАНАЛУ С ПОМЕХАМИ

В статье описывается математическая модель формирования битовых ошибок в цифровых изображениях при передаче по радиоканалу с помехами, позволяющая связать уровень шума в канале связи с количеством и местом возникновения ошибок с целью дальнейшего определения меры искажения декомпрессированной растровой графики. Обоснованы типы распределений случайных величин, характеризующих количество и место возникновения ошибок в компрессированных данных, а также меры искажения изображений.

Ключевые слова: сжатие, изображения, ошибки, искажение, шум, радиоканал.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают системы передачи цифровых сжатых изображений по радиоканалам в различных условиях обстановки, в том числе и передачи радиолокационных изображений на пункты обработки и, несомненно, цифровых фотоснимков поверхности Земли, полученных с космических или беспилотных летательных аппаратов. Современный уровень теории и практики сжатия изображений позволяет осуществлять компрессию в сотни и даже тысячи раз. Такой существенный эффект достигается путем применения различных подходов к сжатию изображений: кодирования Хаффмана, кодирования Голомба, арифметического кодирования, кодирования LZW (Lempel-Ziv-Welch), кодирования длин серий, дискретного преобразования Фурье, дискретного косинусного преобразования, преобразования Уолша – Адамара и др.

Существующее многообразие кодеков (H.264, H.265, MPEG-4, MJPEG и др.) использует различные сочетания этих алгоритмов, но обладает одним очень серьезным недостатком, который заключается в большой требовательности к качеству обслуживания передаваемого трафика. Особое значение имеет выполнение требования к вероятности битовой ошибки.

Проведенные исследования показали невозможность функционирования современных алгоритмов сжатия изображений при вероятностях битовой ошибки 10^{-5} и более, что соответствует результатам, полученным в работе [1]. При этом проведенный анализ [1–4] позволил выявить отсутствие математических моделей, описывающих процесс формирования битовых ошибок в цифровых изображениях при передаче по радиоканалам с помехами и связывающих его с качеством получаемого изображения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ БИТОВЫХ ОШИБОК В ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Цифровые изображения подвергаются большому количеству разнообразных искажений, которые возникают во время генерации, обработки, сжатия, хранения, передачи и воспроиз-

ведения информации. Качество изображения зачастую определяется людьми посредством субъективной оценки. Однако субъективная оценка не может быть использована в автоматическом режиме. По этой причине необходимо использовать механизмы объективных качественных оценок, которые могут быть реализованы программно на ЭВМ. Объективная качественная оценка изображений выполняет множество функций в обработке изображений. Во-первых, она позволяет контролировать качество изображения. Во-вторых, проводить автоматическую оптимизацию параметров канала связи для достижения максимального качества изображения. В-третьих, такая оценка может использоваться для определения эффективности систем передачи информации [1].

Существующее многообразие мер и методов сравнения изображений приводит к необходимости выбора наиболее подходящего математического аппарата. В работе [1] показано, что наиболее применимой для данного класса задач является мера качества изображения, использующая пиковое отношение сигнала к шуму искажений

$$Q_{PSNR} = 20 \cdot \log_{10} \frac{255}{\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\hat{f}_{ij} - f_{ij})^2}{MN}}}, \quad (1)$$

где $M \times N$ – размер изображения;

f_{ij} – пиксель изображения оригинала;

\hat{f}_{ij} – пиксель восстановленного изображения.

При использовании цветовой модели RGB выражение (1) примет вид

$$Q_{PSNR} = 20 \cdot \log_{10} \frac{255}{\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\hat{R}_{ij} - R_{ij})^2 + (\hat{G}_{ij} - G_{ij})^2 + (\hat{B}_{ij} - B_{ij})^2}{MN}}}, \quad (2)$$

где R , G , B – значения красной, зеленой и синей составляющих изображения оригинала;

\hat{R} , \hat{G} , \hat{B} – значения красной, зеленой и синей составляющих восстановленного изображения

Для оценки влияния битовых ошибок на функционирование алгоритмов сжатия изображений можно провести экспериментальные исследования, но они зачастую являются очень затратными и трудоемкими.

Таким образом, объективно существует научная задача, заключающаяся в разработке математической модели формирования битовых ошибок в цифровых изображениях при передаче по радиоканалу с помехами. Это позволит в дальнейшем построить адекватную имитационную модель и ускорить процесс оценки функционирования алгоритмов сжатия в различных системах передачи компрессированных видеоданных.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Результаты проведенного натурального эксперимента с использованием макета, разработанного в АО «Концерн «КОСС»» (рис. 1), имеющего характеристики в соответствии с табл. 1, позволили сформулировать гипотезы о типах распределения количества и места возникновения битовых ошибок в компрессированных данных.

Для дифференциальной квадратичной фазовой манипуляции (DQPSK) вероятность битовой ошибки может быть найдена из выражения [5]

$$P_{bDQPSK} = \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{E_b}{N_0}\right)}, \quad (3)$$

где E_b/N_0 – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума.



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид рабочего места оператора (а) и передатчика (б) экспериментальной установки

Таблица 1

Тактико-технические характеристики высокочастотной системы передачи данных использованной в эксперименте

Параметр	Значение
Метод мультиплексирования	TDD (дуплексная связь с временным разделением каналов)
Дальность	до 10 км
Полоса частот	2400–2480 МГц
Режим функционирования	Моночастота
Скорость передачи компрессированных видеоданных	~1400 Кбит/с
Видеокомпрессия	H264, H265, MPEG-4, MJPEG, УБК
Модуляция	DQPSK
Тип помехоустойчивого кода	RS (58,38)

Отношение $\frac{E_b}{N_0}$ может быть найдено из выражения [5]

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left(\frac{WT}{\log_2 M} \right) = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R} \right), \quad (4)$$

где W – ширина полосы частот;
 T – длительность символа;

N – средняя мощность шума;

S – средняя мощность сигнала;

R – скорость передачи битов, при этом $R = \frac{T}{\log_2 M}$;

M – формат модуляции или число элементов пространства сигналов (для DQPSK, $M=4$).

Учитывая, что в экспериментальной установке применяется код Рида – Соломона RS (58, 38), вероятность символьной ошибки может быть найдена из выражения [5]

$$P_{E_{RS}} \approx \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=t+1}^{2^m - 1} j \binom{2^m - 1}{j} P_{E_{DQPSK}} (1 - P_{E_{DQPSK}})^{2^m - 1 - j}, \quad (5)$$

где $P_{E_{DQPSK}}$ – вероятность символьной ошибки для DQPSK;

$t = \left\lfloor \frac{n_{rs} - k_{rs}}{2} \right\rfloor$ – количество исправляемых символьных ошибок кода $RS(n_{rs}, k_{rs})$;

m – количество бит в символе (в нашем случае $m = \log_2 M$);

$\binom{2^m - 1}{j} = \frac{(2^m - 1)!}{j!(2^m - 1 - j)!}$ – стандартный биномиальный коэффициент (число сочетаний из $2^m - 1$ по j).

Подставляя в выражение (5) $P_{E_{DQPSK}} = \frac{P_{b_{DQPSK}} (M - 1)}{\frac{M}{2}}$ и выражение для стандартного биномиального коэффициента, получим

$$P_{E_{RS}} \approx \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=t+1}^{2^m - 1} j \left(\frac{(2^m - 1)!}{j!(2^m - 1 - j)!} \right) \left(\frac{P_{b_{DQPSK}} (M - 1)}{\frac{M}{2}} \right) \left(1 - \left(\frac{P_{b_{DQPSK}} (M - 1)}{\frac{M}{2}} \right) \right)^{2^m - 1 - j}. \quad (6)$$

Выражение (6) для вероятности символьной ошибки характеризует применяемую в эксперименте сигнально-кодую конструкцию и используется для построения зависимости вероятности битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума.

Схема эксперимента, представленная на рис. 2, содержит следующую последовательность шагов:

– с цифровой камеры производят покадровый захват видео размером кадра 640 x 480 и сжатие алгоритмом JPEG;

– сжатый видеопоток передают посредством СВЧ модема (рис. 1,б) и проводной телекоммуникационной сети на расстояние 5 км. Канал проводной связи использовался для передачи эталонного изображения на приемную сторону;

– на приемной стороне экспериментальной установки производят демодуляцию DQPSK и декодирование кода Рида – Соломона;

– эталонное изображение, принятое по проводному каналу, и искаженное изображение, принятое по радиоканалу, подвергают декомпрессии и сравнивают;

– результаты сравнения с использованием меры Q_{PSNR} (рис. 6) и сами изображения выводят на монитор оператора (рис. 1,а);

– шум в радиоканале СВЧ генерируют посредством генератора помех/анализатора спектра. Оператор имеет возможность устанавливать различные значения уровня шума, при этом шум является гауссовым.

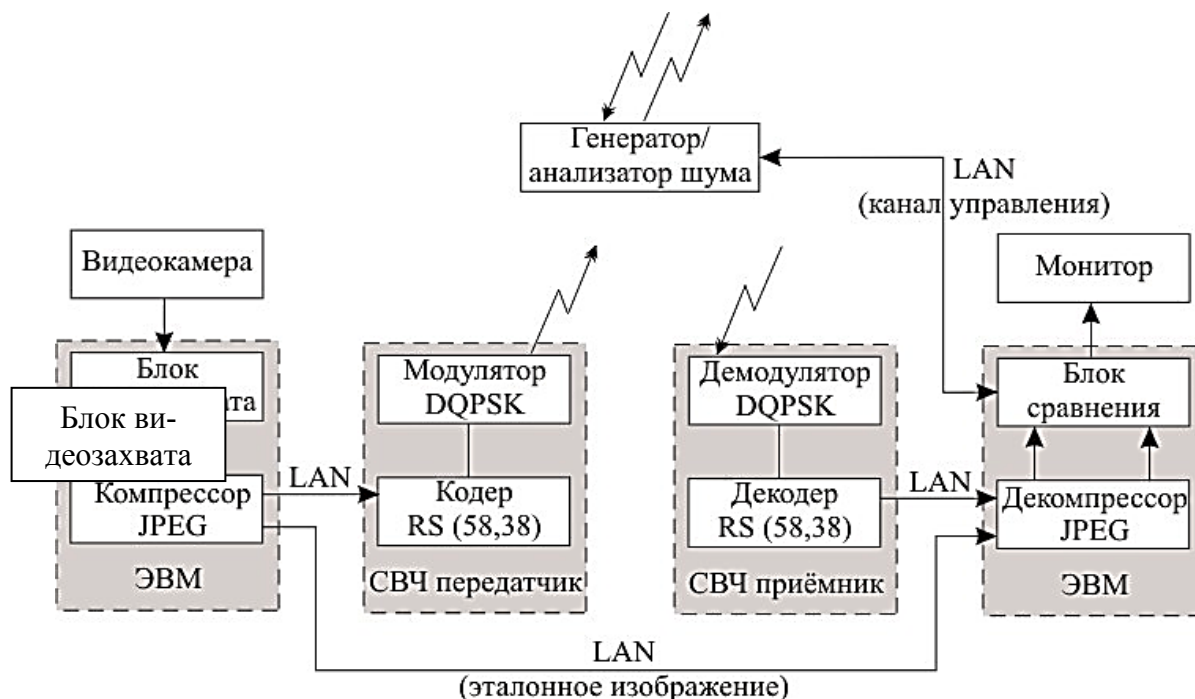


Рис. 2. Схема натурального эксперимента

На начальном этапе было произведено построение гистограмм распределения вероятностей меры искажения Q_{PSNR} (рис. 3) и количества искаженных бит на переданное изображение (рис. 4) при передаче в естественных условиях. Вид полученных распределений позволил выдвинуть гипотезы о том, что распределение непрерывной случайной величины Q_{PSNR} близко к распределению Райса, а дискретной случайной величины количества ошибок в переданном изображении – к биномиальному распределению.

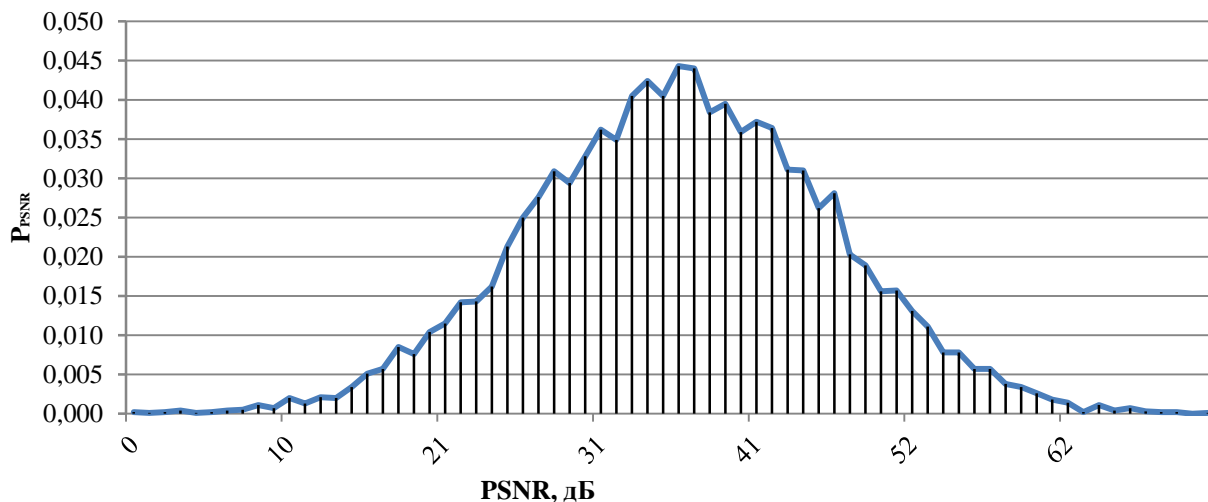


Рис. 3. Гистограмма распределения Q_{PSNR}



Рис. 4. Гистограмма распределения количества искаженных бит

Анализ гистограммы распределения места возникновения ошибки (рис. 5), полученной нами в ходе этого эксперимента, позволил предположить, что имеет место равномерное распределение ошибок по передаваемому блоку данных сжатого изображения.



Рис. 5. Гистограмма распределения места возникновения битовой ошибки

Известно [5], что образование канальных битовых ошибок функционально зависит от шума и может быть представлено в виде монотонной убывающей функциональной зависимости вероятности битовой ошибки P_b от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума $\frac{E_b}{N_0}$:

$$P_b = \varphi\left(\frac{E_b}{N_0}\right). \quad (7)$$

Зависимость (7) является основной качественной характеристикой помехоустойчивых кодов.

Для моделирования процесса появления ошибочных битов в переданном изображении необходимо иметь дело со случайной величиной множества значений количества ошибок. Очевидно, что оценка вероятности битовой ошибки P_b имеет вид

$$\bar{P}_b = \frac{k}{n}, \quad (8)$$

где n – размер переданного изображения;

k – количество ошибочных бит.

Следовательно, количество ошибок может быть найдено как

$$k = n \cdot P_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right). \quad (9)$$

Аналитический вид функциональной зависимости (7) известен лишь для простейших помехоустойчивых кодов или для случаев некодированной передачи, поэтому для получения аналитических выражений мы будем использовать полиномиальную аппроксимацию

$$P_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = a_0 + a_1 \left(\frac{E_b}{N_0} \right) + a_2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)^2 + a_3 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)^3 + \dots + a_n \left(\frac{E_b}{N_0} \right)^n, \quad (10)$$

или экспоненциальную аппроксимацию

$$P_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = a e^{-b \frac{E_b}{N_0}}. \quad (11)$$

Поиск коэффициентов аппроксимирующих функций будем осуществлять по методу наименьших квадратов.

Для поиска коэффициентов экспоненциальной аппроксимации проведем линеаризацию (11), в результате получим

$$\ln \left(P_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \right) = \ln \left(a e^{-b \frac{E_b}{N_0}} \right) = \ln(a) + \ln \left(e^{-b \frac{E_b}{N_0}} \right) = \ln(a) - b \frac{E_b}{N_0}. \quad (12)$$

Поиск неизвестных коэффициентов будем осуществлять по методу наименьших квадратов. Для этого найдем минимум суммы квадратов отклонений:

$$\sum_i^{N_{yz}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b-i}) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

где N_{yz} – количество точек (узлов) на аппроксимирующей кривой;

P_{b-i} – значение вероятности битовой ошибки в i -м узле, соответствующее i -му отношению энергии бита к спектральной плотности мощности шума $\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i$.

Для отыскания минимума (13) найдем частные производные по a и b , приравняем их к нулю:

$$\begin{cases} \left(\sum_i^{N_{yz}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b-i}) \right)^2 \right)'_a = 0; \\ \left(\sum_i^{N_{yz}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b-i}) \right)^2 \right)'_b = 0. \end{cases} \quad (14)$$

В результате получим систему уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(\sum_i^{N_{y3}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b_i}) \right) \right)'_a \cdot \sum_i^{N_{y3}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b_i}) \right) + \\ & + \sum_i^{N_{y3}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b_i}) \right) \cdot \left(\sum_i^{N_{y3}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b_i}) \right) \right)'_a = 0; \\ & \left(\sum_i^{N_{y3}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b_i}) \right) \right)'_b \cdot \sum_i^{N_{y3}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b_i}) \right) + \\ & + \sum_i^{N_{y3}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b_i}) \right) \cdot \left(\sum_i^{N_{y3}} \left(\ln(a) - b \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - \ln(P_{b_i}) \right) \right)'_b = 0. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Вычислив производные в формуле (15) и элементарно преобразовав, получим систему уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} & \ln(a) N_{y3} - b \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i = \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}); \\ & \ln(a) \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i + b \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 = \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i. \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Решая систему уравнений (16), получим

$$\left\{ \begin{aligned} & \ln(a) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 - \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i}{N_{y3} \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \right)^2}; \\ & b = \frac{-N_{y3} \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i + \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i}{N_{y3} \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \right)^2}. \end{aligned} \right. \quad (17)$$

Таким образом, выражение (11) примет вид

$$P_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = e^{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 - \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i}{N_{y3} \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \right)^2} \right)} \times \\ \times e^{\left(\frac{-N_{y3} \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i + \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i}{N_{y3} \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \right)^2} \right) \frac{E_b}{N_0}} \quad (18)$$

Проведя элементарные преобразования, получим следующее выражение:

$$P_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = e^{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 - \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i - N_{y3} \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \frac{E_b}{N_0} + \sum_{i=1}^{N_{y3}} \ln(P_{b_i}) \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \frac{E_b}{N_0}}{N_{y3} \sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N_{y3}} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i \right)^2} \right)}, \quad (19)$$

которое было нами использовано для аппроксимации зависимости (7). Для использованной системы передачи данных (см. табл. 1) аппроксимация не проводилась ввиду наличия аналитического вида функции (7).

В соответствии со сформулированными гипотезами генерирование количества ошибок в переданном изображении может быть проведено по биномиальному распределению

$$P(A_k) = C_n^k P_b^k (1 - P_b)^{n-k}. \quad (20)$$

Учитывая, что закон Пуассона является предельным для биномиального распределения в случае бесконечного числа опытов и соответственно бесконечно малой вероятности элементарного события (появления битовой ошибки), вероятность появления k ошибок при проведении n опытов с вероятностью битовой ошибки P_b может быть определена из выражения

$$P(A_k) \approx \frac{(nP_b)^k}{k!} e^{-nP_b}. \quad (21)$$

Выражение (21) является математической моделью формирования случайного количества битовых ошибок в передаваемом изображении, соответствующего текущему значению $\frac{E_b}{N_0}$.

В свою очередь, генерирование места возникновения битовой ошибки в соответствии с гипотезой может быть проведено на основании равномерного распределения.

Таким образом, разработанная вероятностная математическая модель позволяет генерировать ошибки в передаваемых изображениях на основе использования биномиального распределения, а также распределять полученное количество ошибок по изображению в соответствии с равномерным распределением при заданном уровне $\frac{E_b}{N_0}$.

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Основной задачей математической модели формирования битовых ошибок в передаваемом видео потоке и построенной на ее основе имитационной модели оценки влияния ошибок передачи на функционирование алгоритмов сжатия изображений, является оценка математического ожидания значения меры Q_{PSNR} при различной спектральной плотности мощности шума. Ввиду этого для верификации разработанной математической модели нами была проведена проверка на соответствие равенства оценок математического ожидания Q_{PSNR} экспериментальных данных и полученного по результатам имитационного моделирования.

Итак, нулевая и альтернативная гипотезы могут быть сформулированы следующим образом:

H_0 – математическое ожидание, полученное с использованием разработанной нами модели, равно математическому ожиданию экспериментальных данных;

H_1 – математическое ожидание, полученное с использованием разработанной нами модели, не равно математическому ожиданию экспериментальных данных;

α – уровень значимости составляет 0,05.

Проверка сформулированной статистической гипотезы нами была проведена путем проверки вхождения теоретического значения меры Q_{PSNR} в доверительный интервал для среднего значения случайной величины, исследованной в результате эксперимента (рис. 6).

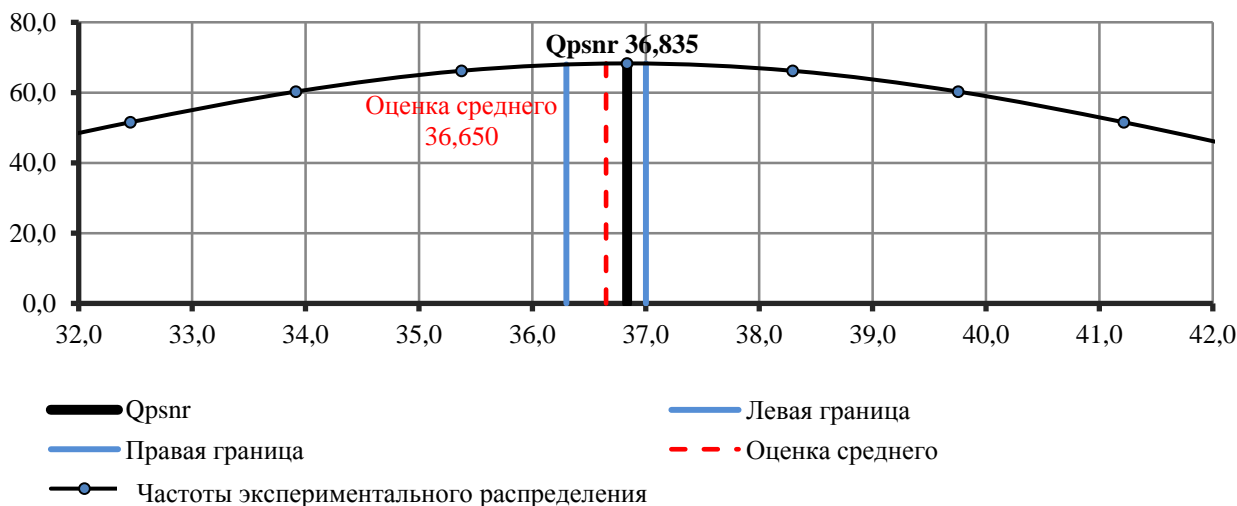


Рис. 6. Доверительный интервал меры Q_{PSNR}

Попадание значения Q_{PSNR} , полученного с использованием математической модели, в доверительный интервал при уровне значимости $\alpha = 0,05$ говорит об адекватности разработанной математической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован процесс формирования битовых ошибок в цифровых растровых сжатых изображениях и предложена математическая модель, позволяющая связать качественную характеристику канала связи, в виде зависимости вероятности битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума, с количеством и местом размещения ошибок в сжатых данных исходного изображения. Предложенная модель верифицирована путем проверки попадания среднего значения меры искажения изображения Q_{PSNR} , полученного по результатам математического моделирования, в доверительный интервал, построенный с использованием экспериментальных данных.

Таким образом, стало возможным производить оценку меры искажения изображения не путем длительных и дорогостоящих экспериментов, а посредством имитационного моделирования на основании разработанной математической модели формирования битовых ошибок в цифровых изображениях при передаче по радиоканалу с помехами.

Список используемых источников

1. Шелухин О.И., А.Н. Руднев. Потокное видео в системах радиодоступа / под ред. проф. О.И. Шелухина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 308 с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012.
3. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
4. Козлов И.В., Набоков С.А., Смирнов А.С. Программа имитационного моделирования цифровых радиолиний передачи данных // Труды МАИ. – 2011. – № 45. – С. 52.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2017.

П.Ю. Белов,
кандидат техн. наук
Военная академии РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха;
В.Ю. Дьяконов,
АО «Международный концерн космической связи «КОСС», г. Москва;
А.Н. Мартьянов,
доктор техн. наук, профессор
Военная академии РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД УСЕЧЕННОГО БЛОЧНОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕТЬЕГО НАЧАЛЬНОГО МОМЕНТА

В статье исследована возможность использования третьего начального выборочного момента случайного значения пикселя для определения порога и уровней квантования при сжатии цифровых растровых изображений методом усеченного блочного кодирования. С использованием меры пикового отношения сигнал-шум, проведена оценка качества сжатого изображения по сравнению с оригиналом для модификаций алгоритма с двумя и тремя моментами.

Ключевые слова: сжатие, изображения, ошибки, искажение, шум, квантование.

ВВЕДЕНИЕ

Получившие сегодня в технике связи широкое распространение кодеки для сжатия цифровых изображений и видео (JPEG, MJPEG, MPEG-4, H.264, H.265 и др.) позволяют осуществлять компрессию в сотни и даже тысячи раз. Такой существенный эффект достигается путем применения различных подходов к сжатию изображений с потерями [1].

Проведенные исследования показали, что большинство современных алгоритмов сжатия изображений с потерями не могут функционировать при вероятностях битовой ошибки 10^{-5} и более. Исключение составляет алгоритм усеченного блочного кодирования (УБК) [2, 3]. Данный алгоритм не нашел широкого применения в технике связи по причине незначительной степени компрессии, тем не менее он является очень привлекательным для использования в системах передачи изображений по каналам с помехами, превышающими возможности применяемых в них помехоустойчивых кодов по исправлению битовых ошибок. Ввиду этого представляет интерес исследование данного алгоритма на предмет применимости в современных системах связи, выбора параметров сжатия и возможности учета третьего начального момента при кодировании с целью повышения качества.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА УСЕЧЕННОГО БЛОЧНОГО КОДИРОВАНИЯ

Базовый алгоритм УБК [3] строится следующим образом.

Изображение, представленное $M \times N$ -матрицей $\|b_{ij}\|$, яркостей пикселей разбивается на небольшие прямоугольные блоки $m \times n$ элементов. Каждый такой блок квантуется индивидуально. Уровни квантования для каждого блока выбираются так, чтобы сохранялись первые два выборочных момента.

Обработка блока начинается с вычисления порога и двух уровней квантования, затем производится квантование блока на два уровня, после чего следует упаковка проквантованного блока.

Пусть $p = m \times n$ и пусть $X = \{X_1, X_2, \dots, X_p\}$ значений пикселей в блоке оригинального изображения. Тогда первый и второй выборочные моменты и выборочная дисперсия соответственно равны:

$$\bar{X} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i, \quad (1)$$

$$\overline{X^2} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i^2, \quad (2)$$

$$\overline{\sigma^2} = \overline{X^2} - \bar{X}^2. \quad (3)$$

В соответствии с принципом действия любого однобитового квантователя необходимо найти порог X_{th} и два S_i выходных уровня a и b , таких, что

$$\text{если } X_i \geq X_{th}, \text{ выход } S_i = b, \quad (4)$$

$$\text{если } X_i < X_{th}, \text{ выход } S_i = a,$$

где $i = 1, 2, \dots, p$, $S_i = 0, 1, \dots, 255$.

Для квантователя (4) на рис. 1, в соответствии с работой [3], значение порога выбрано как среднее выборочное $X_{th} = \bar{X}$.

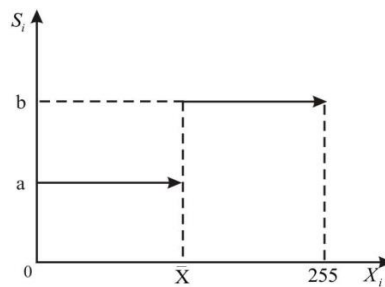


Рис. 1. Схема квантователя УБК с использованием двух выборочных моментов

Выходные уровни a и b находят в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} p\bar{X} = (p-q)a + qb, \\ p\overline{X^2} = (p-q)a^2 + qb^2. \end{cases} \quad (5)$$

В системе (5) q является параметром квантования и определяет порог, поскольку он определяет число X_i , больших, чем пороговое значение X_{th} .

Решение (5) имеет вид:

$$b = \bar{X} + \bar{\sigma} \sqrt{\frac{p-q}{q}}, \quad (6)$$

$$a = \bar{X} - \bar{\sigma} \sqrt{\frac{q}{p-q}}. \quad (7)$$

Для учета при кодировании третьего начального выборочного момента используются сортированные значения пикселей Y_i , а порог квантования определяется как Y_{p-q} [3].

Третий момент выражается как

$$\overline{X^3} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i^3 = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p Y_i^3. \quad (8)$$

Тогда задача состоит в нахождении a , b и q , сохраняющих \bar{X} , \bar{X}^2 и \bar{X}^3 . Исходя из этого имеем систему уравнений

$$\begin{cases} p\bar{X} = (p-q)a + qb, \\ p\bar{X}^2 = (p-q)a^2 + qb^2, \\ p\bar{X}^3 = (p-q)a^3 + qb^3. \end{cases} \quad (9)$$

Для нахождения a и b воспользуемся первыми двумя уравнениями, как и в случае для системы (5). Значение q будем искать как решение третьего уравнения системы (9) с использованием (6) и (7).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Вычислим a^3 и b^3 :

$$a^3 = (\bar{X})^3 - 3(\bar{X})^2 \bar{\sigma} \sqrt{\frac{q}{p-q}} + 3\bar{X} (\bar{\sigma})^2 \left(\sqrt{\frac{q}{p-q}} \right)^2 - (\bar{\sigma})^3 \left(\sqrt{\frac{q}{p-q}} \right)^3, \quad (10)$$

$$b^3 = (\bar{X})^3 + 3(\bar{X})^2 \bar{\sigma} \sqrt{\frac{p-q}{q}} + 3\bar{X} (\bar{\sigma})^2 \left(\sqrt{\frac{p-q}{q}} \right)^2 + (\bar{\sigma})^3 \left(\sqrt{\frac{p-q}{q}} \right)^3. \quad (11)$$

Подставим (10) и (11) в третье уравнение системы (9) и получим

$$\begin{aligned} p\bar{X}^3 &= (\bar{X})^3 (p-q) - 3(\bar{X})^2 \bar{\sigma} \sqrt{\frac{q}{p-q}} (p-q) + \\ &+ 3\bar{X} (\bar{\sigma})^2 \left(\sqrt{\frac{q}{p-q}} \right)^2 (p-q) - (\bar{\sigma})^3 \left(\sqrt{\frac{q}{p-q}} \right)^3 (p-q) + \\ &+ (\bar{X})^3 q + 3(\bar{X})^2 \bar{\sigma} \sqrt{\frac{p-q}{q}} q + 3\bar{X} (\bar{\sigma})^2 \left(\sqrt{\frac{p-q}{q}} \right)^2 q + (\bar{\sigma})^3 \left(\sqrt{\frac{p-q}{q}} \right)^3 q. \end{aligned} \quad (12)$$

В результате громоздких алгебраических преобразований выражения (12) получим

$$\frac{\bar{X}^3 - (\bar{X})^3 - 3\bar{X} (\bar{\sigma})^2}{-(\bar{\sigma})^3} = \frac{2q-p}{\sqrt{qp-q^2}}. \quad (13)$$

Обозначим левую часть формулы (13) как C и помножим на $\frac{-1}{-1}$. Тогда

$$C = \frac{-\bar{X}^3 + (\bar{X})^3 + 3\bar{X} (\bar{\sigma})^2}{(\bar{\sigma})^3}, \quad (14)$$

в результате после возведения в квадрат выражение (13) преобразуется к виду

$$C^2 = \frac{(2q - p)^2}{qp - q^2} = \frac{4q^2 - 4pq + p^2}{qp - q^2}. \quad (15)$$

Приведем формулу (15) к квадратному уравнению относительно q :

$$q^2 - pq + \frac{p^2}{C^2 + 4} = 0. \quad (16)$$

Решая, получим два корня:

$$q_{1,2} = \frac{p}{2} \pm \frac{p}{2} \sqrt{\frac{C^2}{C^2 + 4}}. \quad (17)$$

Обратимся теперь к C из выражения (14)

$$\begin{aligned} C &= \frac{-\bar{X}^3 + (\bar{X})^3 + 3\bar{X}(\bar{\sigma})^2}{(\bar{\sigma})^3} = \frac{-\bar{X}^3 + (\bar{X})^3 + 3\bar{X}(\bar{X}^2 - (\bar{X})^2)}{(\bar{\sigma})^3} = \\ &= \frac{-\bar{X}^3 + (\bar{X})^3 + 3\bar{X}\bar{X}^2 - 3\bar{X}(\bar{X})^2}{(\bar{\sigma})^3} = \frac{-\bar{X}^3 + 3\bar{X}\bar{X}^2 + (\bar{X})^3 - 3(\bar{X})^3}{(\bar{\sigma})^3} = \\ &= \frac{-\bar{X}^3 + 3\bar{X}\bar{X}^2 - 2(\bar{X})^3}{(\bar{\sigma})^3} = \frac{3\bar{X}\bar{X}^2 - \bar{X}^3 - 2(\bar{X})^3}{(\bar{\sigma})^3}. \end{aligned} \quad (18)$$

Учитывая, что $\sqrt{\frac{C^2}{C^2 + 4}} < 1$, получается, что оба корня положительные и отбросить один из них как не удовлетворяющий физическому смыслу задачи невозможно.

Для обоснования выбора корня q_1 или q_2 была исследована система (5) и проведен численный эксперимент (рис. 2 и 3) по сжатию и последующей декомпрессии черно-белого изображения размером 640 x 480 пикселей.

В общем случае полученные значения q_1 и q_2 необязательно будут целыми числами (рис. 2), так что на практике их округляют до ближайшего целого. Интересная интерпретация выражения (17) состоит в том, что номинальный порог устанавливается равным выборочной медиане и сдвигается выше или ниже в зависимости от величины третьего выборочного момента, который является мерой асимметрии Y_i -ых.

На рис. 2 представлен фрагмент, позволяющий оценить характер значений параметров q , q_1, q_2 (ось ординат) в зависимости от номера блока разбиения (ось абсцисс) для исследованного изображения. Наличие симметрии q_1 и q_2 относительно $\frac{p}{2}$, которая также следует из выражения (17), позволяет сделать предположение о возможности использования обеих корней, но при различных направлениях упорядочивания Y_i -х.

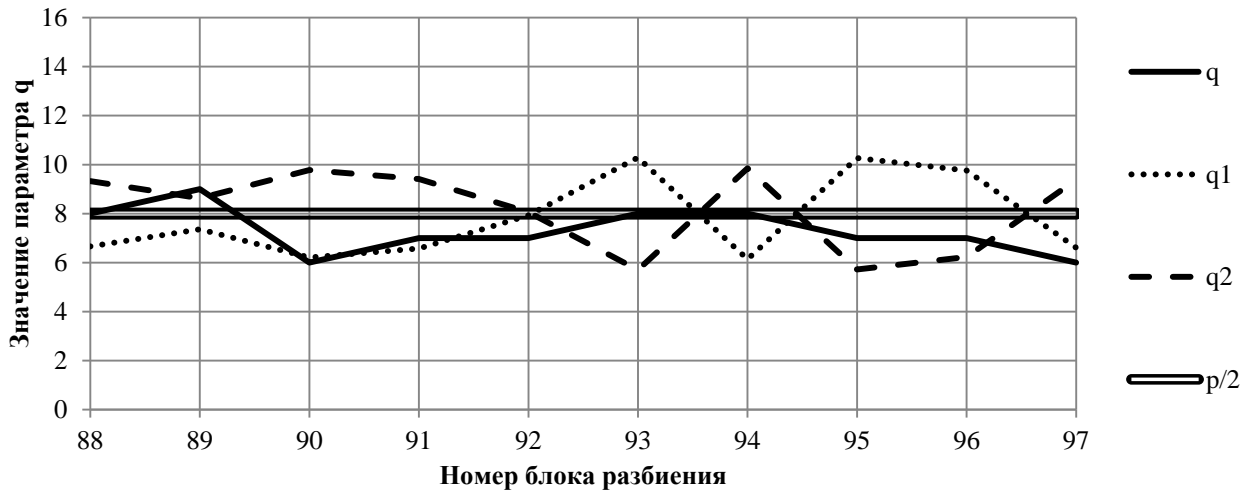


Рис. 2. Значения параметров квантования q , q_1 , q_2

В случае использования выборки упорядоченной по убыванию система уравнений (9) примет вид

$$\begin{cases} p\bar{X} = q_2 a_2 + (p - q_2) b_2, \\ p\bar{X}^2 = q_2 a_2^2 + (p - q_2) b_2^2, \\ p\bar{X}^3 = q_2 a_2^3 + (p - q_2) b_2^3 \end{cases} \quad (19)$$

В данном случае q_2 определяет число X_i , меньших, чем пороговое значение. Решение системы уравнений (19) имеет вид:

$$b_2 = \bar{X} + \bar{\sigma} \sqrt{\frac{q_2}{p - q_2}}, \quad (20)$$

$$a_2 = \bar{X} - \bar{\sigma} \sqrt{\frac{p - q_2}{q_2}}. \quad (21)$$

$$q_2 = \frac{p}{2} - \frac{p}{2} \sqrt{\frac{C^2}{C^2 + 4}}. \quad (22)$$

Для оценки качества сжатого изображения была использована мера Q_{psnr} [4],

$$Q_{psnr} = 20 \cdot \log_{10} \frac{255}{\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{p-1} (\hat{X}_i - X_i)^2}{p}}}, \quad \text{при } \sum_{i=0}^{p-1} (\hat{X}_i - X_i)^2 > 0 \quad (23)$$

где X_i – пиксель блока изображения оригинала;

\hat{X}_i – пиксель блока сжатого изображения.

Данная мера позволяет оценить качество восстановленного после сжатия изображения по сравнению с оригиналом через отношение выходной мощности сигнала к мощности шума. Числитель выражения (23) представляет собой максимальный уровень яркости пикселя, а знаменатель – среднюю ошибку, вносимую при квантовании.

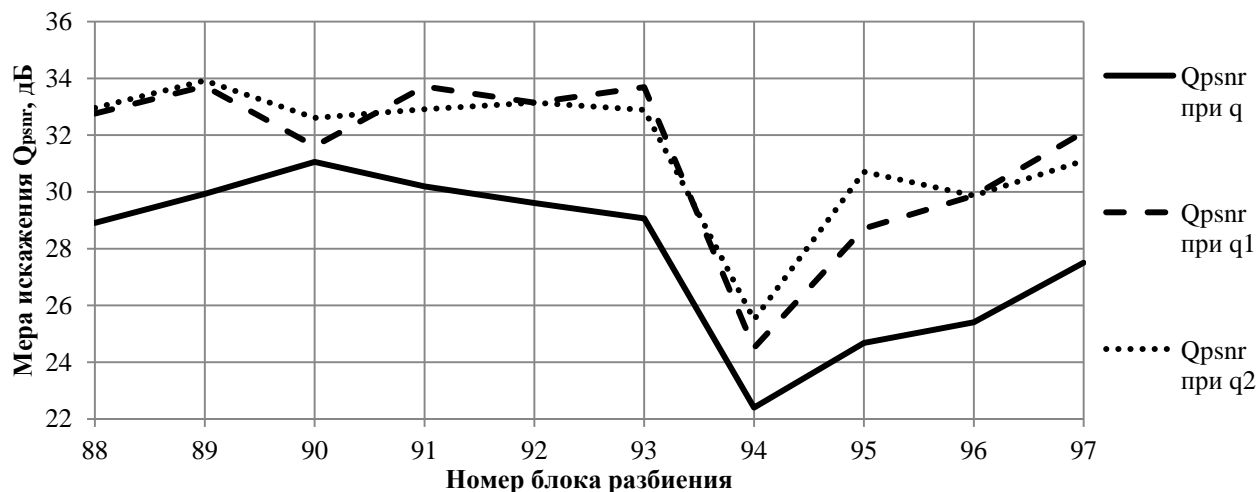


Рис. 3. Сравнительная оценка качества сжатого изображения после использования алгоритма УБК с порогами квантования определяемыми на основе q , q_1 , q_2

Анализ рис. 3 показывает возможность использования обоих корней q_1 и q_2 . При этом для использования корня q_1 выборка упорядочивается по возрастанию $Y_1 \leq Y_2 \leq \dots \leq Y_p$, и уровни квантования вычисляются по выражениям (6) и (7), а корень q_2 применяется при упорядочивании по убыванию $Y_1 \geq Y_2 \geq \dots \geq Y_p$, и уровни квантования вычисляются по выражениям (20) и (21).

На рис. 3 видно, что качество изображения, сжатого с использованием третьего выборочного момента, выше, чем при сжатии стандартным алгоритмом УБК с двумя моментами. Это позволяет отдать предпочтение при сжатии в пользу учета третьего момента.

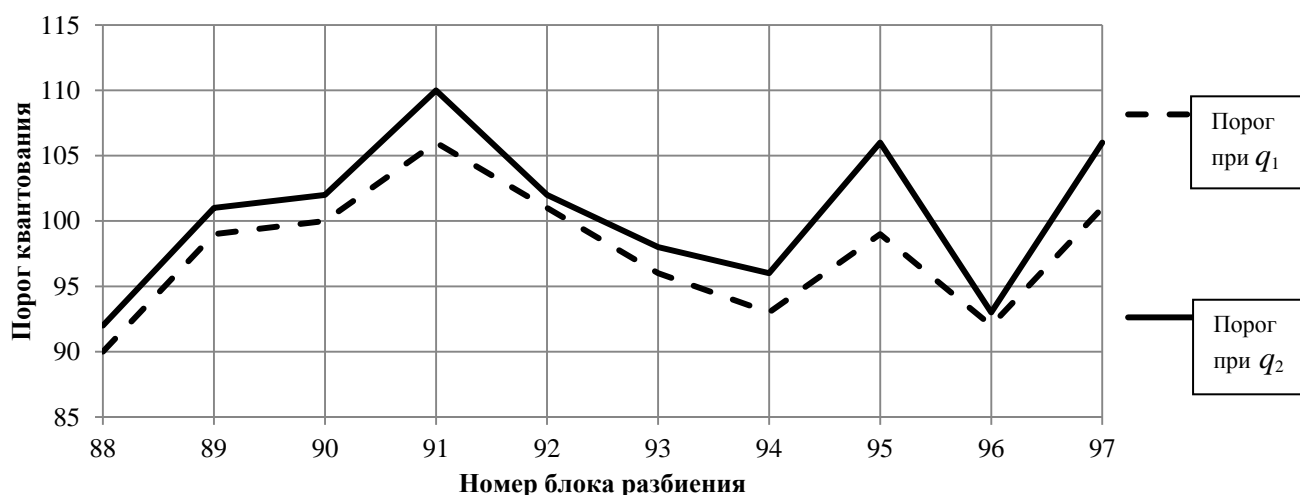


Рис. 4. Сравнительная оценка порогов квантования определяемых на основе q , q_1 , q_2

Тем не менее на рис. 3 значения меры Q_{psnr} при сжатии с использованием параметров q_1 и q_2 несущественно отличаются. Анализ порогов квантования при параметрах q_1 и q_2 на рис. 4, для аналогичного фрагмента (рис. 2 и 3) сжимаемых блоков изображения, позволяет

сделать вывод, что различие в порогах квантования для одноименных блоков приводит к различию значений качества сжатого изображения.

Является очевидным, что причина таких различий состоит в округлении корней q_1 и q_2 при определении порога в упорядоченных выборках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение метода усеченного блочного кодирования с использованием третьего начального выборочного момента при определении порога является более эффективным в отличие от выбора этого порога как среднего значения яркости пикселя. При этом такой выбор порога не требует больших вычислений от приемника (декодера), но передатчик (кодер) требует повышенной обработки.

В свою очередь, выбор в качестве параметра порога квантования q_1 или q_2 зависит только от направления упорядочивания выборки и на качество изображения влияния не оказывает.

Список используемых источников

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012.
2. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера, 2004.
3. Delp E., Mitchell O.R. Image compression using block truncation coding // IEEE Trans. On communications. – 1979. – Vol. COM-27, № 9. – P. 1335–1342.
4. Шелухин О.И., Руднев А.Н. Потокое видео в системах радиодоступа / под ред. проф. О.И. Шелухина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 308 с.

Д.А. Булекбаев,
доктор техн. наук, доцент;
В.М. Лихачёв,
доктор техн. наук, профессор

РАСЧЕТ ЛУЧЕВЫХ-ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКИХ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ РАДИОПРОЗРАЧНЫМИ КЛИНОВИДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ РАДИОЛОКАЦИИ

В статье представлены метод и алгоритм расчета лучевых-геометрооптических угловых характеристик (полярных углов) электромагнитных полей дифракции плоских электромагнитных волн, отраженных и преломленных гранями радиопрозрачных клиновидных структур.

Основой вычислительного алгоритма является система рекуррентных равенств, построенная на основании представления решения соответствующей граничной задачи дифракции в форме интеграла Зоммерфельда с последующим приведением его к системе функциональных уравнений относительно вспомогательных мероморфных функций комплексного переменного для построения указанной рекуррентной системы.

Ключевые слова: радиопрозрачный клин, интеграл Зоммерфельда, геометрооптические угловые характеристики, отраженные ЭМВ, преломленные ЭМВ, мероморфные функции, система рекуррентных равенств.

ВВЕДЕНИЕ

В классе задач, решаемых с применением радиотехнических методов и средств, задачи радиолокации и радиосвязи имеют приоритетное значение. Для успешного решения любой радиолокационной задачи требуется знать пространственно-временные характеристики полей дифракции электромагнитных волн, рассеянных объектом локации в окружающее пространство.

Объекты локации, как правило, имеют сложную геометрическую форму поверхности, содержащую в частности клиновидные образования (угловые области) с радиусами закругления, намного меньшими длины волны, облучающей объект локации. Они имеют большие электрические размеры. Участки их поверхности обладают различными радиофизическими свойствами, например, могут быть радиопрозрачными.

При исследовании процессов дифракции электромагнитных волн (ЭМВ) на объектах локации различные части поверхности объекта аппроксимируются поверхностями, имеющими такие геометрические формы и радиофизические свойства поверхности, для которых известны аналитические решения соответствующих задач дифракции ЭМВ различных типов и поляризации. В частности, угловые образования, имеющие радиопрозрачные участки поверхности, аппроксимируются диэлектрическими (радиопрозрачными) клиновидными структурами. Поэтому одной из основных электродинамических задач, возникающих при исследовании дифракции ЭМВ на объектах сложной архитектуры с клиновидными образованиями на их поверхности, является модельная задача о дифракции плоской ЭМВ на диэлектрическом (радиопрозрачном) клине с полубесконечными гранями.

Наиболее эффективным методом решения указанной модельной задачи в квазиоптическом частотном диапазоне является метод, основанный на представлении решения поставленной граничной задачи в форме интеграла типа интеграла Зоммерфельда [1–7] с последующим приведением исходной задачи дифракции к системе функциональных уравнений относительно некоторых мероморфных функций комплексного переменного, определяющих структуру решения. Теоретические основы разработанного авторами метода представлены в работе [8].

Метод позволяет получить точное решение рассматриваемой задачи, имеющее наглядную геометрическую и физическую интерпретацию, дает возможность построения удобных вычислительных алгоритмов расчета как поля дифракции в целом, так и его отдельных составляющих.

Одной из важнейших рассматриваемых в формате указанного метода задач дифракции является задача определения геометрического поля дифракции падающих, отраженных и преломленных плоских ЭМВ, возбуждаемых гранями радиопрозрачного клина. Поскольку все рассматриваемые здесь задачи дифракции решаются в квазиоптическом частотном диапазоне, то важнейшей геометрооптической характеристикой падающих, отраженных и преломленных плоских ЭМВ являются их угловые характеристики, которые представляют собой полярные углы падающих, отраженных и преломленных гранями клина плоских ЭМВ во внешней и внутренней средах (среды I и II), разделенных клиновидной границей. В данной статье показан расчет указанных геометрооптических угловых характеристик.

РАСЧЕТ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Пусть пространство R^3 разделено клиновидной поверхностью, образованной двумя полуплоскостями (грани) с общей границей (ребро), на две угловые области Γ_1 и Γ_2 (соответственно I и II среды). Введем в R^3 цилиндрическую систему координат ρ, θ, z (где ρ – полярный радиус, θ – полярный угол) так, чтобы ось OZ совпадала с ребром клина. Тогда положение граней определяется уравнениями $\theta = \pm\alpha$. Полагаем $\alpha \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$. В этом случае области:

$$\Gamma_1 = \{(\rho, \theta, z) : -\alpha \leq \theta \leq \alpha, \rho \geq 0, z \in R\} \text{ (среда I);}$$

$$\Gamma_2 = \{(\rho, \theta, z) : \alpha \leq \theta \leq 2\pi - \alpha, \rho \geq 0, z \in R\} \text{ (среда II).}$$

Угловые области Γ_1 и Γ_2 характеризуются различными электрическими параметрами: диэлектрическими $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и магнитными μ_1, μ_2 проницаемостями и, следовательно, волновыми числами $k_1 = \omega\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}$, $k_2 = \omega\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}$ (здесь ω – частота электромагнитных колебаний). Обозначим $\gamma = \frac{k_1}{k_2}$, тогда, если $k_2 = k$, то $k_1 = \gamma k$. Среда I и II возбуждаются плоской электромагнитной волной, распространяющейся в среде I (падающая ЭМВ) (рис. 1).

Фронт волны параллелен оси OZ . Поэтому рассматриваемая задача дифракции становится двумерной и решается в полярных координатах (ρ, θ) . Полагаем, что временная зависимость всех исследуемых электромагнитных полей определена множителем $e^{-i\omega t}$. В дальнейшем будем рассматривать стационарные электромагнитные поля, не содержащие указанного временного множителя. Возбуждаемое в средах I и II поле дифракции будем представлять в виде двух ортогонально поляризованных электромагнитных полей, характеризующихся E - и H -поляризациями.

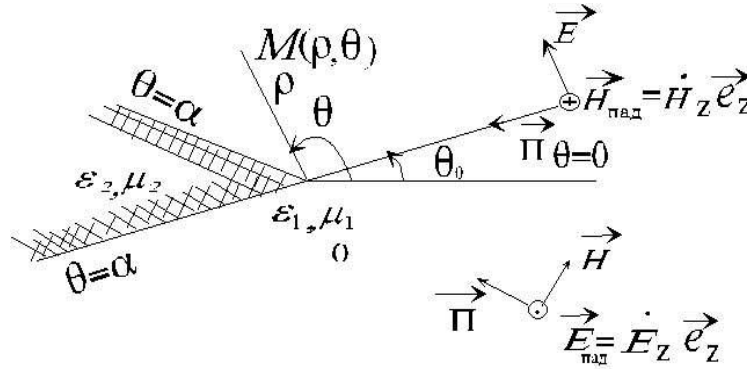


Рис. 1. Падение плоской электромагнитной волны на полубесконечный диэлектрический клин в цилиндрической системе координат для случаев E - и H -поляризации

Окончательно рассматриваемую задачу дифракции можно сформулировать как следующую граничную задачу [8]: определить соответственно в угловых средах I и II функции

$$\varphi(\rho, \theta) = \varphi_0(\rho, \theta) + \tilde{\varphi}(\rho, \theta), \quad \psi(\rho, \theta) = \tilde{\psi}(\rho, \theta), \quad (1)$$

удовлетворяющие уравнениям Гельмгольца

$$\nabla^2 \varphi + (\gamma k)^2 \varphi = 0, \quad \nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0, \quad (2)$$

удовлетворяющие граничным условиям

$$\begin{cases} \varphi|_{\theta=\alpha-0} = \psi|_{\theta=\alpha+0}, & \varphi|_{\theta=-\alpha+0} = \psi|_{\theta=-\alpha-0}, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}|_{\theta=\alpha-0} = \beta \frac{\partial \psi}{\partial \theta}|_{\theta=\alpha+0}, & \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}|_{\theta=-\alpha+0} = \beta \frac{\partial \psi}{\partial \theta}|_{\theta=-\alpha-0}, \end{cases} \quad (3)$$

на границе $S = \{(\rho, \theta): \theta = \alpha, \theta = -\alpha, \rho \geq 0\}$ раздела сред I и II, удовлетворяющие для функций $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\psi}$ условиям излучения на бесконечности и условиям на ребре: $\tilde{\varphi} = O(\rho^q)$, $\tilde{\psi} = O(\rho^q)$, $\text{Re } q > 0$, $\rho \rightarrow 0$.

В среде I поле падающей ЭМВ

$$\varphi_0(\rho, \theta) = A e^{i\gamma k \rho \cos(\theta - \theta_0)}, \quad |\theta_0| \leq \alpha. \quad (4)$$

При этом в «электрическом» случае $\tilde{\varphi} = \dot{E}_{z1}$, $\varphi_0 = \dot{E}_{z\text{пад}}$ – поле падающей волны в среде I,

$\tilde{\psi} = \dot{E}_{z2}$, $\beta = \frac{\mu_1}{\mu_2}$; в «магнитном» случае $\tilde{\varphi} = \dot{H}_{z1}$, $\varphi_0 = \dot{H}_{z\text{пад}}$, $\tilde{\psi} = \dot{H}_{z2}$, $\beta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ [7, 8].

Электромагнитные поля $\varphi(\rho, \theta)$ и $\psi(\rho, \theta)$ соответственно в областях Γ_1 и Γ_2 должны быть представлены в виде сумм:

$$\varphi = \varphi_0 + \tilde{\varphi} = \varphi_0 + \varphi_{\text{геом}} + \varphi_{\text{диф}}, \quad \psi = \tilde{\psi} = \psi_{\text{геом}} + \psi_{\text{диф}}, \quad (5)$$

где геометрические электромагнитные поля $\varphi_{\text{геом}}(\rho, \theta)$ и $\psi_{\text{геом}}(\rho, \theta)$ в дальней зоне ($\gamma k \rho \gg 1$, $k \rho \gg 1$ соответственно для Γ_1 и Γ_2) в общем виде имеют представления:

$$\varphi_{\text{геом}}(\rho, \theta) = \sum_{n=1}^N C_n^p e^{i\gamma k \rho \cos(\theta - \theta_n^p)}, \quad \psi_{\text{геом}}(\rho, \theta) = \sum_{m=1}^M C_m^s e^{i k \rho \cos(\bar{\theta} - \theta_m^s)}, \quad (6)$$

$$\theta_n^p \in [-\alpha, \alpha], \quad \theta_m^s \in [\alpha, 2\pi - \alpha], \quad \bar{\theta} = \pi - \theta.$$

Геометрические поля $\varphi_{\text{геом}}(\rho, \theta)$, $\psi_{\text{геом}}(\rho, \theta)$ сформированы отраженными и преломленными гранями клина плоскими ЭМВ, распространяющимися по законам геометрической оптики. Направления распространения волн определяются полярными углами θ_n^p и θ_m^s . При этом множители C_n^p , C_m^s – коэффициенты дифракции геометрических полей.

Согласно работе [8] для так называемых «четного» и «нечетного» случаев в общем виде имеем представления:

$$\varphi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^N C_n^p \left(e^{i\gamma k \rho \cos(\theta - \theta_n^p)} + e^{i\gamma k \rho \cos(\theta + \theta_n^p)} \right), \quad C_n^p = A, \theta_n^p = \theta_n; \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{геом}}^{\text{нч}}(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^N \tilde{C}_n^p \left(e^{i\gamma k \rho \cos(\theta - \theta_n^p)} - e^{i\gamma k \rho \cos(\theta + \theta_n^p)} \right), \quad \tilde{C}_n^p = A, \theta_n^p = \theta_n; \quad (8)$$

$$\psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(\rho, \theta) = \sum_{m=1}^M C_m^s \left(e^{i k \rho \cos(\bar{\theta} - \theta_m^s)} + e^{i k \rho \cos(\bar{\theta} + \theta_m^s)} \right); \quad (9)$$

$$\psi_{\text{геом}}^{\text{нч}}(\rho, \theta) = \sum_{m=1}^M \tilde{C}_m^s \left(e^{i k \rho \cos(\bar{\theta} - \theta_m^s)} - e^{i k \rho \cos(\bar{\theta} + \theta_m^s)} \right), \quad \bar{\theta} = \pi - \theta. \quad (10)$$

Решение исходной граничной задачи есть среднее арифметическое решений «четного» и «нечетного» случаев.

Функции $\varphi_{\text{диф}}$ и $\psi_{\text{диф}}$ в равенствах (5) определяют электромагнитные поля дифракции ЭМВ, рассеянных ребром диэлектрического клина. В общем виде они имеют представления (соответственно для Γ_1 и Γ_2) [7]:

$$\varphi_{\text{диф}}(\rho, \theta) = \frac{D_p(\theta)}{\sqrt{\gamma k \rho}} e^{-i\gamma k \rho} + o\left(\frac{1}{\sqrt{\gamma k \rho}}\right), \quad \theta \neq \theta_n^p, \quad (11)$$

$$\psi_{\text{диф}}(\rho, \theta) = \frac{D_s(\theta)}{\sqrt{k \rho}} e^{-i k \rho} + o\left(\frac{1}{\sqrt{k \rho}}\right), \quad \theta \neq \theta_m^s. \quad (12)$$

Используя метод, представленный в работе [8], произведем расчет геометрических угловых характеристик электромагнитных полей падающих, отраженных и преломленных плоских ЭМВ, которые формируют геометрическое поле дифракции во внешней и внутренней угловых средах, ограниченных гранями радиопрозрачного клина. Для этого, согласно построенному в работе [8] алгоритму, исходная граничная задача дифракции с помощью интегралов Зоммерфельда и специальной функции [3]

$$g(w, \gamma) = \arccos(\gamma \cos w), \quad (13)$$

определяющей переход из области Γ_1 в область Γ_2 , приводится к двум системам функциональных уравнений относительно вспомогательных мероморфных функций $\Phi(w)$ и $\Psi(w)$ [7]:

$$\begin{cases} \Phi(w + \alpha) \pm \Phi(w - \alpha) = \tilde{\alpha}(w) [\Psi(g(w, \gamma) + \pi - \alpha) \pm \Psi(g(w, \gamma) - (\pi - \alpha))], \\ \Phi(w + \alpha) \mp \Phi(w - \alpha) = -\beta [\Psi(g(w, \gamma) + \pi - \alpha) \mp \Psi(g(w, \gamma) - (\pi - \alpha))], \end{cases} \quad (14)$$

$$\tilde{\alpha}(w) = g'(w, \gamma) = \frac{\gamma \sin w}{\sqrt{1 - \gamma^2 \cos^2 w}}. \quad (15)$$

Свойства функции $g(w, \gamma)$ рассмотрены в работах [4, 8]. Обратная функция $g^{-1}(w, \gamma) = g\left(w, \frac{1}{\gamma}\right) = \arccos\left(\frac{1}{\gamma} \cos w\right)$ определяет переход из области Γ_2 в область Γ_1 .

Согласно алгоритму, разработанному в [8], систему функциональных уравнений (14) можно преобразовать в систему функциональных уравнений относительно пары мероморфных функций $\Phi_{\text{геом}}(w)$, $\Psi_{\text{геом}}(w)$, которые являются вспомогательными функциями для определения геометрического электромагнитного поля дифракции, возбуждаемого гранями радиопрозрачных клиновидных структур. Система содержит два уравнения для «четного» и два уравнения для «нечетного» случаев [8]. В дальнейшем будем подробно рассматривать геометрические поля дифракции для «четного» случая.

Итак, рассмотрим «четный» случай для функций $\Phi_{\text{геом}}(w) = \Phi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$, $\Psi_{\text{геом}}(w) = \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$. Для него из системы (14) получим следующую систему уравнений [8]:

$$\begin{cases} \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w + \alpha) + \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w - \alpha) = \tilde{\alpha}(w) \left[\Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) + \pi - \alpha) + \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) - (\pi - \alpha)) \right], \\ \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w + \alpha) - \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w - \alpha) = -\beta \left[\Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) + \pi - \alpha) - \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) - (\pi - \alpha)) \right], \end{cases} \quad (16)$$

где $\Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w) = \Phi_{\circ}^{\text{ч}}(w) + \Phi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$.

Представления (1)–(14) гарантируют то, что функции $\tilde{\varphi}(\rho, \theta)$, $\tilde{\psi}(\rho, \theta)$ удовлетворяют уравнениям Гельмгольца, граничным условиям, условиям излучения на бесконечности, условиям на ребре. На основании [8] функции:

$$\Phi_{\circ}^{\text{ч}}(w) = Z_{\gamma k}(\varphi_{\circ}^{\text{ч}}(\rho, \theta)) = A \frac{\sin w}{\cos w - \cos \theta_{\circ}}, \quad (17)$$

$$\Phi_{\circ}^{\text{нч}}(w) = Z_{\gamma k}(\varphi_{\circ}^{\text{нч}}(\rho, \theta)) = A \left[\frac{\sin \frac{w}{2}}{\cos \frac{w}{2} - \cos(\frac{w}{2} - \theta_{\circ})} - \frac{\sin \frac{w}{2}}{\cos \frac{w}{2} - \cos(\frac{w}{2} + \theta_{\circ})} \right], \quad (18)$$

Системы (14) преобразуются к системам рекуррентных функциональных уравнений для «четного» и «нечетного» случаев: система (16) для «четного» случая относительно $\Phi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$ и $\Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$ преобразуется к двум системам вида [8]:

$$\begin{cases} \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w + \alpha) = F_{11}^{\text{ч}}(w) \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w - \alpha) + F_{12}^{\text{ч}}(w) \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) - (\pi - \alpha)), \\ \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) + (\pi - \alpha)) = F_{21}^{\text{ч}}(w) \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w - \alpha) + F_{22}^{\text{ч}}(w) \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) - (\pi - \alpha)), \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w - \alpha) = F_{11}^{\text{ч}}(w) \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w + \alpha) + F_{12}^{\text{ч}}(w) \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) + \pi - \alpha), \\ \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) - (\pi - \alpha)) = F_{21}^{\text{ч}}(w) \Phi_{\Sigma}^{\text{ч}}(w + \alpha) + F_{22}^{\text{ч}}(w) \Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(g(w, \gamma) + \pi - \alpha). \end{cases} \quad (20)$$

Здесь $F_{11}^{\text{ч}}(w) = \frac{\tilde{\alpha}(w) - \beta}{\tilde{\alpha}(w) + \beta}$, $F_{12}^{\text{ч}}(w) = \frac{2\tilde{\alpha}(w)\beta}{\tilde{\alpha}(w) + \beta}$, $F_{21}^{\text{ч}}(w) = \frac{2}{\tilde{\alpha}(w) + \beta}$, $F_{22}^{\text{ч}}(w) = -\frac{\tilde{\alpha}(w) - \beta}{\tilde{\alpha}(w) + \beta}$ – коэффициенты Френеля [7], $\tilde{\alpha}(w) = g'(w, \gamma) = \frac{\gamma \sin w}{\sqrt{1 - \gamma^2 \cos^2 w}}$.

Система (19) соответствует случаю падения плоской волны $\varphi_0(\rho, \theta)$ на грань $\theta = \alpha$ клина, система (20) – случаю падения плоской волны $\varphi_0(\rho, \theta)$ на грань $\theta = -\alpha$. Коэффициент $F_{11}^{\text{ч}}(w)$ соответствует отражению плоской волны из I среды «назад» в I среду; $F_{12}^{\text{ч}}(w)$ соответствует преломлению плоской волны из II среды в I среду; $F_{21}^{\text{ч}}(w)$ соответствует преломлению плоской волны из I среды в II среду, коэффициент $F_{22}^{\text{ч}}(w)$ соответствует отражению плоской волны из II среды «назад» в II среду.

Системы рекуррентных уравнений для «нечетного» случая, полученные из системы (14), имеют структуру, аналогичную структуре систем (19), (20). Однако коэффициенты Френеля имеют противоположные знаки:

$$F_{11}^{\text{нч}}(w) = -F_{11}^{\text{ч}}(w); F_{12}^{\text{нч}}(w) = -F_{12}^{\text{ч}}(w); F_{21}^{\text{нч}}(w) = -F_{21}^{\text{ч}}(w); F_{22}^{\text{нч}}(w) = -F_{22}^{\text{ч}}(w).$$

Обозначим $F_{ij}^{\text{ч}} = F_{ij}$, тогда $F_{ij}^{\text{нч}} = -F_{ij}$, $i, j \in \{1, 2\}$.

Системы (19) и (20) позволяют аналитически продолжить функции $\Phi_{\Sigma}(w)$, $\Psi_{\text{геом}}(w)$ соответственно в полосы $|\text{Re } w| \leq \pi + \alpha$ и $|\text{Re } w| \leq 2\pi - \alpha$ для сред I и II.

Рассмотрим методику расчета геометрооптических угловых характеристик геометрических полей $\varphi_{\text{геом}}(\rho, \theta)$, $\psi_{\text{геом}}(\rho, \theta)$ отраженных и преломленных плоских ЭМВ соответственно в областях Γ_1 и Γ_2 , $\alpha \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$. Рассмотрим «четный» случай.

Функция $\Phi_0^{\text{ч}}(w)$, заданная выражением (17), – нечетная; имеет полюсы $\{\pm \theta_0\}$ в полосе $|\text{Re } w| \leq \alpha$. Вычеты в этих полюсах:

$$\text{res}_{w \rightarrow \pm \theta_0} \Phi_0^{\text{ч}}(w) = A \frac{\sin w}{(\cos w - \cos \theta_0)'} \Big|_{w=\pm \theta_0} = -A. \quad (21)$$

Функции $\Phi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$, $\Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$ мероморфны соответственно в полюсах $|\text{Re } w| \leq \pi + \alpha$, $|\text{Re } w| \leq 2\pi - \alpha$ [4] и имеют на основании (7), (9) представления в виде [7]:

$$\Phi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w) = Z_{\gamma k}(\varphi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(\rho, \theta)) = \sum_{n=1}^N C_n^p \frac{\sin w}{\cos w - \cos \theta_n^p}, \quad (22)$$

$$\Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w) = Z_k(\psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(\rho, \theta)) = \sum_{m=1}^M C_m^s \frac{\sin w}{\cos w - \cos \theta_m^s}, \quad (23)$$

$$\text{res}_{w \rightarrow \pm \theta_0} C \frac{\sin w}{\cos w - \cos \theta} = C \frac{\sin w}{(\cos w - \cos \theta)'} \Big|_{w=\pm \theta} = -C.$$

Функции $\Phi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$, $\Psi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w)$ – нечетные, их полюсы $\{\theta_n^p\}$, $\{\theta_m^s\}$ определяются из систем (19), (20) рекуррентным способом. Определим множество полюсов из системы (19), они соответствуют случаю попадания плоской волны $\varphi_0(\rho, \theta)$ от источника на «верхнюю» грань $\theta = \alpha$ (случай попадания $\varphi_0(\rho, \theta)$ на «нижнюю» грань $\theta = -\alpha$ определяется аналогично). Все полюсы $\{\theta_n^p\}$, $\{\theta_m^s\}$ – вещественные числа, они определяют полярные углы, которые задают направления распространения отраженных-преломленных плоских ЭМВ.

Множества полюсов содержатся в двух группах подмножеств:

$\{\Omega_k^p\}$ – соответствующее области Γ_1 и $\{\Omega_k^s\}$ – соответствующее Γ_2 , $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$. Сформируем [7] эти две группы подмножеств.

Подмножество

$$\Omega_0^p = \{w_0^p = -\theta_0\} \quad (24)$$

есть полюс функции $\Phi_0^{\text{ч}}(w)$, он соответствует плоской волне $\varphi_0^{\text{ч}}(\rho, \theta)$, падающей на грань $\theta = \alpha$, $\Omega_0^s = \{\emptyset\}$, так как в Γ_2 нет источника ЭМВ. Положим $w - \alpha = -\theta_0$, тогда $w = -\theta_0 + \alpha$, подставим его в первое уравнение (19). После этого из левой части (19) получим полюс функции $\Phi_{\text{геом}}^{\text{ч}}(w) \sum_{i=1}^n X_i^2$, образующий подмножество

$$\Omega_0^p = \{w_0^p = -\theta_0\}. \quad (25)$$

Подстановка $w = -\theta_0 + \alpha$ во второе уравнение (19) определяет из его левой части подмножество

$$\Omega_1^s = \{w_{1p}^s = -\bar{\alpha} + g(-\theta_0 + \alpha, \gamma)\}. \quad (26)$$

Теперь положим: $w_1^s = g(w, \gamma) - \bar{\alpha}$, $w = -\theta_0 + \alpha$, тогда

$$w = g^{-1}(\bar{\alpha} + w_1^s, \gamma) = g^{-1}(2\bar{\alpha} + g(-\theta_0 + \alpha, \gamma), \gamma), \quad (27)$$

полагаем $w_1^s = w_{1p}^s$.

Подставляя (27) и $w - \alpha = -\theta_0 + 2\alpha$ из (25) ($w = -\theta_0 + 3\alpha$) в первое уравнение (19), из его левой части получим соответственно полюсы

$$w_{2s}^p = \alpha + g^{-1}(2\bar{\alpha} + g(-\theta_0 + \alpha, \gamma), \gamma), \quad (28)$$

$$w_{2p}^p = -\theta_0 + 4\alpha, \quad (29)$$

образующие подмножество $\Omega_2^p = \{w_{2p}^p, w_{2s}^p\}$.

Имея $g(w, \gamma) - \bar{\alpha} = w_1^s$, $w - \alpha = w_1^p$, получим:

$$g(w, \gamma) = 2\bar{\alpha} + g(-\theta_0 + \alpha, \gamma); \quad w = -\theta_0 + 3\alpha. \quad (30)$$

Тогда, подставляя (30) во второе уравнение (19), из его левой части получим соответственно полюсы

$$\begin{aligned} w_{2s}^s &= 3\bar{\alpha} + g(-\theta_0 + \alpha, \gamma), \\ w_{2p}^s &= \bar{\alpha} + g(-\theta_0 + 3\alpha, \gamma), \end{aligned} \quad (31)$$

которые образуют подмножество $\Omega_2^s = \{w_{2p}^s, w_{2s}^s\}$ и т. д.

Таким образом, для любого $k = 0, 1, 2, \dots$ имеем подмножества комплексных полюсов, которые образуют бесконечную последовательность рекуррентных равенств [7]:

$$\begin{aligned} \Omega_k^p &= \{w_{pk}^p = 2\alpha + w_{k-1}^p, w_{k-1}^p \in \Omega_{k-1}^p\} \cup \\ &\cup \{w_{ks}^p = \alpha + g^{-1}(\bar{\alpha} + w_{k-1}^s, \gamma), w_{k-1}^s \in \Omega_{k-1}^s\}, k \in \mathbb{N}, \alpha \leq \operatorname{Re} w_k^p \leq \pi + \alpha; \\ \Omega_k^s &= \{w_{ks}^s = 2\bar{\alpha} + w_{k-1}^s, w_{k-1}^s \in \Omega_{k-1}^s\} \cup \\ &\cup \{w_{kp}^s = \bar{\alpha} + g(\alpha + w_{k-1}^p, \gamma), w_{k-1}^p \in \Omega_{k-1}^p\}, k \in \mathbb{N}, \\ &\bar{\alpha} \leq \operatorname{Re} w_k^s \leq \pi + \bar{\alpha}, \bar{\alpha} = \pi - \alpha. \end{aligned} \quad (32)$$

Выделим из построенных подмножеств $\{\Omega_k^p\}, \{\Omega_k^s\}, k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ комплексных полюсов конечные множества вещественных полюсов $\{\theta_n^p\} \subset \{\Omega_k^p\}, \{\theta_m^s\} \subset \{\Omega_k^s\}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}$. Для того чтобы полюсы из подмножеств (32) были вещественны, необходимо и достаточно, чтобы $g(w, \gamma), g^{-1}(w, \gamma) \in R$ (т. е. выполнялись неравенства:

$$|\gamma \cos w| \leq 1, \left| \frac{1}{\gamma} \cos w \right| \leq 1)$$

в соответствующих рекуррентных равенствах. Эти условия равносильны тому, что если в подмножествах (32) выполняются неравенства:

$$|\gamma \cos(-\theta_0 + \alpha)| \leq 1, \quad (33)$$

$$|\gamma \cos(\alpha + w_{k-1}^p)| \leq 1, \quad (34)$$

$$\left| \frac{1}{\gamma} \cos(\bar{\alpha} + w_{k-1}^s) \right| \leq 1, \quad (35)$$

то при выполнении (34), (35) соответственные полюсы вещественны, т. е. $w_{kp}^s = \theta_{kp}^s$, $w_{ks}^p = \theta_{ks}^p$, а при выполнении (33) – $w_{kp}^p = \theta_{kp}^p$, $w_{ks}^s = \theta_{ks}^s$. Таким образом, формирование вещественных полюсов равенствами (32) продолжается до тех пор, пока не появится первый комплексный полюс, удовлетворяющий одному из неравенств:

$$|\gamma \cos(-\theta_0 + \alpha)| > 1, \quad (36)$$

$$|\gamma \cos(\alpha + w_{k-1}^p)| > 1, \quad (37)$$

$$\left| \frac{1}{\gamma} \cos(\bar{\alpha} + w_{k-1}^s) \right| > 1. \quad (38)$$

Полюсы θ_{kp}^p и θ_{ks}^s соответствуют плоским ЭМВ, распространяющимся в среде I и среде II соответственно и отраженным (переотраженным) в «свою» среду. Полюсы θ_{kp}^s и θ_{ks}^p соответствуют плоским ЭМВ, распространяющимся в среде I и среде II соответственно и преломленным в «противоположную» среду.

Выполнение равенств (33)–(35) обуславливает распространение соответствующих преломленных плоских ЭМВ вдоль граней клина в среде I или среде II (т. е. имеет место случай угла Брюстера).

При появлении первого комплексного полюса, удовлетворяющего одному из неравенств (36)–(38), преломления плоской ЭМВ в противоположную среду уже не происходит. Значит, неравенства (36)–(38) являются критериями полного внутреннего отражения плоской ЭМВ в соответствующую среду. Следует отметить, что переменная w , удовлетворяющая неравенству $|\gamma \cos w| > 1$ или неравенству $\left| \frac{1}{\gamma} \cos w \right| > 1$, попадает на один из разрезов комплексной

плоскости $C(\gamma)$ или $C\left(\frac{1}{\gamma}\right)$ [4, 8] соответственно. Таким образом, разрезы комплексных

плоскостей $C(\gamma)$ и $C\left(\frac{1}{\gamma}\right)$ являются «фильтрами» комплексных полюсов (плоскости $C(\gamma)$ и

$C\left(\frac{1}{\gamma}\right)$ есть области задания функций $g(w, \gamma)$ и $g^{-1}(w, \gamma)$ соответственно).

Полюсы, определяемые системой (20) (падение $\varphi_0(\rho, \theta)$ на грань $\theta = -\alpha$), находятся из тех же рекуррентных равенств (32) при замене α на $-\alpha$, $\bar{\alpha}$ на $-\bar{\alpha}$ ($\bar{\alpha} = \pi - \alpha$). При этом

$$-\pi - \alpha \leq \operatorname{Re} w_k^p \leq -\alpha, \quad -\pi - \bar{\alpha} \leq \operatorname{Re} w_k^s \leq -\bar{\alpha},$$

и выполняются условия (33)–(35), в которых α и $\bar{\alpha}$ меняются на $-\alpha$, $-\bar{\alpha}$.

В общем случае полученные вещественные полюсы θ_n^p определяют полярные углы $\hat{\theta}_n^p = (-1)^n (\pi - \theta_n^p)$ отраженных и преломленных плоских ЭМВ в среде I. Полученные вещественные полюсы θ_m^s определяют полярные углы $\hat{\theta}_m^s = (-1)^m \theta_m^s$ отраженных и преломленных плоских ЭМВ в II среде (рис. 2). Полярные углы $\hat{\theta}_n^p$, $\hat{\theta}_m^s$ есть геометрические угловые характеристики плоских ЭМВ геометрического поля дифракции.

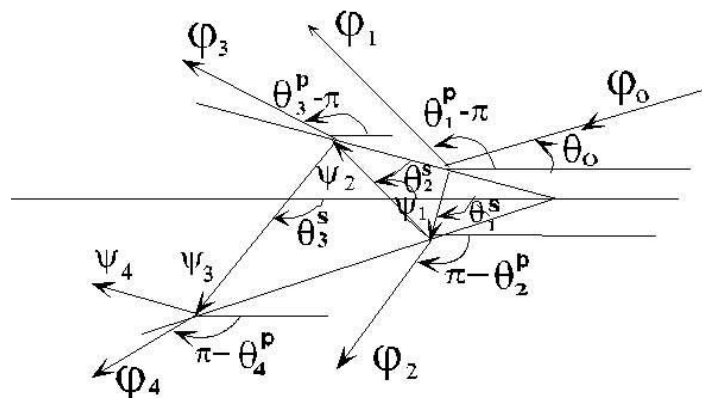


Рис. 2. Полярные углы отраженных и преломленных плоских ЭМВ в средах I и II

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методы расчета полей дифракции плоских электромагнитных волн, возбуждаемых гранями диэлектрического клина, позволяют произвести исследования радиофизических характеристик радиопрозрачных клиновидных структур как основных элементов различных типов радиотехнических устройств. В частности, периодических радиопрозрачных клиновидных структур, которые могут быть эффективно использованы при решении задач уменьшения радиолокационной заметности объектов локации.

Методика расчета полей дифракции плоских ЭМВ на диэлектрических периодических клиновидных структурах с поглощающим основанием и потерями в диэлектрике (рис. 3) может служить основой для построения систем радиопоглощающих экранов с диэлектрическими (радиопрозрачными) клиновидными образованиями в их вертикальных сечениях.

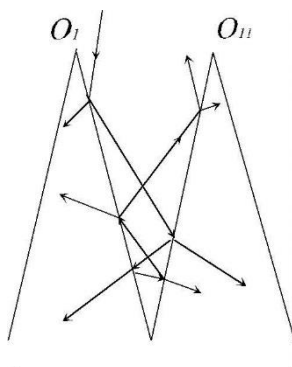


Рис. 3. Лучевая структура преломленных и отраженных волн в клиновидной структуре с потерями в диэлектрике и поглощающей подложке

Указанные радиопоглощающие структуры имеют очевидные достоинства:

- возможность минимизации эффективной площади рассеивания (ЭПР) периодической радиопрозрачной клиновидной структуры за счет формирования оптимальных угловых характеристик геометрического поля отраженных и преломленных гранями плоских ЭМВ;
- наличие эффекта полного внутреннего отражения плоских волн внутри диэлектрического клина (призмы);
- возможность введения потерь в диэлектрике, приводящих к быстрому затуханию волн;
- возможность построения периодической клиновидной структуры на поглощающей подложке, препятствующей возникновению обратного хода лучей внутри диэлектрической клиновидной структуры;
- незначительная напряженность поля дифракции на ребре клина падающей плоской волны в направлении на источник локации;
- отсутствие поверхностных волн, возбуждаемых ребром клина.

При этом для успешной реализации указанных технических приложений требуется знать геометрооптические угловые характеристики всех отдельных видов плоских ЭМВ, возбуждаемых гранями радиопрозрачных клиновидных структур во внутренней и внешней угловых областях.

Список используемых источников

1. Малюжинец Г.Д. Интегралы Зоммерфельда и их приложение. – Д.: ЛЦНИИ «Румб», 1981. – 31 с.

2. *Бобровников М.С., Фисанов В.В.* Дифракция волн в угловых областях. – Томск, 1988. – 430 с.
3. *Завадский В.Ю.* Вычисление волновых полей в открытых областях и волноводах. – М.: Наука, 1972. – 558 с.
4. *Будаев Б.В.* Дифракция упругих волн на свободном клине // ЛОМИ препринт Е-2-90. – Л., 1990. – 36 с.
5. *Лихачев В.М., Сташкевич А.И.* Метод Зоммерфельда – Малюжинца в задачах дифракции электромагнитных волн на клиновидных структурах (единый подход) // Радиотехника РАН. – 1999. – №8. – С. 62–65.
6. *Лихачев В.М., Крячко А.Ф., Сташкевич А.И.* Теория дифракции электромагнитных волн на клиновидных структурах и ее приложения к проблемам радиолокации и радиосвязи // Труды XVI-XIX Всерос. симп. «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2002. – Вып. 2. – С. 200–208.
7. Теория рассеяния электромагнитных волн в угловых структурах / А.Ф. Крячко, В.М. Лихачев, С.Н. Смирнов, А.И. Сташкевич. – СПб.: Наука, 2009. – 194 с.
8. *Булекбаев Д.А., Лихачев В.М., Проданец В.А.* Дифракция электромагнитных волн на радиопрозрачных клиновидных телах в задачах прикладной электродинамики и радиолокации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – Вып. 671. – С. 103–113.

С.О. Бурлаков,

доктор техн. наук, профессор

Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург;

И.С. Климов

Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург;

К.Ю. Цветков,

доктор техн. наук, профессор

ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ РЕТРАНСЛЯТОРА СВЯЗИ ПРИ РАБОТЕ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ С ПАРЦИАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Рассматривается эффективность и особенности распределения частотного ресурса ствола с прямой ретрансляцией для нужд военных потребителей. Предлагается структура земной станции с парциальными каналами, позволяющая повысить коэффициент использования частотного ресурса ретранслятора и помехоустойчивость радиолиний. Изложены решения по разделению информационного потока на парциальные каналы и обеспечению баланса мощностей каналов на выходе усилителя мощности.

Ключевые слова: распределение частотного ресурса ретранслятора; земная станция; парциальный канал; деление информационного потока; распределение мощности усилителя.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА РЕТРАНСЛЯТОРА

Объем передаваемой информации в сети спутниковой связи зависит от качества распределения ресурса пропускной способности ретранслятора. При организации сети в стволе с прямой ретрансляцией коэффициент использования частотного ресурса ретранслятора [1]

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ЗС}} \Delta f_i}{\Delta f_{\text{ств}}},$$

где Δf_i – полоса частот ствола ретранслятора, выделенная для сигнала i -й земной станции (ЗС);

$\Delta f_{\text{ств}}$ – полоса пропускания ствола;

$N_{ЗС}$ – количество ЗС, работающих в стволе.

При плотном заполнении ствола сигналами ЗС K_f меньше единицы и уменьшается с увеличением $N_{ЗС}$ вследствие наличия защитных интервалов между соседними по спектру частот сигналами, наличия защитных интервалов по краям ствола на эффект Доплера, особой расстановки частот, уменьшающей взаимные помехи, и т. д.

До 2015 года распределение полосы частот ствола ретранслятора для нужд военных потребителей учитывало следующую специфику:

- скорость передачи ЗС может достигать 480 кбит/с;
- ЗС занимают ресурс ретранслятора на долговременной основе в соответствии с результатами централизованного планирования;
- количество ЗС, работающих в стволе, может быть до 100 штук, что в несколько раз превосходит количество ЗС при ретрансляции телевизионных сигналов;
- ЗС излучает сигнал на сеансовой основе, что определяется регламентом деятельности пункта управления войсками, в частности его перемещением.

Указанные обстоятельства определили подход к распределению ресурса ствола: разделить $\Delta f_{\text{ств}}$ на полосы приблизительно по 500 МГц, в каждой полосе работает одна ЗС. Ни количество работающих ЗС, ни фактическая скорость их передачи при этом не учитываются. Коэффициент

использования полосы частот будет меняться от 0,0024 (скорость передачи 1,2 кбит/с) до 0,96 (скорость передачи 480 кбит/с).

Несмотря на низкий K_f ствола, подобный подход имеет очевидное достоинство. Так как плотная нарезка полосы частот не проводится, то при изменении количества ЗС и скорости их передачи нет необходимость перестраивать работающие ЗС по частоте с перерывом связи.

С 2015 года используются ЗС со скоростью передачи до 2 Мбит/с, что при вышеуказанном распределении приводит к чрезмерно низкому K_f . В статье предложен способ повышения K_f ствола с прямой ретрансляцией с учетом изменения количества ЗС и скорости их передачи без перестройки по частоте работающих ЗС.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЗС С ПАРЦИАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Для решения поставленной задачи необходима ЗС, способная разделять входящий абонентский поток со скоростью передачи V [бит/с] на M парциальных потоков со скоростями передачи V_i , $i = 1, \dots, M$, формировать и одновременно излучать парциальные радиосигналы в полосах Δf_i на несущих частотах f_i . Количество парциальных потоков M определяется каждый раз путем анализа количества свободных частотных полос ствола, их ширины Δf_i и центральных частот f_i . Структурная схема ЗС представлена на рис. 1 и 2.

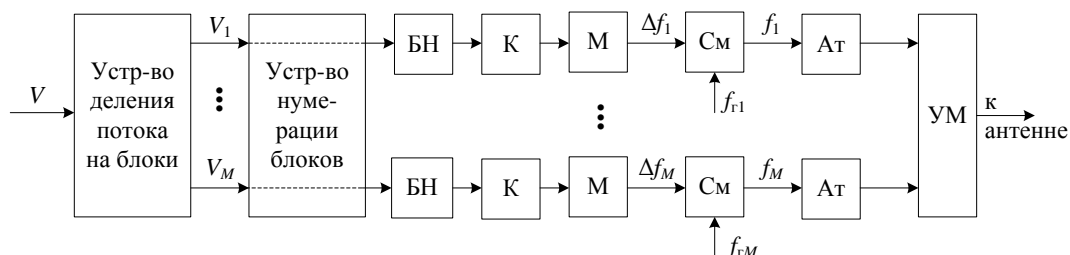


Рис. 1. Структурная схема передающего тракта ЗС с M парциальными каналами

Устройство нумерации блоков формирует и добавляет номер к каждому блоку для правильного порядкового их объединения на приеме. Буферный накопитель (БН) согласует скорость информационного потока и скорость передачи парциального канала. После канального кодирования (К) и модуляции (М) несущее колебание переносится смесителем (См) на рабочую частоту f_i . Атенуаторы на выходе парциальных каналов устанавливают баланс мощностей сигналов на входе усилителя мощности ЗС.

Многочастотный радиосигнал, являющийся совокупностью парциальных сигналов, принимается маломощным усилителем (МШУ) (рис. 2), который определяет коэффициент шума приемных трактов. Радиосигнал требуемого парциального канала выделяется полосовым фильтром (ПФ), переносится смесителем (СМ) на промежуточную частоту (ПЧ), демодулируется (Дм), декодируется (Дк) и через буферные накопители (БН) подается на устройство объединения блоков для формирования абонентского потока.

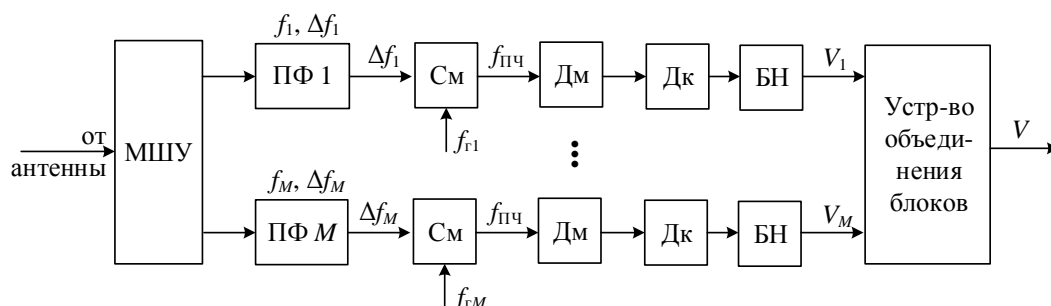


Рис. 2. Структурная схема приемного тракта ЗС с M парциальными каналами

Тракты передачи и приема парциальных каналов реализуются программно методами цифровой обработки сигналов, а их количество может исчисляться десятками [2].

ДЕЛЕНИЕ АБОНЕНТСКОГО ПОТОКА НА ПАРЦИАЛЬНЫЕ КАНАЛЫ НА ПЕРЕДАЧЕ И ЕГО СБОРКА НА ПРИЕМЕ

Для корректного объединения информации, передаваемой по парциальным каналам, необходимо пронумеровать блоки при делении потока на передаче. При выполнении этой задачи предлагается использовать механизмы протокола ТСП (*Transmission Control Protocol*), оставляя нужные поля заголовка пакета (64 бита или 8 байт):

- порт источника (*Source Port*, 16 бит) идентифицирует парциальный канал, по которому отправлены пакеты, служит для оценки качества канала;
- порт назначения (*Destination Port*, 16 бит), на который отправлен пакет, идентифицирует земную станцию;
- порядковый номер пакета (*Sequence Number*, 32 бит) используется для сборки данных на приеме.

При установлении соединения ТСП в качестве изначального порядкового номера будет сгенерировано 32-битное число от 0 до 4294967295, которое будет соответствовать времени, прошедшему после перегрузки системы отправителя, а также увеличенное на 64000 каждый раз при установлении нового соединения. Так как сгенерированное число будет уникальным для периода времени почти в пять часов (если при этом никакие соединения не устанавливались), то такой подход к выбору порядкового номера позволяет избежать случайных коллизий при передаче данных, когда для нескольких пакетов из разных соединений будет совпадать порядковый номер. Это позволяет принимающей системе обрабатывать пакеты в правильной последовательности, как они были сформированы при отправлении, а не в том порядке, как они были получены.

После заголовка пакета следует поле данных (*Data*, 46–1500 байт), длина и формирование которого соответствуют процедурам Ethernet [3].

Внесенная избыточность в передаваемую информацию каждого парциального канала будет небольшой и составит от $8/(8+46) = 0,15$ до $8/(8+1500) = 0,005$.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ВЫХОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ МЕЖДУ ПАРЦИАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

Усилитель мощности ЗС реализуется аппаратно и является общим для всех парциальных каналов. Так как скорость передачи парциальных каналов V_i различна, то для достижения одинаковой вероятности ошибочного приема бита необходимо обеспечить разную мощность их излучения.

Зная допустимую вероятность ошибки приема бита, вид модуляции и кодирования, которые, в общем случае, являются общими для всех парциальных каналов, можно определить требуемое общее значение $h^2 = P_c/P_{ш}$ на входе демодуляторов парциальных каналов.

В i -м парциальном канале мощность шума зависит от скорости передачи через Δf_i – полосу частот сигнала:

$$P_{ши} = n_{ш} k T_0 \Delta f_i,$$

где $n_{ш}$ – коэффициент шума приемника, определяемый малошумящим усилителем, общим для всех парциальных каналов, а $k T_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц.

Для i -го и j -го парциальных каналов

$$h^2 = P_{ci} / P_{ши} = P_{cj} / P_{шиj},$$

откуда баланс мощностей излучаемых сигналов будет следующим: $P_{ci} / P_{cj} = \Delta f_i / \Delta f_j = V_i / V_j$.

Выходной усилитель работает в многосигнальном режиме. Его мощность делится между парциальными каналами в соответствии с балансом их мощностей на его входе. Выходная мощность i -го парциального канала [1]

$$P_{\text{вых } i} = P_{\text{УМ}} \frac{P_{\text{вх } i}}{\sum_{j=1}^M P_{\text{вх } j}} = P_{\text{УМ}} \frac{V_i}{\sum_{j=1}^M V_j},$$

где $P_{\text{УМ}}$ – мощность усилителя;

$P_{\text{вх } i}$ – мощность i -го парциального канала на входе усилителя.

Предложенная ЗС с парциальными каналами, кроме повышения коэффициента использования частотного ресурса ретранслятора, позволит повысить помехоустойчивость радиолиний в случае дублирования передаваемой информации в парциальных каналах, а также организовывать сети спутниковой связи, используя парциальные каналы в качестве отдельных направлений связи.

Список используемых источников

1. Кантор Л.Я. Спутниковая связь и вещание: справочник. – М.: Радио и связь, 1997. – 528 с.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
3. Олифер В.Г. Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 864 с.

Е.А. Викторов,

кандидат техн. наук

ВКА имени А.Ф. Можайского;

А.Н. Иванин*;

А.К. Канаев*,

доктор техн. наук, профессор

*Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ СЕТЕВЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК

Разработана методика обеспечения интегрального показателя устойчивости функционирования транспортной сети связи специального назначения в условиях реализации сетевых и компьютерных атак. Идентифицированы мероприятия, позволяющие обеспечить требуемый уровень устойчивости путем повышения объектовой и сетевой живучести в условиях сетевых и компьютерных атак.

Ключевые слова: методика, алгоритм, интегральный показатель устойчивости, надежность, живучесть, функционирование транспортной сети связи специального назначения, коэффициент оперативной готовности.

ВВЕДЕНИЕ

Конечной целью функционирования транспортной сети связи специального назначения (ТСССН) является не факт доставки сообщения адресату, а обеспечение услуг переноса и распределения разнородного типа трафика с заданным качеством, в том числе и в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий типа сетевая или компьютерная атака. Такие воздействия снижают качество предоставляемых услуг посредством создания дополнительной (нештатной) нагрузки на элементы ТСССН [1]. Внешний и внутренний, относительно элементов ТСССН, характер дестабилизирующих воздействий приводит к необходимости использования для оценки уровня информационной безопасности интегрального показателя, характеризующего способность сети выполнять свои функции при выходе из строя части элементов. Таким показателем является устойчивость. Внутренние дестабилизирующие воздействия отражены в показателях надежности, внешние – в показателях живучести сети.

Исследованию устойчивости функционирования сетей связи посвящено достаточное количество работ отечественных авторов: И.А. Мизина, В.А. Богатырева, А.Т. Лебедева, Б.П. Филина, Б.Я. Дудника, Г.Б. Давыдова, В.Н. Рогинского, А.М. Лихачева, В.Е. Кузнецова, В.А. Нетеса и др. Анализ этих работ показал, что в большинстве своем они направлены на разработку методик повышения устойчивости функционирования и синтеза оптимальных структур в результате дестабилизирующих воздействий внешнего и внутреннего характера.

В специальной литературе под внешними дестабилизирующими воздействиями, в части касающейся субъективных источников, расположенных вне сети, понимаются те, которые воздействовали на систему механически или с помощью электромагнитных, ионизирующих и термических возмущений, выделяющих энергию и приводящих к поражению инфраструктуры сети. Данные методы повышения устойчивости функционирования сетей связи с учетом воздействия дестабилизирующих факторов не затрагивают особенности реализации сетевых и компьютерных атак.

Применительно к исследованиям процесса функционирования сетей связи в условиях информационного противоборства были проведены исследования в работах таких авторов, как А.М. Коцыняк, Ю.И. Стародубцев, О.И. Шелухин, Д.С. Лаврова. Анализ последних показал, что объектом исследования, как правило, являются либо узлы связи и информационный обмен внутри объектов, без учета телекоммуникационного оборудования ТСССН и фактора распределенности сети, либо промышленные системы с сетевым трафиком, начиная с сетевого уровня и заканчивая прикладным.

Кроме того, необходимо учитывать интегрированный характер построения ТСССН, заключающийся в использовании транспортной среды сетей связи общего пользования, не принадлежащих оценщику и являющихся объективно не доверенными.

Подводя итог, можно сделать вывод, что для систем военной связи экономические, эргономические и ряд других системотехнических факторов не являются определяющими. Таким образом, исходя из анализа полученных вероятностно-временных характеристик функционирования ТСССН возникает необходимость:

- 1) оценки показателей устойчивости ТСССН применительно к решаемой задаче;
- 2) сравнения полученных значений показателей с требованиями регламентирующих документов;
- 3) выработки и реализации научно-технических предложений по обеспечению устойчивости функционирования для конкретной информационной сферы ТСССН.

МЕТОДИКА

Согласно работе [2] устойчивость декомпозируется на следующие компоненты: надежность ТСССН, обусловленная возникновением и воздействием внутрисистемных ДФ, показателем которой является коэффициент готовности K_r ; живучесть как способность сохранять функциональные характеристики в условиях внешних воздействий, показателем которой является коэффициент оперативной готовности ТСССН $K_{ог}$.

В свою очередь, коэффициент готовности элементов ТСССН (узлов и линий связи) будет определяться выражением

$$K_r = \frac{\bar{T}_{\text{HNO}} - \bar{T}_B}{\bar{T}_{\text{HNO}}} \quad (1)$$

В этой формуле \bar{T}_{HNO} есть среднее время наработки на отказ, а \bar{T}_B – среднее время восстановления. К тому же учет того, что все элементы ТСССН являются высоконадежными и среднее время реализации сетевых и компьютерных атак \bar{T}_A на несколько порядков меньше, чем заявленное производителями телекоммуникационного оборудования среднее время наработки на отказ $\bar{T}_{\text{HNO}} \gg \bar{T}_A$, позволяет использовать стационарный коэффициент готовности, требования к которому представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические нормы показателей надежности сети электросвязи

Тип сети электросвязи	Наименование показателя	Норма, не менее
Сеть междугородной и международной телефонной связи	Коэффициент готовности K_r	0,999
Сеть зонной телефонной связи		0,9995
Сеть местной телефонной связи		0,9999
Телеграфная сеть электросвязи и сеть. Телекс		0,9999
Сеть передачи данных		0,99

Критерии надежности (коэффициент готовности) оборудования сети связи задаются на уровне $K_{г.оборуд.} \geq 0,995$, а коэффициент готовности ТСССН в целом задается на уровне $K_{г} \geq 0,99$ [2].

В условиях реализации сетевых и компьютерных атак коэффициент оперативной готовности определяется выражением

$$K_{ог} = K_{г} P_{БР}, \quad (2)$$

где $P_{БР}$ есть вероятность нахождения элемента ТСССН в состоянии защищенности от заданного множества сетевых и компьютерных атак, в котором обеспечивается штатное состояние системы [3].

В качестве критериев оценки устойчивости функционирования ТСССН в условиях реализации сетевых и компьютерных атак используются требования к живучести, которые в условиях априорной неопределенности модели воздействия на ТСССН задаются в соответствии с прогнозируемым уровнем ущерба согласно табл. 2 [2].

Таблица 2

Требования к живучести основных направлений связи

Уровень ущерба	Ущерб сети связи, наносимый воздействием внешних ДФ, %	Коэффициент оперативной готовности направлений связи для различных категорий спецпотребителей $K_{ог}$			Коэффициент оперативной готовности для каналов связи обычных потребителей
		1	2	3	
Высокий	До 50	0,80	0,75	0,7	-
Средний	До 30	0,85	0,80	0,75	-
Низкий	До 10	0,9	0,85	0,8	0,8

Расчетный коэффициент оперативной готовности сравнивается с требованиями согласно неравенству

$$K_{ог} \geq K_{ог.треб.}, \quad (3)$$

где $K_{ог}$ – рассчитанный обобщенный показатель, характеризующий устойчивость функционирования конкретной сети связи в условиях реализации сетевых и компьютерных атак и определяемый на основе методики;

$K_{ог.треб.}$ – требуемое (заданное) значение показателя устойчивости функционирования сети связи, определяемое требованиями к живучести [4].

Таким образом, оценка показателей $K_{ог}$ будет включать в себя следующие этапы:

1. Идентификация мощности $|S| = \text{card}(S) = n$ множества $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ сетевых и компьютерных атак в проекции на сквозную архитектуру защиты [5] и с учетом частной модели угроз информационной безопасности (ЧМУИБ), разрабатываемой согласно алгоритму, основанному на руководящих документах ФСТЭК России [6] и представленному на рис. 1.

В отличие от известных нормативных документов [7, 8] и закрепленных в них подходов к идентификации компьютерных и сетевых атак, которые в основном направлены на

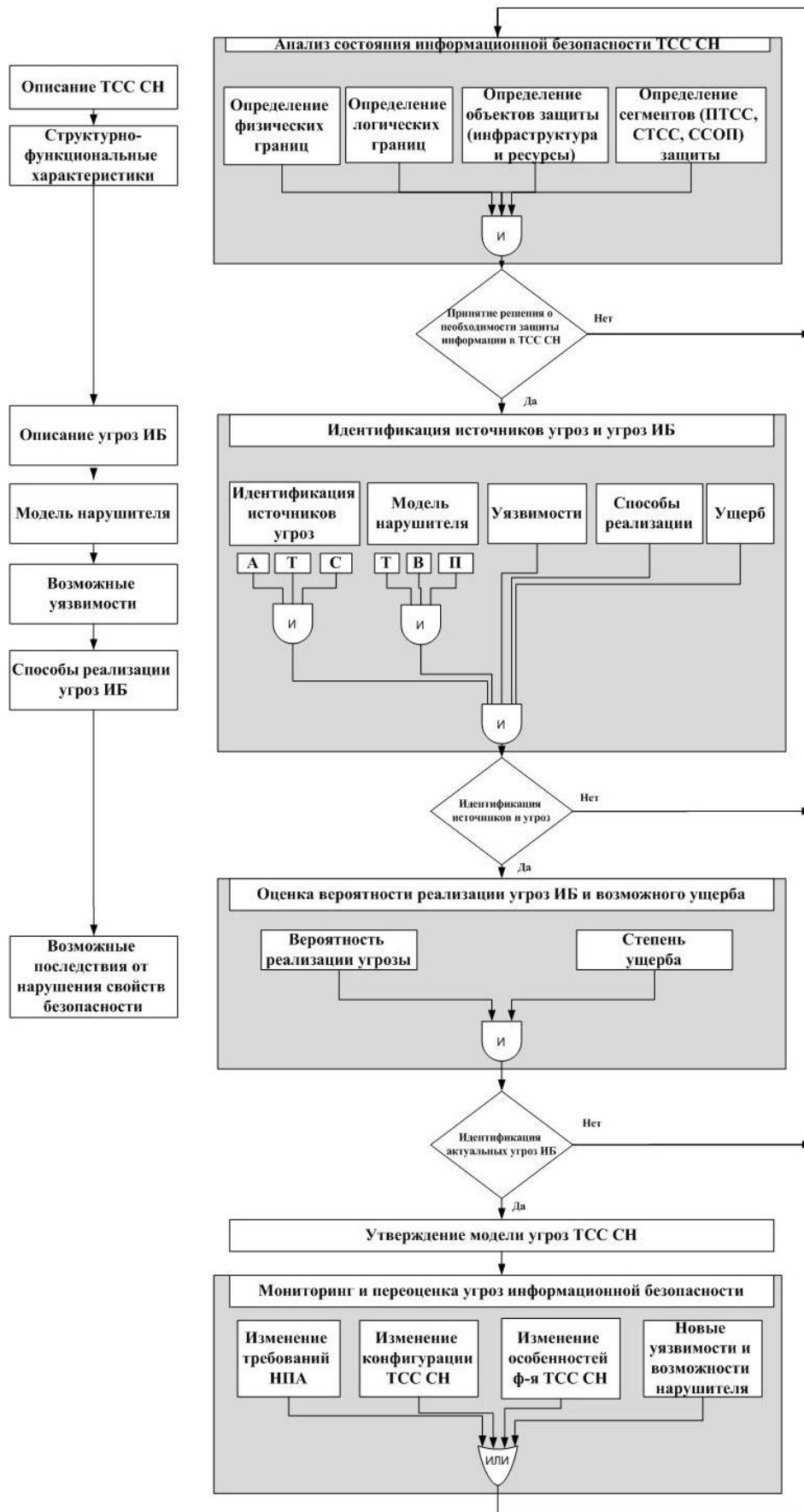


Рис. 1. Алгоритм составления модели угроз

объекты информатизации и только очень поверхностно учитывают особенности функционирования подсистем и основных технологий ТСССН, проекция фаз реализации атак, представленных на рис. 2, на сквозную архитектуру защиты позволит создать условия для идентификации компьютерных и сетевых атак применительно к уровням защиты инфраструктуры, услуг и приложений.

В то же время разработка ЧМУИБ ТСССН позволит оценить опасность угроз, возникающих в результате реализации сетевых и компьютерных атак для каждой группы идентифицированных ресурсов, структуры ТСССН, услуг, а также определить потенциал нарушителя и сформировать исходные данные для моделирования функционирования ТСССН в виде среднего времени и вероятности выполнения отдельных фаз реализации атак.

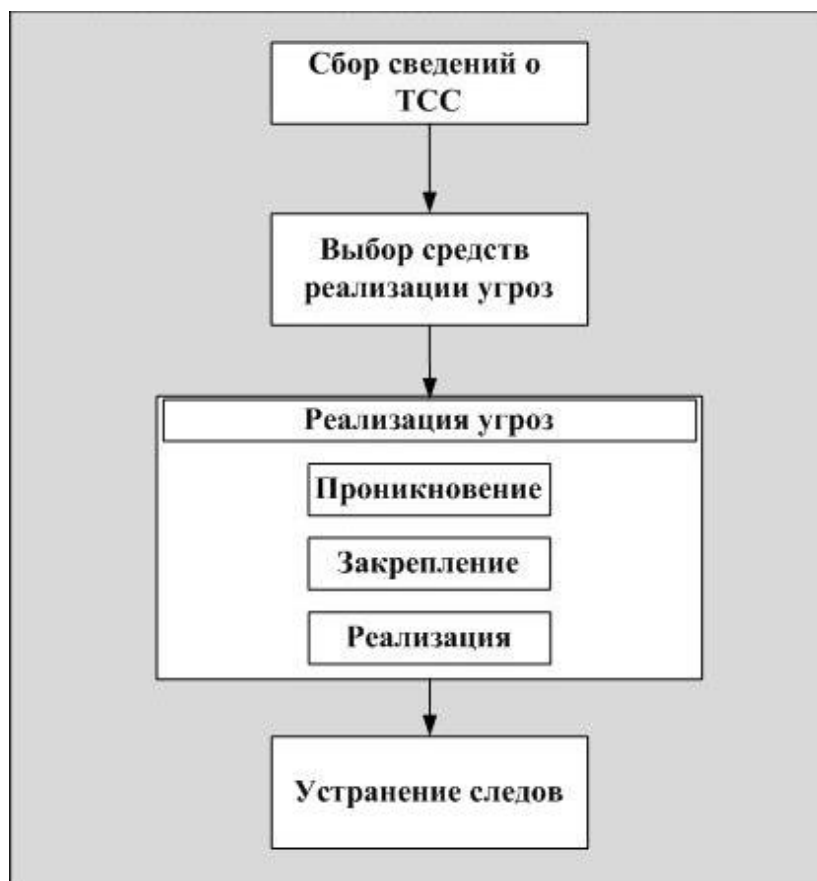


Рис. 2. Схема реализации атак

2. Формирование аналитических моделей, основанных на процедуре GERT и методе топологического преобразования стохастических сетей [9] для определения вероятностно-временных характеристик (ВВХ): \bar{T}_A , $P_{PA}(t)$ функционирования элементов (узлов и линий связи) ТСССН в условиях реализации сетевых и компьютерных атак на уровне защиты инфраструктуры, услуг и приложений. На основе полученных значений функции распределения вероятности ущерба

$$P_{PA} = 1 - P_{BP}$$

в течение времени воздействия t применительно к уровням защиты инфраструктуры, услуг и приложений элементов ТСССН определяются показатели коэффициента оперативной готовности узлов и линий связи согласно формуле (2).

3. Формирование имитационной модели функционирования ТСССН с учетом реализации сетевых и компьютерных атак, направленных на нарушение свойств конфиденциальности, целостности и доступности информационной сферы (инфраструктуры и ресурсов сети). В том случае, если мощность множества

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$$

идентифицированных сетевых и компьютерных атак $n \geq 10$, то ввиду больших вычислительных затрат в ходе применения аналитических моделей целесообразно использовать имитационную модель в среде Any Logic, обладающую свойствами масштабирования, позволяющую наблюдать процесс реализации атак в динамике и обеспечивающую требуемую точность эксперимента за счет варьирования количества итераций.

4. Оценка точности, проверка на адекватность, устойчивость и чувствительность имитационной модели.

5. Сбор данных и определение значений $K_{ог}$ элементов ТСССН в условиях реализации сетевых и компьютерных атак, имитированных с помощью модели.

6. Формирование имитационной модели расчета живучести ТСССН с учетом реализации сетевых и компьютерных атак на основе автоматизированной системы поддержки принятия решений «Архитектор сетей» и заложенного в ней метода статистических испытаний Монте-Карло. Суть метода сводится к проведению имитации поражения элементов сети и проверки целостности сети (наличие остового дерева). В случае наличия такого дерева в произведенной итерации начисляется «1», в случае отсутствия – «0». Таким образом, в результате проведения множества итераций накапливается статистика об успешных исходах. Соотнеся его с количеством итераций можно получить среднее значение успешных итераций. Исходя из теории вероятности, при стремлении числа итераций к бесконечности, среднее значение успешных итераций будет стремиться к вероятности надежной работы сети.

7. Проверка соответствия полученных значений $K_{ог}$ нормативным требованиям. Блок-схема методики оценки показателя устойчивости ТСССН представлена на рис. 3.

Методика позволяет производить расчет значений обобщенного показателя эффективности функционирования систем связи в виде коэффициента оперативной готовности, показывающего способность ТСССН в течение определенного времени выполнять свои функции в условиях реализации сетевых и компьютерных атак.

Однако вычисление значений обобщенного показателя не является самоцелью, так как в лучшем случае позволяет ответить на вопрос «Соответствует ли эффективность моделируемой системы связи заданным требованиям?». Наиболее же ценными результатами являются те, которые позволяют установить возможные причины недостаточно высокой эффективности функционирования системы связи или ее элементов [9].

Сложность решения данной задачи обусловлена тем, что монотонно убывающая функция $K_{ог}(t)$, из которой определяются значения обобщенного показателя, имеет экстремум только при значениях текущего аргумента t , а наложение критериальных условий на значение самой функции или ее аргумента не позволяет получать приемлемые с практической точки зрения решения. Поэтому возникает необходимость определения степеней зависимости обобщенного показателя эффективности от значений и диапазонов возможного изменения частных показателей, используемых при моделировании в качестве исходных данных.

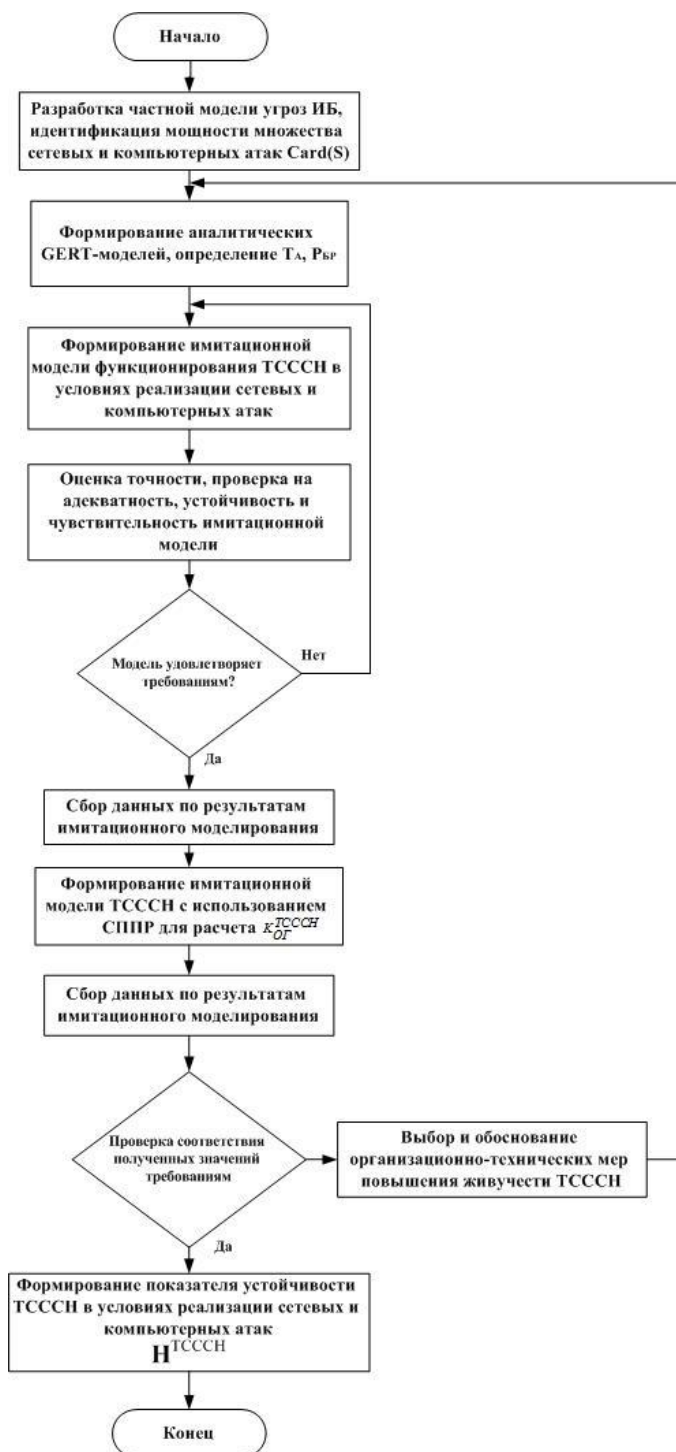


Рис. 3. Блок-схема методики оценки устойчивости функционирования ТСССН

Объектом анализа является моделируемый процесс функционирования ТСССН в условиях реализации сетевых и компьютерных атак. В качестве показателя степени зависимости обобщенного показателя эффективности выбрано приращение значений коэффициента оперативной готовности $\Delta K_{og}(t^{треб})$ за время не более требуемого $t^{треб}$.

Рассмотрим процесс доступа к инфраструктуре ТСССН. Здесь P_i – частные показатели, используемые при моделировании в качестве исходных данных [в данном случае это вероятности доступа к оптическому волокну, оптическому мультиплексору ввода-вывода OADM,

линейному оптическому усилителю (ЛОУС) и волоконно-оптическому кабелю (ВОК)]. Исходными данными, помимо используемых при моделировании частных показателей, являются также и диапазоны возможного изменения ΔP_i , определяемые как разность их конечного P_{ik} и начального значений, т. е. $\Delta P_i = P_{ik} - P_{in}$. Например, если i -м частным показателем является вероятность успешного доступа к оптическому кабелю, изменяющаяся от 0,1 до 0,5 в зависимости от потенциала нарушителя и системы обеспечения ИБ, то

$$\Delta P_{\text{ВОК}} = P_{\text{ВОКк}} - P_{\text{ВОКн}} = 0,4.$$

Требуется определить максимальные степени зависимости значений вероятности нахождения объекта воздействия в состоянии информационной безопасности в условиях реализации сетевых и компьютерных атак за время не более заданного от значений и диапазонов изменений указанных параметров:

$$A_i = \max f(\Delta K_{og}(t)_{P_i}). \quad (4)$$

Так как для нахождения максимальных степеней A_i не требуется высокой точности определения значений приращений целевой функции в зависимости от изменения ее аргументов, а необходимы лишь знак этого приращения и номер соответствующего ему аргумента, то с целью уменьшения объема и времени вычислений для решения задачи целесообразно воспользоваться градиентным методом Гаусса – Зейделя [9].

Для определения меры скорости изменения коэффициента оперативной готовности $K_{og}(t)$ относительно $P_{\text{ВОК}}$ с учетом того, что $P_{\text{ОВ}}$, $P_{\text{ЛОУС}}$, P_{OADM} постоянны, найдем предел:

$$\lim_{\Delta P_{\text{ВОК}} \rightarrow 0} \frac{K_{og}(t, P_{\text{ВОК}} + \Delta P_{\text{ВОК}}, P_{\text{OADM}}, P_{\text{ОВ}}, P_{\text{ЛОУС}}) - K_{og}(t, P_{\text{ВОК}}, P_{\text{OADM}}, P_{\text{ОВ}}, P_{\text{ЛОУС}})}{\Delta P_{\text{ВОК}}}. \quad (5)$$

Применяя теорему Лагранжа [10] при условии аналитичности и существования в каждой точке P_i предела получим

$$\Delta K_{og}(t, P_{\text{ВОК}}, P_{\text{OADM}}, P_{\text{ОВ}}, P_{\text{ЛОУС}}) = \frac{dK_{og}(t, P_{\text{ВОК}}, P_{\text{OADM}}, P_{\text{ОВ}}, P_{\text{ЛОУС}})}{dP_{\text{ВОК}}} \Delta P_{\text{ВОК}} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2. \quad (6)$$

Применяя формулу (6) для $P_{\text{ОВ}}$, $P_{\text{ЛОУС}}$, P_{OADM} , в результате расчетов получим семейство функций приращения обобщенного показателя эффективности, представленное на рис. 4.

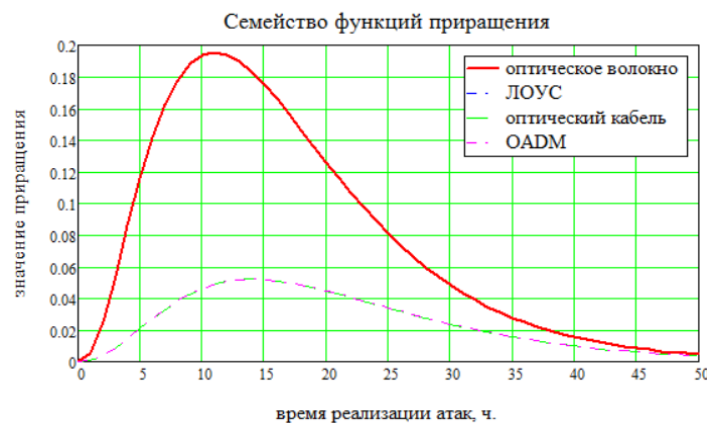


Рис. 4. Семейство функций приращения

Как видно из рис. 4, доступ к оптическому волокну дает наибольшее приращение. Тогда вероятность доступа к ОВ нужно сокращать от 0,5 до $0,5 - 0,4 = 0,1$. Остальные вероятности дают одинаковое приращение, связанное с особенностями применяемой GERT-сети, разработанной для рассматриваемого случая реализации атаки. Учет измененного показателя вероятности доступа к оптическому кабелю в модели увеличил среднее время реализации атаки по доступу к инфраструктуре с 12,429 до 32,429 ч. В свою очередь, требуемое для вывода узла связи ТСССН из состояния ИБ по критерию оперативной готовности время воздействия противника увеличилось с 24,8 до 39 ч. Стоит отметить, что для обеспечения устойчивости ТСССН подобную процедуру следует выполнять также для уровней защиты услуг и приложений.

Таким образом, для обеспечения живучести ТСССН в условиях реализации сетевых и компьютерных атак необходимо осуществить комплекс организационных и инженерно-технических мероприятий. К ним могут относиться:

- мероприятия по внедрению технических (аппаратных) средств защиты оборудования линейного тракта;
- мероприятия по установке программных средств защиты, своевременно обнаруживающих попытки анализа сетевого трафика и сканирования сети;
- мероприятия по наращиванию комбинированных средств защиты в сочетании с требованиями по организации доступа к объектам ТСССН и расширению границ контролируемых зон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемая методика обеспечения устойчивости функционирования ТСССН в условиях реализации сетевых и компьютерных атак позволяет на основе рассчитанного показателя оперативной готовности сети сделать выводы о соответствии сети требованиям, предъявляемым руководящими документами. При использовании методики возможно учитывать скорость изменения показателя устойчивости относительно вклада сетевых и компьютерных атак в состояние информационной безопасности инфраструктуры, услуг и приложений ТСССН в ходе их реализации. На основе анализа функций приращения обобщенного показателя эффективности возможно идентифицировать наиболее уязвимые с точки зрения воздействия измерения защиты и на их основе провести мероприятия по повышению среднего времени реализации сетевых и компьютерных атак, в течение которого будет обеспечен требуемый уровень устойчивости за счет снижения вероятностей преодоления измерений защиты.

Рассматриваемая в [2] методика расчета коэффициентов оперативной готовности элементов сети подразумевает вероятность воздействия внешних дестабилизирующих факторов равновероятными событиями, что позволяет принимать (при выбранном уровне ущерба) вероятность безопасной работы одинаковой для всех элементов сети. Предлагаемая же методика использует дифференцированный подход и позволяет в соответствии с частной моделью угроз информационной безопасности определять функции распределения вероятности ущерба в зависимости от типа элементов (стационарные узлы связи, узлы связи доверенного оператора или узлы связи полевой компоненты ТСССН). Это достигается за счет учета в моделях функционирования в условиях реализации сетевых и компьютерных атак на уровень защиты услуг и приложений различных телекоммуникационных технологий (WDM, SDH, PDH, Eth), применяемых на ТСССН, а также факта агрегации транспортных потоков различных уровней цифровой иерархии.

Кроме того, в моделях функционирования ТСССН в условиях реализации сетевых и компьютерных атак на уровень защиты инфраструктуры предусмотрена возможность учитывать

различные элементы волоконно-оптического линейного тракта, что позволяет адекватно описывать процессы реализации доступа нарушителя к инфраструктуре ТСССН.

В отличие от предлагаемой в [2] методики оценки соответствия сети заданным требованиям обеспечения устойчивости ее функционирования, представленная выше методика в качестве математического аппарата оценки устойчивости использует метод статистических испытаний Монте-Карло, реализованный в СППР «Архитектор сетей». По сравнению с методом перебора простых цепей (МППЦ) метод Монте-Карло дает более пессимистичную оценку. Это объясняется тем, что в МППЦ узлы и линии в направлении связи разных путей могут повторяться, что приводит к завышенной оценке устойчивости. К тому же применение МППЦ при большом количестве элементов сети становится весьма трудоемким и длительным по времени.

Список используемых источников

1. Давыдов А.Е., Максимов Р.В., Савицкий О.К. Защита и безопасность ведомственных интегрированных инфокоммуникационных систем. – М.: ОАО «Воентелеком», 2015. – 520 с.
2. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.
3. ГОСТ РВ 0112-001-2007. Безопасность средств и систем военной связи информационная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2007. – 14 с.
4. Методика повышения устойчивости функционирования транспортной сети связи специального назначения с учетом воздействия дестабилизирующих факторов / Д.В. Субботин, А.К. Канаев, А.Н. Иванов, К.П. Щербак // Современная наука: актуальные вопросы теории и практики. Естественные и технические науки: научно-практич. журн. – 2019. – № 7. – С. 130–133.
5. К вопросу об идентификации компьютерных атак на транспортную сеть связи специального назначения / А.К. Канаев, А.Н. Иванов, Д.В. Субботин, К.П. Щербак // Сборник трудов Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика и информационная безопасность». – 2019. – № 7. – С. 44–46.
6. ФСТЭК России. Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. – 2008. – 10 с.
7. ГОСТ Р 51275-2006. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.
8. ГОСТ Р 52448-2005. Защита информации. Обеспечение безопасности сетей электросвязи. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 23 с.
9. Привалов А.А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем ВМФ. – СПб.: ВМА, 2001. – 192 с.
10. Корн Г., Корн М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 832 с.

А.Н. Иванин*,
 А.К. Канаев*,
 доктор техн. наук, профессор;
 А.А. Муравцов*,
 кандидат техн. наук, доцент

*Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК

В статье рассматривается модель процесса функционирования транспортной сети связи специального назначения в условиях реализации компьютерных атак, направленных на получение доступа к инфраструктуре транспортной сети связи специального назначения (ТСССН). Получены вероятностно-временные характеристики (ВВХ), позволяющие исследовать влияние параметров входных воздействий нарушителя на показатели функционирования сети, выражающиеся во времени, затрачиваемом на преодоление соответствующих измерений и уровней защиты инфраструктуры с использованием процедуры GERT.

Ключевые слова: модель, процедура GERT, вероятностно-временные характеристики, метод топологического преобразования стохастических сетей.

ВВЕДЕНИЕ

В современном информационном пространстве наблюдаются тенденции роста мощности множества дестабилизирующих факторов, влияющих на устойчивость функционирования ТСССН, вследствие появления различного рода сетевых и компьютерных атак. Иными словами, задача определения ВВХ функционирования ТСССН в условиях реализации компьютерных и сетевых атак с целью построения дальнейшего вектора исследования на предмет обеспечения устойчивости функционирования ТСССН в условиях реализации сетевых и компьютерных атак является актуальной. В ходе осуществления сетевых и компьютерных атак происходит процесс взаимодействия нарушителя с ТСССН. Злоумышленник реализует цикл деструктивных воздействий исходя из своих мотивов, оснащенности и осведомленности. Анализ руководящих документов [1], международных рекомендаций в области электро-связи [2] и научных трудов [3, 4] позволяет спроецировать компьютерные атаки на измерения, уровни и плоскости защиты, представленные на рис. 1.

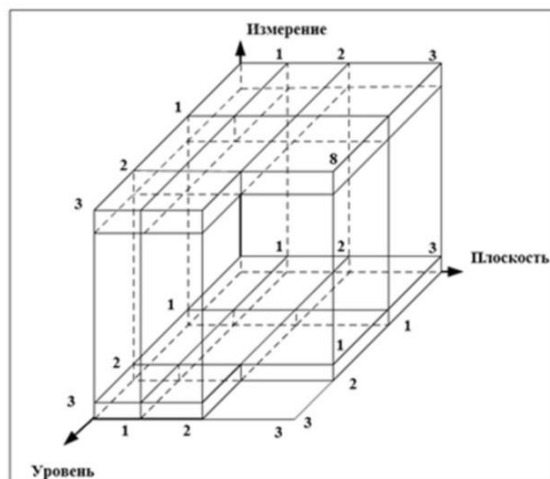


Рис. 1. Сквозная архитектура защиты

Особенностью реализации сквозной архитектуры защиты (САЗ), представленной на рис. 1, является то, что восемь измерений защиты должны быть осуществлены в последовательном порядке применительно к уровням защиты инфраструктуры, услуг и приложений, которые, в свою очередь, рассматриваются в плоскостях контроля, управления и конечного пользователя. Проекция фаз реализации атак на САЗ позволяет классифицировать компьютерные и сетевые атаки по типам сетевых операций, таких как получение доступа к инфраструктуре, идентификация услуг (каналов) и нарушение конфиденциальности, целостности и доступности информации, обрабатываемой приложениями в плоскостях управления и контроля.

Необходимость учета вероятностей свершения событий, связанных с преодолением измерений защиты, а также условных промежутков времени, затрачиваемых на реализацию этих событий, позволяет описывать рассматриваемые процессы функционирования в виде сетей со стохастическими параметрами. Наиболее полно описать функционирование стохастических сетей позволяет процедура GERT (*graphical evaluation and review technique*), впервые представленная в монографии А. Притскера [5]. Отечественными, первыми в данной области, были работы профессора Военной академии связи Г.П. Захарова и его учеников (М.В. Симонова, В.Н. Сабынина и др.). Достоинством метода стала возможность представления процессов с различной степенью глубины детализации набором вложенных моделей. Это, с одной стороны, позволяет более точно получать исходные данные для моделей более высокого уровня, а с другой – останавливаться на необходимом уровне детализации. Кроме того, метод отличается ясным физическим смыслом при постановке задачи, а также высокой степенью формализации остальных этапов – топологического преобразования сети и т. д. Дальнейшее развитие процедура GERT получила в работах профессора А.А. Привалова [6].

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК

Рассмотрим процесс функционирования транспортной сети связи в условиях реализации нарушителем сетевой атаки на получение доступа к инфраструктуре волоконно-оптической линии связи. Исходные данные для моделирования процесса функционирования участка ТСС СН в условиях реализации доступа к оптическому волокну (ОВ) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Название параметра	Обозначение	Значение, ч
Время сбора сведений о топологии ТСС СН	t_{CC}	6
Время обработки добытых сведений о топологии ТСС СН	t_{OC}	2
Время обработки сведений, полученных в результате доступа к ВОК (ЛЮУС, OADM)	t_{OB}	0,5–2
Время возврата к повторному сбору сведений после неудачи доступа к волоконно-оптическому кабелю (ВОК) либо к ОВ	$t_{ПОВ}$	2

Алгоритм реализации атаки представлен на рис. 2. В процессе реализации атаки по доступу к оптическому волокну нарушитель проводит мероприятия добывания сведений о топологической структуре атакуемого объекта за время t_{CC} , которое ввиду возникающих трудностей является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону

$$A(t_{CC}) = 1 - e^{-\lambda_{CC} t_{CC}}, \quad (1)$$

где λ_{CC} – параметр распределения, характеризующийся величиной, обратной t_{CC} . Добытые сведения обрабатываются, выявляются уязвимости инфраструктуры линий связи, локализуются точки доступа за время t_{OC} , распределенное по экспоненциальному закону

$$B(t_{\text{OC}}) = 1 - e^{-\lambda_{\text{OC}} t_{\text{OC}}} . \quad (2)$$

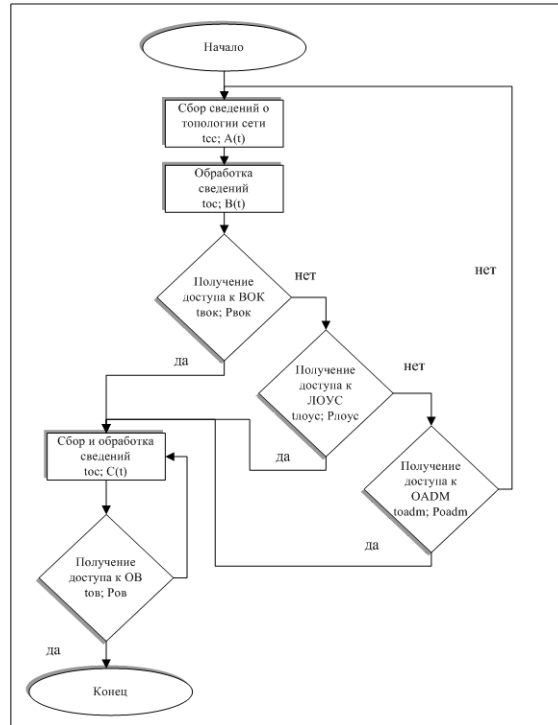


Рис. 2. Алгоритм реализации атаки

На основе анализа добытых данных нарушитель реализует доступ к оптическому кабелю с вероятностью $P_{\text{ВО}}$, в противном случае с вероятностью $(1 - P_{\text{ВО}})$ пытается реализовать доступ к линейному оптическому усилителю (ЛОУС) с вероятностью $P_{\text{Л}}$. Неудача, с вероятностью $(1 - P_{\text{Л}})$, заставляет его попытаться получить доступ к оптическому мультиплексору ввода/вывода OADM с вероятностью P_{OADM} . В случае провала, с вероятностью $(1 - P_{\text{OADM}})$, нарушитель за время $t_{\text{ПОВ}}$, распределенное по экспоненциальному закону

$$E(t_{\text{ПОВ}}) = 1 - e^{-\lambda_{\text{ПОВ}} t_{\text{ПОВ}}} , \quad (3)$$

осуществляет повторную процедуру сбора и анализа сведений. Успешная реализация доступа к одной из трех уязвимостей приводит нарушителя к следующему этапу – реализации доступа к оптическому волокну за время $t_{\text{ПОВ}}$. В данный промежуток времени, распределенного по экспоненциальному закону

$$C(t_{\text{ОВ}}) = 1 - e^{-\lambda_{\text{ОВ}} t_{\text{ОВ}}} , \quad (4)$$

входят различные манипуляции, связанные со снятием брони кабеля, выделением отдельных волокон, поиском оптической несущей. Указанные способы могут быть реализованы либо контактно, с непосредственным подключением к среде распространения, либо бесконтактно, с использованием химических, радиационных или акустических воздействий на элементы волоконно-оптического кабеля (ВОК). Эти способы зависят от уровня подготовки нарушителя и его потенциала. С вероятностью $P_{\text{ОВ}}$ нарушитель получает доступ к требуемому оптическому волокну. В случае же неудачи субъект, с вероятностью $(1 - P_{\text{ОВ}})$, осуществляет

$$H = 1 + \sum_{k=1}^k (-1)^k Q_k(s) = 0, \quad (10)$$

где k – порядок петель, входящих в стохастическую сеть [5], и конкретных параметров распределения $t_{CC} = 6$ ч, $t_{OC} = 2$ ч, $t_{OB} = 0,5$ ч, $t_{ПОВ} = 2$ ч, эквивалентная функция принимает вид

$$W(s) = \frac{P_{OB}(21600s^5 + 15180s^4 + 4192s^3 + 569s^2 + 38s + 1)(P_{Л} + P_{O} + P_{BO} + P_{Л}P_{O} - P_{Л}P_{BO} - P_{Л}P_{OB} + P_{Л}P_{O}P_{BO})}{(72s^2 + 17s + P_{OB})(6s + 1)(8s + 1)(10s + 1)(300s^3 + 140s^2 + 21s + P_{O} + P_{BO} - P_{Л}P_{O} - P_{Л}P_{BO} - P_{O}P_{BO} + P_{Л}P_{O}P_{BO} + P_{Л})}. \quad (11)$$

Для определения ВВХ функционирования ТСС СН необходимо от изображения эквивалентной функции стохастической сети перейти к ее оригиналу. Согласно теореме обращения, в любой точке t непрерывной функции – оригинала $W(t)$ при известной функции – изображении $W(s)$ имеет место формула [8]

$$W(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{x-i\infty}^{x+i\infty} e^{st} W(s) ds,$$

где x – любое действительное число, большее показателя роста S_0 .

Безусловно, использование формулы Римана – Меллина, в общем, решает задачу поиска оригинала по заданному изображению, однако это вызывает большие трудности, в частности, в ходе реализации модели с использованием пакета *Mathcad*, что связано с необходимостью перехода от бесконечной области интегрирования к пределам либо замены области замкнутым контуром L . К тому же в программной реализации модели в среде *Mathcad* оператор *invlaplace*, осуществляющий переход к оригиналу с использованием обратного преобразования Лапласа, при степени многочлена больше пяти некорректно отображает функцию ввиду больших затрат вычислительных ресурсов. В связи с этим поиск функции распределения оригинала проводился с использованием теоремы разложения, или разложения Хевисайда [6], что дало возможность решить интеграл с использованием основной теоремы Коши о вычетах и перейти от интегрирования к вычислению суммы ряда:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{x-i\infty}^{x+i\infty} e^{st} W(s) ds = \frac{1}{2\pi i} \lim_{s \rightarrow \infty} \int_L e^{st} W(s) ds = \sum_{k=1}^{\infty} \operatorname{Re}_{s=s_k} [e^{st} W(s)], \quad (12)$$

где

$$\operatorname{Re}_{s=s_k} [e^{st} W(s)] = \frac{W_1(s) e^{st}}{\frac{dW_2(s)}{ds}} \quad (13)$$

обозначает вычет функции $e^{st} W(s)$ относительно особых точек, подставляемых в числитель $W_1(s)$ формулы (13) и первую производную многочлена $W_2(s)$, находящегося в знаменателе. Далее определяли корни полинома, находящегося в знаменателе эквивалентной функции $W(s)$. Поиск корней осуществлялся в пакете *Mathcad* с использованием оператора *solve*. Вследствие громоздкости вычислений опустим представление результатов поиска корней полинома и представим искомый оригинал функции плотности распределения времени в виде

$$w(t) = \sum_{k=0}^7 \operatorname{Re}_s [e^{st} W(s)] = \sum_{k=0}^7 e^{st} \frac{W_1(s)}{\left(\frac{dW_2(s)}{ds} \right)}. \quad (14)$$

Тогда функция распределения будет находиться из выражения

$$W(t) = \int_0^t w(t)dt = \sum_{k=0}^7 [1 - e^{-st}] \frac{W_1(s)}{\left(\frac{dW_2(s)}{ds}\right)(-s_k)}, \quad (15)$$

а среднее время реализации атаки с целью получения доступа к оптическому волокну будет определяться математическим ожиданием

$$T = \int_0^{\infty} tW(t)dt = \sum_{k=0}^7 \frac{W_1(s)}{\left(\frac{dW_2(s)}{ds}\right)s_k^2}. \quad (16)$$

Результаты расчетов функции распределения времени $W(t)$, затрачиваемого нарушителем на реализацию доступа к оптическому волокну, и функции распределения времени $U(t)$ исправного функционирования объекта воздействия с учетом вероятностей $P_{ОВ}$, $P_{ВО}$, $P_{Л}$, $P_{О}$ и времен последовательного преодоления измерений защиты уровня инфраструктуры представлены на рис. 4 и 5. Модель позволяет идентифицировать различные функциональные зависимости времени реализации компьютерных и сетевых атак от изменения ее параметров.

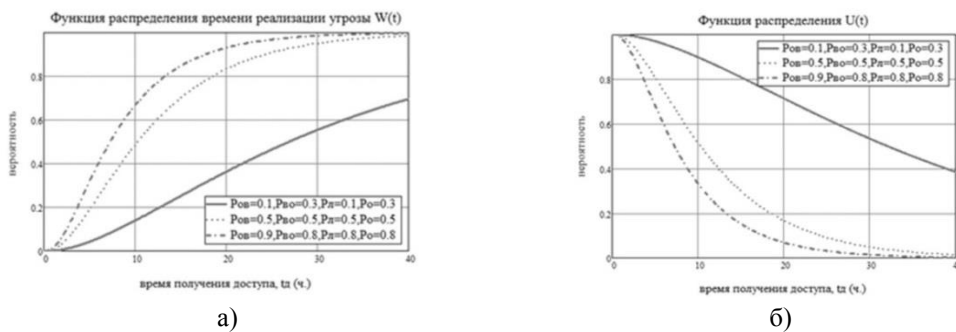


Рис. 4. Функции распределения вероятностей:
а – $W(t)$; б – $U(t)$ при $t_{CC} = 6$ ч, $t_{OC} = 2$ ч, $t_{ОВ} = 0,5$ ч, $t_{ПОВ} = 2$ ч

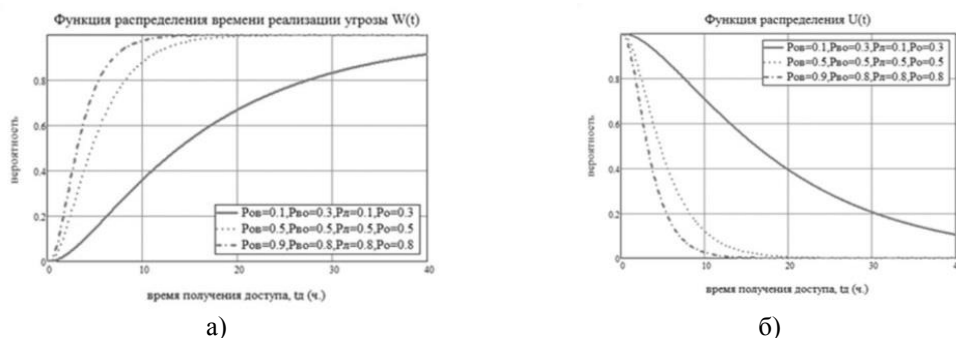


Рис. 5. Функции распределения вероятностей:
а – $W(t)$; б – $U(t)$ при $t_{CC} = 2$ ч, $t_{OC} = 1$ ч, $t_{ОВ} = 0,5$ ч, $t_{ПОВ} = 1$ ч

Анализ ВВХ атаки по преодолению измерений защиты уровня инфраструктуры ТСС СН показывает, что при использовании процедуры GERT с узлами типа «исключающее ИЛИ» возможно определить функцию распределения времени реализации атаки с учетом вероятности

стей элементарных событий, заключающихся в преодолении измерений защиты доступа к различным элементам инфраструктуры сети, а также времени выполнения элементарных операций по преодолению измерений защиты. Увеличение сроков выполнения элементарных операций, представляющих собой сбор сведений о ТСС СН, обработку данных, доступ к оптическому волокну, и повторные попытки доступа приводят к увеличению времени реализации атаки. Что же касается вероятностей элементарных событий по доступу к элементам инфраструктуры, то их рост приводит к сокращению времени, необходимого на реализацию атаки.

На рис. 6 и 7 представлена зависимость среднего времени реализации атаки, направленной на получение доступа к оптическому волокну. Анализ показывает, что увеличение вероятностей преодоления измерений защиты уровня инфраструктуры приводит к сокращению среднего времени реализации атаки.



Рис. 6. Математическое ожидание времени реализации атаки при $t_{CC} = 6$ ч, $t_{OC} = 2$ ч, $t_{OB} = 0,5$ ч, $t_{ПОВ} = 2$ ч



Рис. 7. Математическое ожидание времени реализации атаки при $t_{CC} = 2$ ч, $t_{OC} = 1$ ч, $t_{OB} = 0,5$ ч, $t_{ПОВ} = 1$ ч

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель функционирования ТСССН в условиях реализации компьютерных атак на уровень защиты инфраструктуры позволяет учитывать различные элементы инфраструктуры исходя из предназначения и масштаба сети. В качестве входных характеристик модель использует параметры нарушителя, учитывающие его потенциал и цели воздействия, что дает возможность исследовать влияние параметров входных воздействий нарушителя на показатели функционирования сети, выражающиеся во времени, затрачиваемом на преодоление соответствующих измерений и уровней защиты.

Модель легко масштабируема и способна учитывать различные варианты построения реальных ТСССН. Результаты моделирования демонстрируют изменение значений времени реализации атаки в результате варьирования параметрами нарушителя. Разница между этими значениями с учетом роста потенциала нарушителя, выражающегося в увеличении вероятностей успешного преодоления измерений защиты конкретного оборудования и сокращении времени на выполнение промежуточных операций, составляет сотни минут, что является существенным с точки зрения качества предоставляемых ТСССН услуг.

Результаты моделирования помогают сформировать обоснованные требования к измерениям защиты ТСССН при заданных требованиях к качеству обслуживания. Это, в свою очередь, позволит задать вектор дальнейших исследований в направлении разработки моделей функционирования ТСССН в условиях реализации атак на уровень услуг и приложений, направленных на нарушение основных свойств безопасности информации, таких как конфиденциальность, целостность и доступность в ходе предоставления услуг переноса разнородного типа трафика.

Список используемых источников

1. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. – ФСТЭК России, 2008. – 69 с.
2. X.805.Security architecture for systems providing end-to-end communications. – Женева, 2004. – 22 с.
3. *Канаев А.К., Опарин Е.В.* Анализ угроз безопасности оборудования сети тактовой сетевой синхронизации // Материалы международной научной конференции, посвященной 15-летию Санкт-Петербургской научной организации «Арктическая международная академия». – 2019. – С. 135–142.
4. *Канаев А.К., Привалов А.А.* Подход к обеспечению кибербезопасности ТКС ОАО «РЖД» // Сборник трудов 72-й всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио. – 2017. – С. 263–264.
5. *Pritsker A.A.V.* GERT: graphical evaluation and review technique. – NASA, 1966. – 138 с.
6. *Привалов А.А.* Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем ВМФ. – СПб.: ВМА, 2001. – 192 с.
7. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства / М.А. Коцыняк, А.И. Осадчий, М.М. Коцыня и др. – СПб.: ЛО ЦНИИС, 2014. – 126 с.
8. *Корн Г., Корн М.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 832 с.

В.В. Клейменов,
доктор техн. наук, профессор;
В.И. Сахно;
Д.И. Сахно

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В работе представлен краткий обзор современных зарубежных подходов к обнаружению морских объектов на радиолокационных изображениях. Рассмотрены варианты построения автоматических обнаружителей таких объектов на основе глубоких сверточных нейронных сетей. Проведен анализ существующих наборов данных радиолокационных изображений морских объектов. Приведены необходимые параметры для обучения современных одноэтапных архитектур нейросетевых обнаружителей. Выполнено сравнительное тестирование, и оценено качество обученных автоматических обнаружителей.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, сверточная нейронная сеть, обнаружение объектов.

ВВЕДЕНИЕ

Современные зарубежные космические радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) ежедневно производят большие объемы данных, для обработки которых разрабатываются различные методы и средства автоматизации процесса обнаружения и классификации объектов на получаемых с их помощью радиолокационных изображениях (РЛИ). Особенно часто возникает острая необходимость автоматизации при наблюдении за морскими объектами, когда РСА функционирует в обзорном режиме и большая часть РЛИ соответствует участкам открытого моря.

Применение автоматизированных обнаружителей морских объектов позволяет значительно снизить нагрузку на аналитиков радиолокационных данных (дешифровщиков) при наблюдении протяженных участков морской поверхности, направляя их внимание на те области изображений, которые трудно поддаются автоматической интерпретации.

Классическим подходом к решению задачи обнаружения морских объектов является построение такого обнаружителя, в котором для РЛИ фиксируется некоторый глобальный порог интенсивности. На практике чаще применяются различные модификации адаптивных пороговых алгоритмов [1–3], в большинстве из которых, как правило, локально фиксируется некоторая вероятность ложной тревоги (Constant False Alarm Rate, CFAR) для различных участков РЛИ [4]. Пороговое значение при этом вычисляется с использованием пикселей, окружающих наблюдаемый локальный участок изображения.

CFAR-методы имеют ряд недостатков. Во-первых, при их применении размер окна наблюдения должен устанавливаться в соответствии с размером потенциально обнаруживаемого объекта, что позволяет CFAR-методам справляться с обнаружением в ситуациях, когда один объект наблюдается на однородном фоне. В ситуации же, когда рядом на РЛИ будут расположены несколько объектов разных размеров, несоответствие между совокупным размером этих объектов и размерами окна наблюдения приведет к тому, что они не будут обнаружены. Во-вторых, при использовании этих алгоритмов зачастую необходима первичная сегментация водной поверхности, в противном случае возникает много ложных обнаружений объектов на побережье. Аналогичным недостатком обладает и относительно современный метод обобщенного теста отношения правдоподобия [5]. Третьим недостатком CFAR-методов является использование скользящего окна относительно небольшого размера,

что довольно ресурсозатратно и не соответствует требованиям обработки РЛИ в реальном масштабе времени [6].

Современным стандартом построения автоматических обнаружителей и классификаторов является использование концепции глубокого обучения, хорошо зарекомендовавшей себя при решении множества прикладных задач компьютерного зрения [7]. Основная модель глубокого обучения, используемая в области компьютерного зрения, представляет собой сверточную нейронную сеть. Преимущество таких сетей состоит в способности автоматического извлечения ими информативных признаков объектов, что выгодно отличает этот подход от традиционных методов, где признаки приходится проектировать вручную. Однако основной трудностью становится необходимость наличия большого набора размеченных данных для обучения сети.

В настоящее время многие исследовательские группы занимаются разработкой систем автоматического обнаружения морских объектов на РЛИ [8–11]. Всплеск интереса к этой тематике вызван и значительно увеличившейся доступностью радиолокационных данных после запуска космических РСА С-диапазона Sentinel-1A и Sentinel-1B в 2014 и в 2016 годах соответственно. Европейское космическое агентство (ESA) в рамках программы Copernicus непрерывно публикует и предоставляет свободный доступ к шести терабайтам новых РЛИ каждый день [12]. Эти данные активно используются в том числе и для мониторинга морской обстановки [13].

На основе радиолокационных данных, предоставленных ESA, сформированы наборы данных морских объектов (кораблей) для глубокого обучения. Некоторые из них дополнены информацией морской системы автоматической идентификации (Automatic Identification System, AIS) [14, 15]. Так, в 2016 году был представлен набор для обнаружения кораблей SAR ship [16]. В 2017 году, опять же на основе изображений Sentinel-1, Шанхайский университет представил набор данных для классификации морских объектов Open SAR Ship, включающий десять категорий объектов [17]. Однако исследователи отмечают сильную несбалансированность этого набора [18], а также тот факт, что задача определения типа (классификации) кораблей при его использовании не решается достаточно эффективно, в отличие от задачи обнаружения. Вызвано это тем, что доступные в наборе изображения Sentinel-1 получены в широкополосном режиме для последующей интерферометрической обработки (Interferometric WideSwath) и имеют относительно невысокое разрешение – порядка 20 м, поэтому извлечение геометрических и радиометрических признаков для классификации различных типов кораблей затруднено или невозможно [17, 19].

Существуют наборы данных и с более высоким пространственным разрешением. Например, представленный в 2018 году китайский набор данных SAR Ship Detection Dataset (SSDD) [20], использующий данные выведенного на орбиту в 2016 году китайского космического РСА С-диапазона Gaofen-3. В 2019 году появился очередной китайский набор данных SAR Ship Dataset, сформированный в основном изображениями с высоким пространственным разрешением космических РСА Sentinel-1 и Gaofen-3 [21]. Этот набор данных является наибольшим из всех доступных наборов и будет подробнее рассмотрен в работе.

ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ

Процесс разработки алгоритмов обнаружения и распознавания объектов на РЛИ аналогичен таковому в области компьютерного зрения. Однако специфика состоит в значительном отличии радиолокационных изображений от оптических изображений, на основе которых собраны большие наборы данных (ImageNet, PascalVOC, COCO) для обучения глубоких сверточных нейронных сетей, решающих аналогичные задачи в оптическом диапазоне.

Некоторые из доступных размеченных наборов радиолокационных данных, рассмотренных выше, не содержат достаточного количества примеров, необходимого для правильного

обучения глубоких сверточных сетей. Именно поэтому, чтобы достичь необходимой производительности сети, зачастую используют концепцию переноса обучения (transfer learning). Данная концепция состоит в том, что изначально берутся структура и весовые коэффициенты некоторой модели (VGG, Inception, ResNet), которая уже обучена (pre-trained) на каком-либо достаточно большом наборе данных оптических изображений, затем удаляется ряд выходных слоев сети (классификатор), а на их место добавляются новые, после чего осуществляется тонкая настройка (fine-tuning) параметров этих слоев – реализуется дообучение сети [22–24]. Хотя многие из таких моделей достаточно эффективно решают задачи обнаружения морских объектов, они обладают рядом серьезных недостатков и ограничений. Во-первых, адаптация уже обученных моделей не позволяет в широких пределах менять их структуру. Во-вторых, например, набор данных ImageNet, на основе которого обучалась сеть VGG-16, предназначен для решения задачи классификации с 1000 классами, а задача обнаружения имеет другую функцию потерь и категориальные распределения (всего два класса: «корабль» и «не корабль»). Поэтому такой обнаружитель трудно считать объективным. В-третьих, процесс тонкой настройки параметров модели не может ничего противопоставить серьезным физическим (спектр-шум, сильная зависимость от угла наблюдения), а соответственно, и визуальным различиям между радиолокационными изображениями и оптическими изображениями, на которых обучалась соответствующая модель. Кроме того, упомянутые модели имеют сложности с обобщаемостью, поскольку используют относительно небольшие наборы данных для дообучения, имеют много параметров, и, как следствие, к ним применяется неэффективная стратегия обучения. Единственным способом преодоления рассмотренных выше проблем является обучение модели «с нуля» [6], что и реализовано авторами в настоящей работе.

НАБОР РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ SAR SHIP DATASET

Как уже отмечалось выше, для того чтобы построить качественный классификатор (обнаружитель), необходимо иметь качественные данные. Никакой из методов построения классификаторов никогда не приведет к нужному качеству модели классификации, если имеющийся набор данных не будет достаточно полным и представительным для той задачи, с которой придется работать этой модели в последующем.

Появившийся весной 2019 года набор данных SAR Ship Dataset был заявлен как набор, позволяющий обучать нейросетевые модели для обнаружения кораблей на РЛИ в условиях сложной фоноцелевой обстановки (наблюдаются не только открытое море, но и суша) и исключать необходимость предварительной сегментации водной поверхности с целью недопущения ложных обнаружений на берегу [21]. Он значительно отличается от уже устаревших наборов данных SAR ship [16] и Open SAR ship [17] как по объему данных и размеру изображений, так и по типу разметки объектов, поскольку не привязан к конкретному типу PCA, к режиму его работы и, соответственно, к размеру окна обнаружения, что позволяет применять его для обучения моделей, построенных на базе относительно современных архитектур R-CNN [25], Faster R-CNN [25], FPN [26], SSD [27], YOLO [28], RetinaNet [29]. При дополнении набора AIS-информацией, что обещают сделать авторы, появятся хорошие перспективы и для решения задачи классификации кораблей [30, 31].

Набор данных SAR Ship Dataset сформирован из 102 РЛИ Gaofen-3 и 108 РЛИ Sentinel-1 (оба космических PCA функционируют в С-диапазоне). Пиксели изображений представляют собой нормализованные значения интенсивности, т. е. калиброванные коэффициенты обратного рассеяния (σ_0). Характеристики и количество РЛИ в наборе данных представлены в таблице 1 [32].

На основе указанных 210 РЛИ получено 43820 изображений с разрешением 256×256 пикселей, на которых размечено 59536 объектов (кораблей). Причем по одному объекту в наборе данных находится только на 7727 изображениях, на всех остальных их содержится два и более. Что касается распределения по типам космических PCA и их режимов работы, то 20605 изображений получены системой Gaofen-3 в маршрутном режиме сверхвысокого разрешения (Ultra Fine Strip-Map, UFS), в двух маршрутных режимах высокого разрешения (Fine Strip-Map, FS1 и FS2) и в первом полнополяризационном режиме (Quad-Polarization Strip-Map, QPS1), 21887 изображений – системой Sentinel-1 в маршрутных режимах (Strip-Map, S3 и S6), еще 1328 изображений – этими же системами во втором полнополяризационном режиме (Quad-Polarization Strip-Map, QPS2) и в интерферометрическом широкополосном режиме (Interferometric WideSwath, IW) соответственно.

Таблица 1

Характеристики РЛИ в наборе данных

Космический PCA	Режим работы PCA	Пространственное разрешение дальность×азимут, м	Полоса обзора, км	Диапазон углов наблюдения	Количество РЛИ в наборе данных
Gaofen-3	UFS	3×3	30	20°–50°	12
Gaofen-3	FS1	5×5	50	19°–50°	20
Gaofen-3	QPS1	8×8	30	20°–41°	20
Gaofen-3	FS2	10×10	100	19°–50°	30
Gaofen-3	QPS2	25×25	40	20°–38°	20
Sentinel-1	SM S3, SM S6	1.7×4.3, 3.6×4.9	80	20°–45°	98
Sentinel-1	IW	20×22	250	29°–46°	10

Каждому файлу изображения соответствует xml-аннотация, в которой описаны координаты ограничивающих окон разметки для всех кораблей на изображении в PascalVOC совместимом формате [21]. Ниже на рис. 1 представлены некоторые примеры размеченных РЛИ из набора данных SAR Ship Dataset с разными пространственными разрешениями и условиями фоноцелевой обстановки (корабли в открытом море и в акватории порта). Изображения в первом ряду получены PCA Gaofen-3, во втором – PCA Sentinel-1. Зеленые прямоугольники на изображениях – окна разметки, ограничивающие объекты обнаружения (корабли).

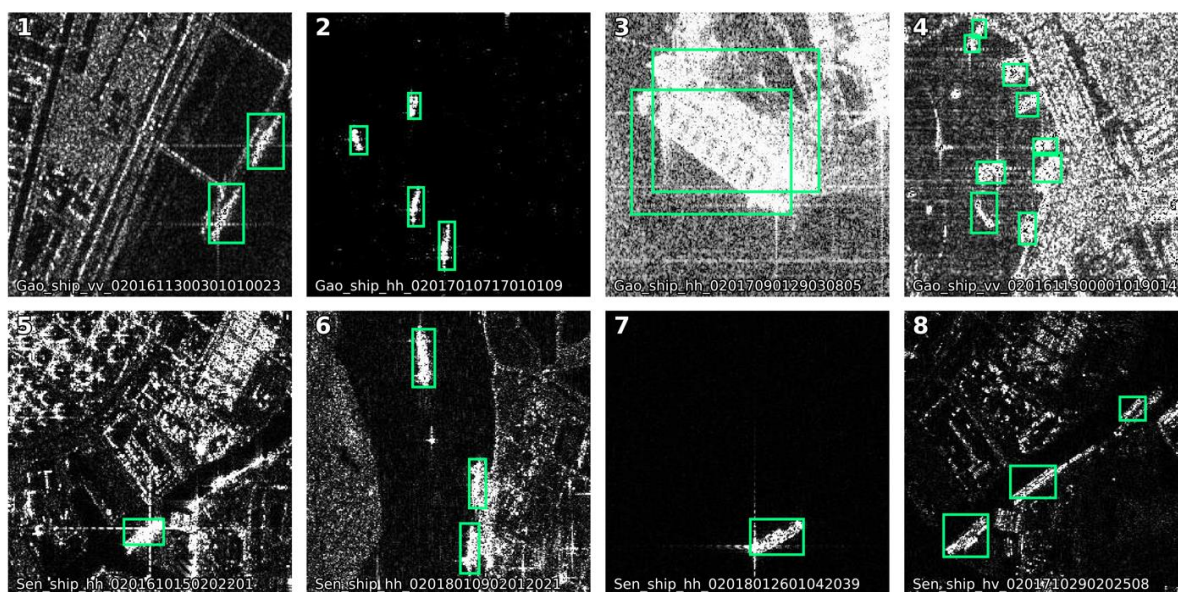


Рис. 1. Примеры размеченных РЛИ из набора данных SAR Ship Dataset

К сожалению, в рассматриваемом наборе данных в большом количестве присутствуют различные ошибки разметки, возможно, вызванные частичной автоматизацией этого процесса. В результате чего в наборе содержатся как полностью пустые изображения с размеченными кораблями на них, так и изображения, на которых размечены не все корабли или ошибочно размечены объекты, похожие на них. После первичного обучения классификатора авторам удалось обнаружить 447 абсолютно пустых изображений с ложной разметкой, после удаления которых в наборе данных осталось 43373 изображения и 58868 размеченных кораблей на них.

Поскольку информация о пространственном разрешении исходных РЛИ, геометрии обзора и информация от автоматических идентификационных систем (AIS) в соответствующих изображениях файлов xml-аннотаций отсутствуют, то выводы о принадлежности представленных в наборе РЛИ к конкретному РСА можно делать только по названию файлов. Пространственное разрешение и, соответственно, информация о размерах объектов могут быть оценены визуально или по относительному размеру объектов на РЛИ, рассчитанному на основе имеющихся в xml-аннотациях координат пикселей окон разметки (в координатной сетке изображения 256×256), что также реализовано в работе [21], где расчет относительного размера объекта s_{obj} осуществляется по формуле

$$s_{obj} = \frac{\sqrt{w_{bbox} \cdot h_{bbox}}}{\sqrt{w_{img} \cdot h_{img}}} = \frac{\sqrt{w_{bbox} \cdot h_{bbox}}}{256}.$$

В этой формуле введены следующие обозначения: w_{bbox} , h_{bbox} – соответственно ширина и высота (в пикселях) ограничивающего объект окна, $w_{img} = 256$, $h_{img} = 256$ – ширина и высота (в пикселях) изображения (примера) из набора данных.

Рассчитав значения s_{obj} для каждого из 58868 размеченных на изображениях объектов и используя информацию из названий файлов изображений, были построены гистограммы соответствующих распределений объектов по их относительным размерам для совокупности всех объектов в наборе данных (рис. 2, гистограмма 1), а также для различных режимов работы космических РСА, представленных в наборе данных (рис. 2, гистограммы 2–4).

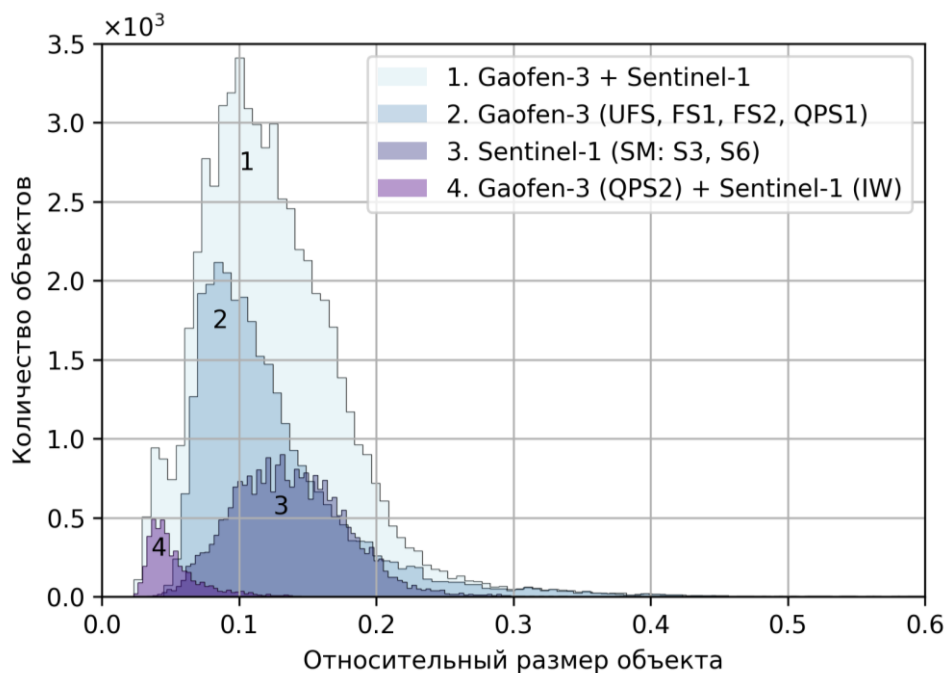


Рис. 2. Распределение относительных размеров объектов в наборе данных SAR Ship Dataset

Полученные гистограммы полностью согласуются с информацией, приведенной в табл. 1, а их анализ позволяют сделать вывод, что в контексте построения нейросетевых обнаружителей, обучаемых на этом наборе данных, предстоит решать задачу обнаружения малых объектов [7], поскольку большая часть из них занимает менее 20% изображения.

ОБУЧЕНИЕ ОДНОЭТАПНЫХ АРХИТЕКТУР ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ

Учитывая большие объемы типовых РЛИ и необходимость их быстрой обработки, в настоящей работе, прежде всего, оценивалась эффективность быстрых одноэтапных архитектур обнаружителей (one stage detectors) SSD, YOLOv3, RetinaNet, в которых используется одна сверточная нейронная сеть (VGG, ResNet, DarkNet, Inception) – базовая сеть (backbone network) – для формирования множества прогнозов расположения объектов на изображении и определения соответствующих им классов.

В качестве оптимальной архитектуры обнаружителя в [21] предлагается использовать Single Shot Detector (SSD) [27], обеспечивающую относительно высокую скорость обнаружения. Для первичного выделения признаков при этом предлагается использование VGG-16 как базовой сети. Однако в работе [7] указано, что с выделением признаков малоразмерных объектов лучше справляется сеть ResNet-101, поэтому в данной работе она и была выбрана в качестве базовой сети SSD-обнаружителя.

Также для сравнительного анализа в работе тестировались модели YOLOv3 (базовая сеть DarkNet-53) и RetinaNet (базовая сеть ResNet-101). При этом применялись реализации [33–35] моделей на основе фреймворка для глубокого обучения Keras (Tensorflow backend) [36].

При обучении рассмотренных выше моделей (SSD, YOLOv3, RetinaNet) на наборе данных SAR Ship Dataset использовался алгоритм оптимизации Adam с гиперпараметрами по умолчанию [36]. Обучение происходило 30 эпох, каждая из которых включала в себя 8000 итераций. Размеры пакетов при обучении выбирались исходя из ограничений по памяти доступного оборудования (NVIDIA Tesla T4, 16 Гб) и составили для трех моделей 32, 16 и 4 примера соответственно. Шаг обучения уменьшался каждые десять эпох в 10 раз от значения 10^{-4} до значения 10^{-6} . Функции потерь для каждой модели использовались стандартные, в соответствии со статьями, в которых они описаны [27–29]. Разбиение набора данных осуществлялось, как и в работе с его описанием [21], в соотношении: 70% – обучающая выборка, 20% – проверочная выборка, 10% – тестовая выборка; для регуляризации использовался механизм ранней остановки. Аугментация входных данных при обучении не применялась.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБУЧЕННЫХ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ

На рис. 3 представлены некоторые результаты работы нейросетевого обнаружителя (SSD, базовая сеть ResNet-101) на тестовом наборе данных. Выбраны девять наглядных примеров РЛИ с различным пространственным разрешением двух космических РСА (Gaofen-3 и Sentinel-1). Здесь числа в красных прямоугольниках – округленные до сотых вероятности принадлежности обнаруженного объекта к классу «корабль», рассчитанные обученным бинарным классификатором. Зеленые прямоугольники соответствуют истинному положению объектов на РЛИ.

Первые шесть тестовых изображений на рис. 3 – примеры хорошей работы обнаружителя в различных условиях фоноцелевой обстановки. На изображениях 7–9, в свою очередь, можно наблюдать пропуски и ложные обнаружения объектов, возникающие, как и следовало ожидать, в условиях сложной фоноцелевой обстановки.

Качество обученных моделей (SSD, YOLOv3, RetinaNet) в ходе сравнительного тестирования оценивалось путем вычисления усредненной (на различных выборках из тестового

множества) оценки кривой точности-полноты (precision-recall curve, PRC). Точность (precision) и полнота (recall) для всех возможных порогов обнаружения при этом рассчитывались в соответствии с известными выражениями:

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

где TP (true positive) – количество правильных обнаружений объектов положительного класса (в данном случае «корабль») на тестовом наборе данных;

FP (false positive) – количество ложных обнаружений (ошибка I рода);

FN (false negative) – количество пропусков объектов (ошибка II рода).

Точность характеризует отношение правильных ответов ко всем полученным положительным ответам классификатора, полнота – какую долю объектов положительного класса из всех объектов этого класса удалось обнаружить. После расчета каждой PRC-кривой оценивалась площадь под ней – средняя точность (average precision) классификатора.

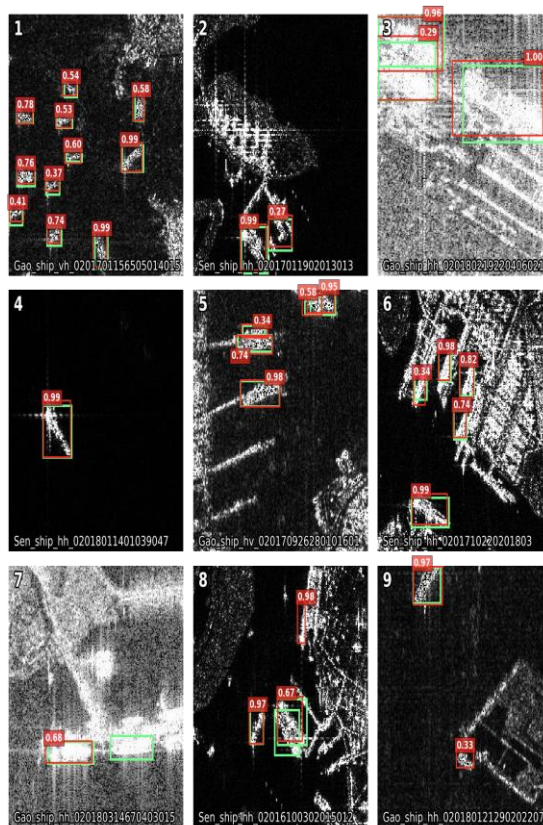


Рис. 3. Результаты работы нейросетевого обнаружителя (SSD)

Кривая точности-полноты более информативна, чем кривая обнаружения (receiver operating characteristic, ROC-кривая) при оценке качества бинарных классификаторов на несбалансированных наборах данных [37]. Используемый набор данных является таковым, поскольку интересующие объекты (корабли) занимают значительно меньшую площадь изображений по сравнению с фоном (морская поверхность, прибрежная зона).

Характеристики тестируемых моделей, а также оценки средней точности (площади под PRC-кривой) обнаружения кораблей и времени, затрачиваемого конкретной моделью на вычисления в режиме выполнения (NVIDIA Tesla T4, 16 Гб), приведены ниже в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики тестируемых моделей

Модель	SSD	YOLOv3	RetinaNet
Базовая сеть	ResNet-101	DarkNet-53	ResNet-101
Входное разрешение	300×300	416×416	800×800
Порог обнаружения	0.25	0.23	0.2
Коэфф. сходства Жаккара	0.4	0.4	0.4
Время выполнения	51 мс	24 мс	175 мс
Средняя точность	89.2%	91.1%	94.3%

В качестве порогов обнаружения – минимальной вероятности принадлежности объекта к классу «корабль» – выбраны значения 0.25, 0.23 и 0.2, соответственно для архитектур SSD, YOLOv3 и RetinaNet. Они выбирались эмпирически, исходя из наилучшей достижимой средней точности на тестовом наборе данных. Минимально допустимый коэффициент сходства Жаккара (отношение площади пересечения размеченного и предсказанного прямоугольников к их совокупной площади) для всех моделей составляет 40%. Соответствующие кривые точности-полноты для трех тестируемых моделей представлены на рис. 4. Левый край каждой кривой соответствует единичному значению порога обнаружения, правый – нулевому.

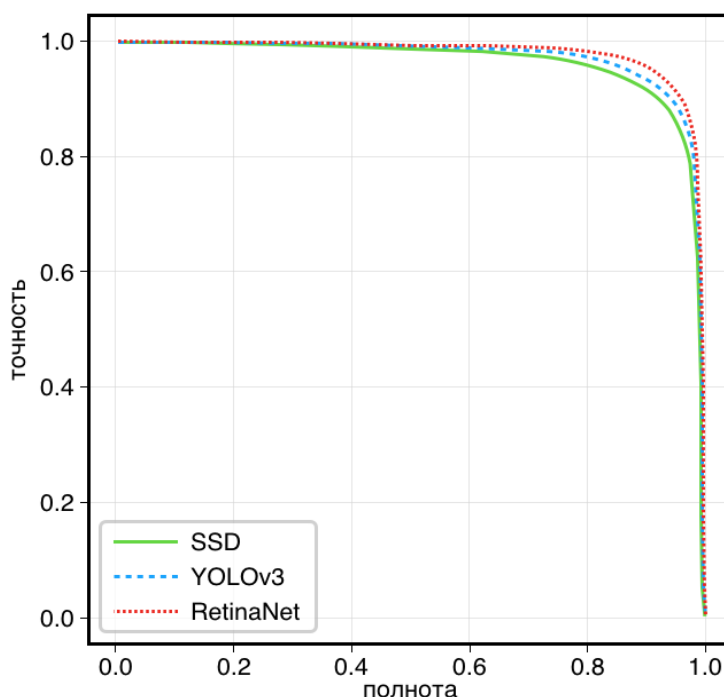


Рис. 4. Кривые точности-полноты тестируемых моделей

Таким образом, модель RetinaNet показала наибольшую среднюю точность (имеет максимальную площадь под соответствующей PRC-кривой), но вместе с тем она же и самая медленная в вычислительном плане, поскольку требует преобразования входного изображения размером 256 × 256 пикселей к размеру 800 × 800 пикселей (бикубическая интерполяция). Компромиссным вариантом является модель YOLOv3, преобразующая входное изображение к размеру 416 × 416 пикселей, обеспечивающая точность 91.1% и наименьшее время выполнения. Эта модель имеет преимущества перед устаревшей архитектурой SSD по всем параметрам и может быть использована при необходимости быстрой автоматизированной

обработки РЛИ. Для сравнения: точность более медленной и громоздкой модели на базе RetinaNet архитектуры (базовая сеть VGG-16), у авторов оригинальной работы [21], составила 91.36%, т. е. YOLOv3 обеспечивает сопоставимую точность при выигрыше в производительности более чем в 7 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Что касается перспектив нейросетевого подхода при построении обнаружителей и классификаторов объектов на РЛИ космических РСА, то он уже сейчас де-факто стал стандартом в индустрии обработки данных дистанционного зондирования [1, 38]. Выполненное авторами данной работы сравнительное тестирование нейросетевых обнаружителей подтвердило их высокую эффективность при решении задач обнаружения морских объектов, в том числе и в условиях сложной фоноцелевой обстановки.

Появление новых наборов данных, адаптированных под характеристики современных архитектур нейросетевых обнаружителей (классификаторов), в перспективе позволит более эффективно решать задачу обнаружения морских объектов (в частности, за счет увеличения размера скользящего окна при автоматизированной обработке РЛИ). Так, например, появление набора данных с изображениями размером 800×800 пикселей сделает возможным обучение (и выполнение) модели RetinaNet без интерполяции входного изображения, а современные вычислительные платформы, в частности на основе тензорных процессоров (Tensor Processor Unit, TPU) [39], позволят сделать это быстро и обеспечат дополнительные преимущества, связанные с масштабируемостью и легкостью дальнейшего использования обученных моделей.

Список используемых источников

1. Automatic Target Recognition in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-Art Review / K. El-Darymli, E.W. Gill, P. McGuire, D. Power, C. Moloney // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 6014–6058.
2. An improved superpixel-level CFAR detection method for ship targets in high-resolution SAR images / T. Li, Z. Liu, R. Xie, L. Ran // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 11, № 1. – P. 184–194.
3. An intensity-space domain CFAR method for ship detection in HR SAR images / C. Wang, F. Bi, W. Zhang, L. Chen // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2017. – Vol. 14, № 4. – P. 529–533.
4. *Crisp D.J.* The state-of-the-art in ship detection in synthetic aperture radar imagery // DSTO Information Sciences Laboratory. – 2004.
5. *Iervolino P., Guida R.* A novel ship detector based on the generalized-likelihood ratio test for SAR imagery // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 10, № 8. – P. 3616–3630.
6. Learning Deep Ship Detector in SAR Images from Scratch / Z. Deng, H. Sun, S. Zhou, J. Zhao // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2019. – Vol. 57, № 6. – P. 4021–4039.
7. Object Detection with Deep Learning: A Review / Z. Zhao, P. Zheng, S. Xu, X. Wu // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2018. – P. 1–21.
8. SAR Target Recognition in Large Scene Images via Region-Based Convolutional Neural Networks / Z. Cui, S. Dang, Z. Cao, S. Wang, N. Liu // Remote Sensing MDPI. – 2018. – Vol. 10, № 5: 776.

9. A densely connected end-to-end neural network for multiscale and multiscene SAR ship detection / J. Jiao et al. // *IEEE Access*. – 2018. – Vol. 6. – P. 20881–20892.
10. Contextual region-based convolutional neural network with multilayer fusion for SAR ship detection / M. Kang, K. Ji, X. Leng, Z. Lin // *Remote Sensing MDPI*. – 2017. – Vol. 9, № 8: 860.
11. A comparative study of operational vessel detectors for maritime surveillance using satellite-borne synthetic aperture radar / M. Stasolla, J.J. Mallorqui, G. Margarit, C. Santamaria, N. Walker // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 9, № 6. – P. 2687–2701.
12. Wagner W. Big Data infrastructures for processing Sentinel data // *Photogrammetric Week*. – 2015. – Vol. 15. – P. 93–104.
13. Mass processing of Sentinel-1 images for maritime surveillance / C. Santamaria, M. Alvarez, H. Greidanus et al. // *Remote Sensing MDPI*. – 2017. – Vol. 9, № 7: 678.
14. Achiri L., Guida R., Iervolino P. SAR and AIS Fusion for Maritime Surveillance // *IEEE International Forum on Research and Technology for Society and Industry*. – 2018. – P. 1–4.
15. Ship recognition by integration of SAR and AIS / S. Chaturvedi, C. Yang, K. Ouchi, P. Shanmugam // *Journal of Navigation*. – 2012. – Vol. 65, № 2. – P. 323–337.
16. A SAR ship dataset for detection, discrimination and analysis / C.P. Schwegmann, W. Kleynhans, B.P. Salmon et al. // *IEEE Dataport*. – 2017.
17. OpenSARShip: A dataset dedicated to Sentinel-1 ship interpretation / L. Huang, B. Liu, B. Li et al. // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 11. – P. 195–208.
18. A Lightweight Convolutional Neural Network Based on Visual Attention for SAR Image Target Classification / J. Shao, C. Qu, J. Li, S. Peng // *Sensors MDPI*. – 2018. – Vol. 18, № 9: 3039.
19. Snapir B., Waine T.W., Biermann L. Maritime Vessel Classification to Monitor Fisheries with SAR: Demonstration in the North Sea // *Remote Sensing MDPI*. – 2019. – Vol. 11, № 3: 353.
20. Shao J., Qu C., Li J. A performance analysis of convolutional neural network models in SAR target recognition // *SAR in BigDataEra: Models, Methods and Applications (BIGSAR DATA)*. – 2017. – P. 1–6.
21. A SAR Dataset of Ship Detection for Deep Learning under Complex Backgrounds / Y. Wang, C. Wang, H. Zhang et al. // *Remote Sensing MDPI*. – 2019. – Vol. 11, № 7: 765.
22. Huang Z., Pan Z., Lei B. Transfer Learning with Deep Convolutional Neural Network for SAR Target Classification with Limited Labeled Data // *Remote Sensing MDPI*. – 2017. – Vol. 9, № 9: 907.
23. Oliveau Q., Sahbi H. Learning Attribute Representations for Remote Sensing Ship Category Classification // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 10, № 6. – P. 2830–2840.
24. Wang Y., Wang C., Zhang H. Ship Classification in High-Resolution SAR Images Using Deep Learning of Small Datasets // *Sensors (Basel)*. – 2018. – Vol. 18, № 9.
25. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation / R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2014. – P. 580–587.
26. Feature Pyramid Networks for Object Detection / T. Lin, P. Dollár, R. Girshick et al. // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2017. – P. 936–944.
27. SSD: Single Shot MultiBox Detector / W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan et al. // *European Conference on Computer Vision*. – 2016. – P. 21–37.
28. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2017. – P. 6517–6525.
29. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition // *International Conference on Learning Representations*. – 2015.

30. Ship detection using SAR and AIS raw data for maritime surveillance / F.M. Vieira et al. // European Signal Processing Conference. – 2016. – P. 2081–2085.
31. Ship Surveillance by Integration of Space-borne SAR and AIS – Further Research / Z. Zhi, J. Ke, X. Xiangwei et al. // Journal of Navigation. – 2013. – Vol. 67. – P. 295–309.
32. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences: [сайт]. – URL: http://aircas.ac.cn/dtxw/kydt/201904/t20190425_5281660.html (дата обращения: 10.01.2020).
33. GitHub: [сайт]. – URL: https://github.com/pierluigiferrari/ssd_keras/ (дата обращения: 10.01.2020).
34. GitHub: [сайт]. – URL: <https://github.com/qqwweee/keras-yolo3> (дата обращения: 10.01.2020).
35. GitHub: [сайт]. – URL: <https://github.com/fizyr/keras-retinanet> (дата обращения: 10.01.2020).
36. Keras Documentation: [сайт]. URL: <https://keras.io/optimizers/> (дата обращения: 10.01.2020).
37. Saito T., Rehmsmeier M. The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets // PLoS One. – 2015. – 10(3): e0118432. – Published 2015 Mar 4.
38. Deep learning in remote sensing: A review / X.X. Zhu et al. // IEEE Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 5, № 4. – P. 8–36.
39. In-Datacenter Performance Analysis of a Tensor Processing Unit / N. Jouppi, C. Young, N. Patil et al. // ACM SIGARCH Computer Architecture News. – 2017. – Vol. 45, № 2. – P. 1–12.

В.С. Конюховский*,

кандидат физико-математических наук, профессор;

А.Н. Симонов*,

кандидат техн. наук, доцент

*Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ ИНТЕРФЕРИРУЮЩИХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ

Для использования в многолучевой и многосигнальной ситуации синтезирован алгоритм поляризационного пеленгования интерферирующих радиоизлучений. Синтез алгоритма опирается на пространственные свойства фигуры, являющейся результатом аддитивного сложения электромагнитных полей от различных источников радиоизлучений в сосредоточенной триортогональной антенной системе, а в его основе лежит проецирование результирующего радиоизлучения на произвольный сканирующий вектор.

Ключевые слова: поляризационное пеленгование, интерференция радиоизлучений.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство описанных в научной литературе методов пеленгования источников радиоизлучений (ИРИ), таких как амплитудные, фазовые, частотные и корреляционные основаны на ортогональности плоскости фронта фаз к направлению распространения радиоволны [1–11]. Однако у радиоволн существует другое важное пространственное свойство – ортогональность векторов магнитной и электрической составляющих электромагнитного поля (т. е. поляризации) к направлению распространения. Используя это свойство, можно определять пеленг на источники радиоизлучений, применяя поляризацию в качестве координатно-информативного параметра.

В работах [12–17] предложен и описан подход к пеленгованию ИРИ, который, в отличие от традиционных подходов, опирающихся на использование распределенной антенной системы (АС) и выявление различий времени прихода радиоволны в разнесенные точки пространства, основан на сосредоточенной триортогональной антенной системе (ТОАС), способной определять поляризацию радиосигнала в точке приема. Описанный в работе [18] подход был расширен для оценивания пеленгов одновременно на два источника радиоизлучений в условиях интерференции, когда сумма векторов \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 напряженности электрических полей двух различных радиоизлучений, в общем случае, с эллиптической поляризацией (рис. 1,а) дает результирующий вектор \mathbf{E}_Σ , конец которого описывает в пространстве сложную объемную фигуру с непрерывно изменяющимися формой и ориентацией звеньев (рис. 1,б).

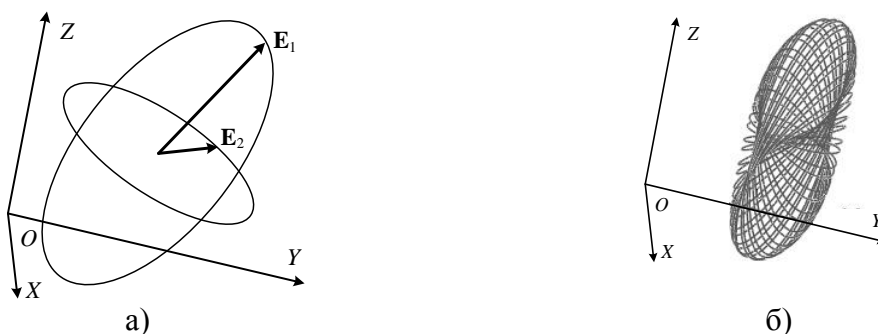


Рис. 1. Исходные радиоизлучения (а) и результат их интерференции (б)

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [18] получено уравнение пространственной кривой (см. рис. 1,б) и предложено извлекать из него пространственные параметры, т. е. пеленги на каждый ИРИ, путем решения систем дифференциальных уравнений. Однако оказалось, что получаемые системы уравнений общего решения не имеют. Целью данной статьи является устранение этого недостатка путем синтеза алгоритма поляризованного пеленгования интерферирующих радиоизлучений.

Основой алгоритма является обнаруженное свойство пространственной кривой (см. рис. 1,б), состоящее в том, что при определенном ракурсе фигура проецируется в параллелограмм (рис. 2), нормали к сторонам которого указывают направления на интерферирующие радиоизлучения, поэтому исходной в алгоритме должна быть процедура проецирования вектора \mathbf{E}_z на выбранное направление.

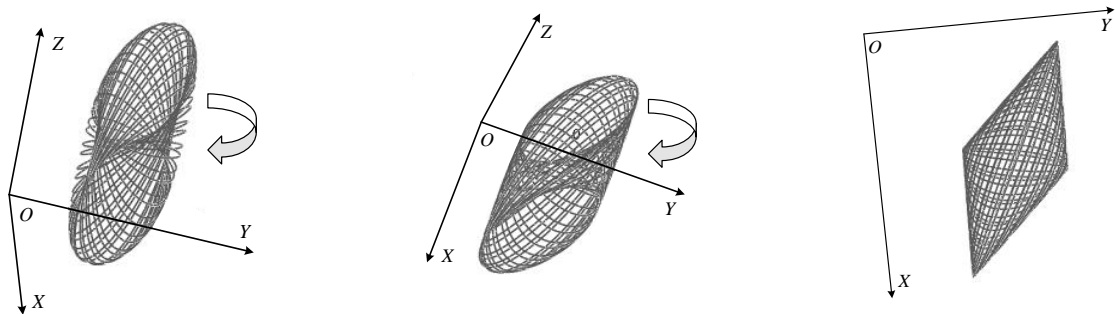


Рис. 2. Поиск правильного ракурса

СИНТЕЗ ПРОЦЕДУРЫ ПРОЕЦИРОВАНИЯ ВЕКТОРА НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ ВЕКТОР

Пусть радиоизлучение формирует в точке приема вектор поля $\mathbf{u} = r(\cos t \sin t \ 0)^T$, лежащий в плоскости xOy , и существует произвольный единичный вектор $\mathbf{p} = (\cos \psi \ 0 \ \sin \psi)^T$, образующий с плоскостью поля угол ψ (рис. 3).

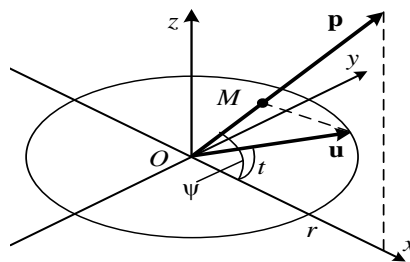


Рис. 3. Проекция вектора поля на произвольный вектор

Точка M – проекция конца вектора \mathbf{u} на вектор \mathbf{p} , тогда

$$\overline{OM} = \lambda \mathbf{p}, \quad (1)$$

где $\lambda = pr_p \mathbf{u} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{p} = r \cos \psi \cos t = A \cos t$ ($A = r \cos \psi$).

Будем рассматривать t как значение случайной величины T , равномерно распределенной на промежутке $[0; 2\pi]$. Плотность распределения T имеет вид

$$f_T(t) = \frac{1}{2\pi}, \quad t \in [0; 2\pi]. \quad (2)$$

Тогда λ является значением случайной величины Λ , зависящей от переменной T :

$$\Lambda = \varphi(T), \quad (3)$$

где $\varphi(t) = A \cos t$, т. е. $\Lambda \in [-A; A]$.

Функция распределения величины Λ находится как

$$F_{\Lambda}(y) = P(\Lambda < y) = P(\varphi(t) < y) = P(t \in E_y), \quad (4)$$

где $E_y = \{t | \varphi(t) < y\} = \{t | A \cos t < y\}$.

Уравнение $A \cos t = y$ на промежутке $[0; 2\pi]$ имеет два корня (рис. 4):

$$t_1 = \arccos \frac{y}{A}; \quad t_2 = 2\pi - \arccos \frac{y}{A}, \quad (5)$$

т. е. $E_y =]t_1, t_2[$.

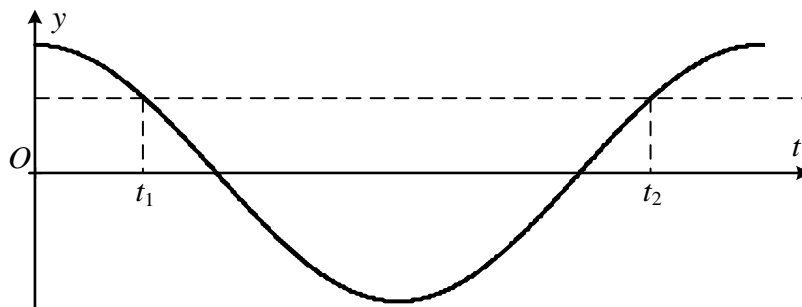


Рис. 4. Уравнение $A \cos t = y$

Тогда

$$F_{\Lambda}(y) = \int_{t_1}^{t_2} f_T(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2\pi} dt = \frac{1}{2\pi} \left(2\pi - 2 \arccos \frac{y}{A} \right) = 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \frac{y}{A}, \quad y \in [-A; A], \quad (6)$$

$$F_{\Lambda}(y) = \begin{cases} 0, & y < -A \\ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \frac{y}{A}, & y \in [-A; A] \\ 1, & y > A \end{cases} \quad (7)$$

Характерный график $F_{\Lambda}(y)$ (для $A=2$) представлен на рис. 5.

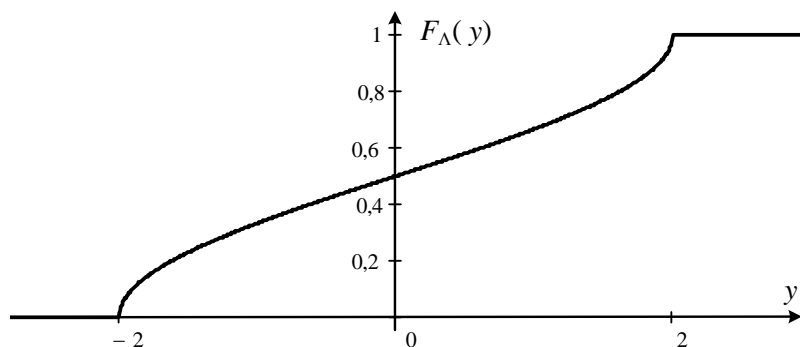


Рис. 5. Функция распределения $F_{\Lambda}(y)$

Плотность распределения случайной величины Λ

$$f_{\Lambda}(y) = \frac{dF_{\Lambda}(y)}{dy} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{y^2}{A^2}}} \frac{1}{A} = \frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - y^2}}, \quad y \in [-A; A], \quad A = r \cos \psi, \quad (8)$$

таким образом,

$$f_{\Lambda}(y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - y^2}}, & y \in]-A; A[, \\ 0, & y \notin]-A; A[. \end{cases} \quad (9)$$

Характерный график $f_{\Lambda}(y)$ (для $A = 2$) представлен на рис. 6.

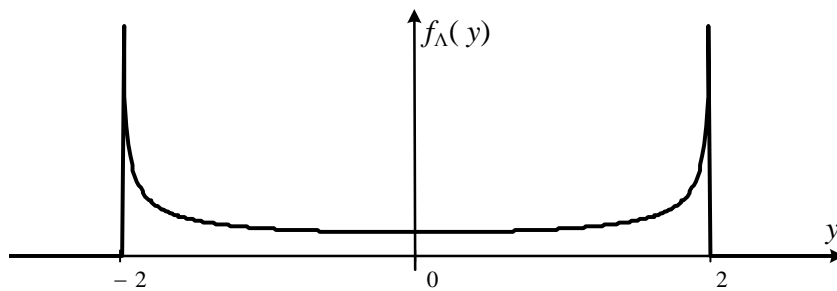


Рис. 6. График плотности распределения $f_{\Lambda}(y)$

Пусть теперь вектор поля лежит в плоскости Π с единичной нормалью

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \beta_0 \\ 0 \end{pmatrix}_s = \begin{pmatrix} \cos \beta_0 \sin \theta_0 \\ \cos \beta_0 \cos \theta_0 \\ \sin \beta_0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

и \mathbf{p} – произвольный вектор,

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \theta \\ \beta \\ 1 \end{pmatrix}_s = \begin{pmatrix} \cos \beta \sin \theta \\ \cos \beta \cos \theta \\ \sin \beta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

индекс s обозначает сферическую систему координат.

Если $\psi = \angle(\mathbf{p}, \Pi)$ – угол между вектором \mathbf{p} и плоскостью Π , то

$$\sin \psi = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \psi \right) = \cos(\angle(\mathbf{p}, \mathbf{n})) = \mathbf{p} \cdot \mathbf{n}. \quad (12)$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \sin \psi &= \cos \beta \cos \beta_0 (\sin \theta \sin \theta_0 + \cos \theta \cos \theta_0) + \sin \beta \sin \beta_0 = \\ &= \cos \beta \cos \beta_0 \cos(\theta - \theta_0) + \sin \beta \sin \beta_0. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом

$$\cos^2 \psi = 1 - \sin^2 \psi. \quad (14)$$

После синтеза процедуры проецирования единичного радиоизлучения на выбранное направление можно перейти к синтезу процедуры проецирования интерференционной смеси двух сигналов на заданный вектор.

СИНТЕЗ ПРОЦЕДУРЫ ПРОЕКЦИРОВАНИЯ СУММЫ ПОЛЕЙ С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ ВЕКТОР

Рассмотрим два радиоизлучения, создающие в точке приема поля $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$, имеющие амплитуды r_1, r_2 и расположенные в плоскостях с нормальными $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$:

$$\mathbf{n}_k = \begin{pmatrix} \theta_k \\ \beta_k \\ 1 \end{pmatrix}_s = \begin{pmatrix} \cos\beta_k \sin\theta_k \\ \cos\beta_k \cos\theta_k \\ \sin\beta_k \end{pmatrix}, \quad k=1,2. \quad (15)$$

Если \mathbf{p} – произвольный вектор,

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \theta \\ \beta \\ 1 \end{pmatrix}_s = \begin{pmatrix} \cos\beta \sin\theta \\ \cos\beta \cos\theta \\ \sin\beta \end{pmatrix}, \quad (16)$$

то проекции полей $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ на вектор \mathbf{p} являются случайными величинами Λ_1, Λ_2 с плотностями распределения

$$f_k(y; \theta, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{A_k^2 - y^2}}, & y \in]-A_k; A_k[, \\ 0, & y \notin]-A_k; A_k[, \end{cases} \quad (17)$$

где

$$A_k = r_k \cos\psi_k, \quad (18)$$

$$\sin\psi_k = \cos\beta \cos\beta_k \cos(\theta - \theta_k) + \sin\beta \sin\beta_k. \quad (19)$$

Суммарное поле $\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2$ имеет случайную проекцию на вектор \mathbf{p} , равную $\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2$. Если считать случайные величины Λ_1, Λ_2 взаимно независимыми, то плотность распределения Λ равна свертке плотностей Λ_1, Λ_2 :

$$f_\Lambda(y; \theta, \beta) = f_1(y; \theta, \beta) * f_2(y; \theta, \beta) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(y-t) dt. \quad (20)$$

Поскольку плотности Λ_1, Λ_2 финитны, формула для свертки принимает вид

$$f_\Lambda(y; \theta, \beta) = \begin{cases} \int_{-A_1}^{y+A_2} f_1(t) f_2(y-t) dt, & y \in [-A_1 - A_2; A_1 - A_2], \\ \int_{-A_1}^{A_1} f_1(t) f_2(y-t) dt, & y \in [A_1 - A_2; -A_1 + A_2], \\ \int_{y-A_2}^{A_1} f_1(t) f_2(y-t) dt, & y \in [-A_1 + A_2; A_1 + A_2]. \end{cases} \quad (21)$$

Характерный график плотности распределения суммарной проекции (для $A_1 = 0,6$ и $A_2 = 1,2$) представлен на рис. 7.

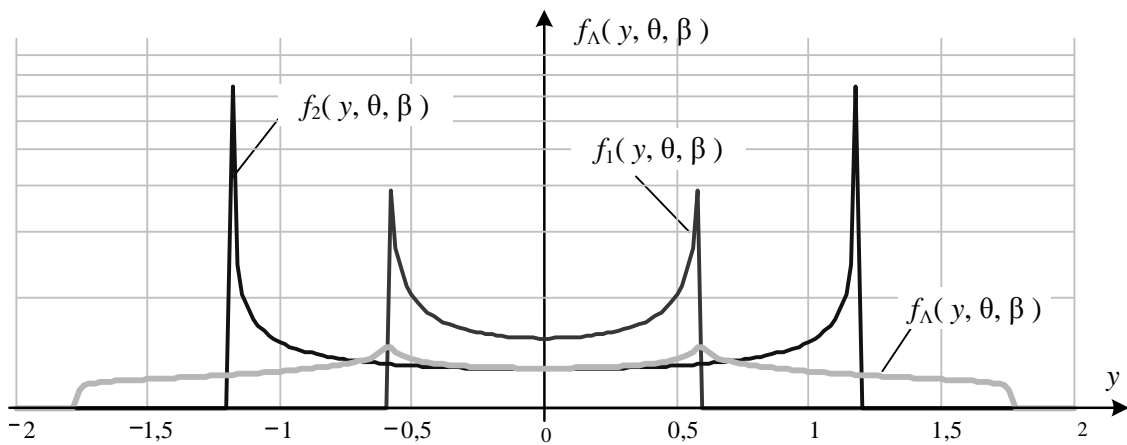


Рис. 7. График плотности распределения $f_{\Lambda}(y; \theta, \beta)$

Если вектор \mathbf{p} близок к одному из векторов нормалей, например к \mathbf{n}_1 , то угол ψ_1 становится близким к $\pi/2$ и параметр $A_1 = r_1 \cos \psi_1$ будет близок к 0. В этом случае график свертки выглядит так, как показано на рис. 8.

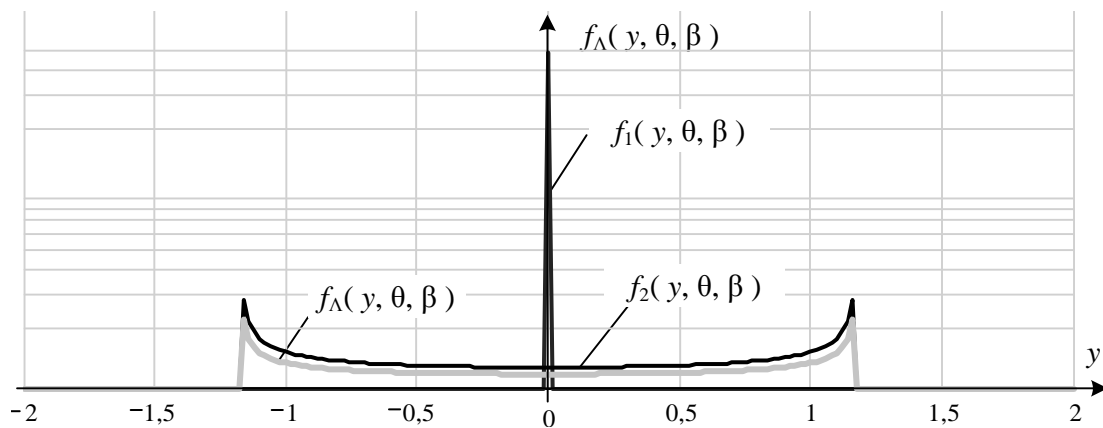


Рис. 8. График свертки $f_{\Lambda}(y; \theta, \beta)$ при приближении к искомому направлению

В пределе, когда $\psi_1 = \pi/2$, плотность распределения Λ_1 вырождается в дельта-функцию $\delta(y)$, поскольку величина Λ_1 становится дискретной (проекция поля \mathbf{u}_1 на вектор \mathbf{p} с вероятностью 1 равна нулю). В этом случае

$$f_{\Lambda}(y; \theta, \beta) = \delta(y) * f_2(y; \theta, \beta) = f_2(y; \theta, \beta). \quad (22)$$

Пусть $\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2$ и $0 < \varepsilon < 2A_1$. Оценим $f_{\Lambda}(y; \theta, \beta)$ при $y = A - \varepsilon$:

$$\begin{aligned}
f_{\Lambda}(A-\varepsilon) &= \frac{1}{\pi^2} \int_{A_1-\varepsilon}^{A_1} \frac{1}{\sqrt{A_1^2-t^2}} \frac{1}{\sqrt{A_2^2-(A-\varepsilon-t)^2}} dt = \\
&= \frac{1}{\pi^2} \int_{A_1-\varepsilon}^{A_1} \frac{1}{\sqrt{(A_1+t)(A_1-t)}} \frac{1}{\sqrt{(A_2+A-\varepsilon-t)(A_2-A+\varepsilon+t)}} dt = \left. \begin{array}{l} A_1-t=\tau \\ t=A_1-\tau \\ dt=-d\tau \end{array} \right| \\
&= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\varepsilon} \frac{1}{\sqrt{(2A_1-\tau)\tau}} \frac{1}{\sqrt{(2A_2-\varepsilon+\tau)(\varepsilon-\tau)}} d\tau = \\
&= \frac{1}{\pi^2} \frac{1}{\sqrt{(2A_1-\tau_0)(2A_2-(\varepsilon-\tau_0))}} \int_0^{\varepsilon} \frac{1}{\sqrt{\tau(\varepsilon-\tau)}} d\tau, \quad \tau_0 \in [0; \varepsilon].
\end{aligned}$$

Используя теорему о среднем [19], получим:

$$\int_0^{\varepsilon} \frac{1}{\sqrt{\tau(\varepsilon-\tau)}} d\tau = \left. \begin{array}{l} \tau=t+\varepsilon/2 \\ t=\tau-\varepsilon/2 \\ d\tau=dt \end{array} \right| = \int_{-\varepsilon/2}^{\varepsilon/2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2}+t\right)\left(\frac{\varepsilon}{2}-t\right)}} dt = 2 \int_0^{\varepsilon/2} \frac{dt}{\sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2-t^2}} = 2 \arcsin 1 = \pi.$$

Таким образом,

$$f_{\Lambda}(A-\varepsilon) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{(2A_1-\tau_0)(2A_2-(\varepsilon-\tau_0))}}, \quad \tau_0 \in [0; \varepsilon] \subseteq [0; 2A_1]. \quad (23)$$

При достаточно малых δ плотность распределения $f_{\Lambda}(y)$ в окрестности $[A-\delta; A]$ увеличивается при $A_1 \rightarrow 0$. Следовательно, вероятность попадания проекции поля \mathbf{u} в эту окрестность

$$P(\Lambda \in [A-\delta; A]) = \int_{A-\delta}^A f_{\Lambda}(y) dy \quad (24)$$

также будет увеличиваться.

Полученный результат служит основой для алгоритма поиска нормалей к плоскостям расположения полей $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$. В качестве нормали может быть выбран такой вектор

$\mathbf{p}^* = (\theta^* \ \beta^* \ 1)_s^T$, при котором целевая функция

$$S(\theta, \beta) = \int_{A-\delta}^A f_{\Lambda}(y; \theta, \beta) dy \quad (25)$$

(при некотором δ) достигает локального максимума в точке (θ^*, β^*) .

АЛГОРИТМ ПОИСКА НАПРАВЛЕНИЙ НА ИСТОЧНИКИ ИНТЕРФЕРИРУЮЩИХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ

Пусть интерферирующие радиоизлучения от двух источников образуют суммарное поле $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_1(t) + \mathbf{u}_2(t)$, где поля $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ имеют нормали $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$. Предположим, поле $\mathbf{u}(t)$ наблюдается в дискретные равномерно распределенные моменты времени $t_k, k \in [1; N]$. Множество наблюдаемых значений поля $\mathbf{u}(t)$ имеет вид $D = \{\mathbf{a}_k = \mathbf{u}(t_k)\}$. Зафиксируем не-

который вектор $\mathbf{p} = (\theta \ \beta \ 1)_s^T$ и образуем множество Q проекций векторов $\mathbf{a}_k \in D$ на вектор \mathbf{p} (рис. 9):

$$Q = \{\lambda_k = pr_{\mathbf{p}} \mathbf{a}_k \mid k \in [1; N]\}. \quad (26)$$

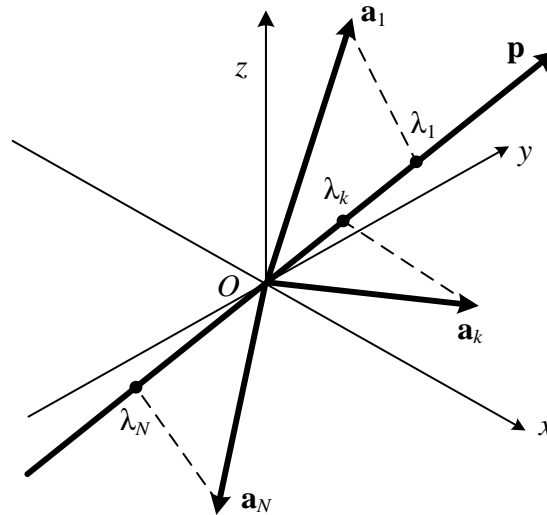


Рис. 9. Множество векторов суммарного поля и их проекции

Обозначим $A = \max_k \lambda_k$ и выберем $\delta > 0$. Количество значений $\lambda_k > A - \delta$ может служить оценкой вероятности $S(\theta, \beta)$. Поэтому в качестве целевой функции можно выбрать

$$S(\theta, \beta) = |E_{\mathbf{p}}|, \quad (27)$$

где $E_{\mathbf{p}} = \{\lambda_k \mid \lambda_k > A - \delta\}$, а знак $|\cdot|$ означает мощность (количество элементов) множества.

Более целесообразно рассматривать целевую функцию с использованием веса, придающего бóльшую значимость проекциям, близким к A . Например, можно применить весовую функцию (рис. 10)

$$w(\lambda) = 1 - \left(\frac{A - \lambda}{\delta} \right)^2, \quad \lambda > A - \delta. \quad (28)$$

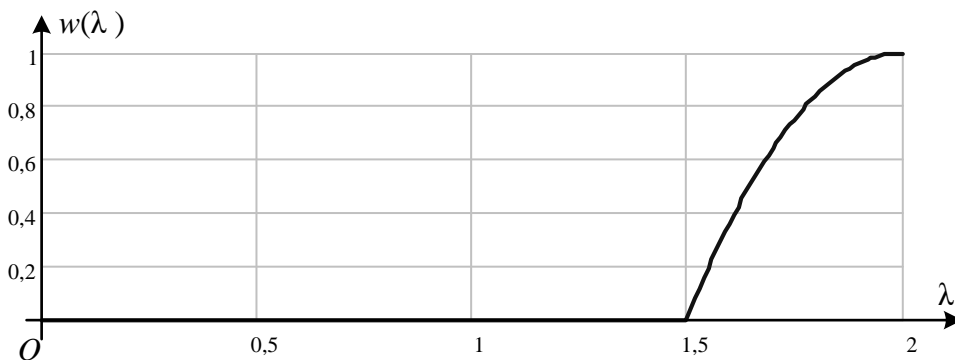


Рис. 10. Весовая функция

Тогда

$$S(\theta, \beta) = \sum_{\lambda_k \in E_p} w(\lambda_k). \quad (29)$$

В силу уже сделанного допущения о дискретности наблюдений, поиск оптимального вектора \mathbf{p}^* , максимизирующего функцию $S(\theta, \beta)$, предлагается производить в два этапа.

На *первом этапе* выполняется локализация оптимального вектора. Область изменения оптимизируемых параметров (θ, β) можно ограничить прямоугольником $[-\pi, \pi] \times [0, \pi]$. Данная область покрывается достаточно частой прямоугольной сеткой значений $(\theta_i, \beta_j)_{m \times n}$. Каждой точке сетки соответствует вектор $\mathbf{p}_{i,j} = (\theta_i, \beta_j, 1)^T$. Вычисляются значения целевой функции для каждого вектора $\mathbf{p}_{i,j}$: $s_{i,j} = S(\theta_i, \beta_j)$. Среди значений $s_{i,j}$ выбираются два наибольших, которым соответствуют индексы (i', j') и (i'', j'') . Параметры $(\theta_{i'}, \beta_{j'})$ и $(\theta_{i''}, \beta_{j''})$ служат начальными приближениями для второго этапа оптимизации.

На *втором этапе* выполняется уточнение оптимального вектора. Найденные начальные значения $(\theta_{i'}, \beta_{j'})$ и $(\theta_{i''}, \beta_{j''})$ уточняются с помощью симплекс-метода (Nelder–Mead method) [19].

Результатом работы алгоритма служат векторы $\mathbf{p}_1^*, \mathbf{p}_2^*$, теоретически совпадающие с нормальными $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ к полям $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от амплитудных, фазовых и частотных методов поляризационное пеленгование основано на свойстве ортогональности векторов электрического и магнитного полей к вектору Пойнтинга. Имеющиеся методы поляризационного пеленгования не обеспечивали интерференционной устойчивости в многосигнальной и многолучевой ситуации, что не позволяло использовать их в сложной сигнально-помеховой обстановке.

В ходе исследований была обнаружена возможность извлечения пространственной информации из фигуры, формируемой концом результирующего вектора интерференционной смеси нескольких радиоизлучений. Для извлечения этой пространственной информации, а именно для нахождения направления на каждый источник сигнала, синтезирован алгоритм пеленгования интерферирующих радиоизлучений. Применение синтезированного алгоритма позволяет использовать поляризационное пеленгование для разделения нескольких радиоизлучений или лучей.

Список используемых источников

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / под ред. А. М. Рембовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 640 с.
2. Липатников В. А., Царик О. В. Методы радиоконтроля. Теория и практика: моногр. – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2018. – 608 с.
3. Poisel R. A. Electronic Warfare Target Location Methods. – Artech House: Norwood MA, 2005. – 272 p.
4. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. – М.: Радиотехника, 2004. – 432 с.
5. Сайбель А. Г. Основы теории и методы местоопределения источников радиоизлучения: учеб. пособие. – СПб.: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1997. – 76 с.

6. Методика построения эллипсоида ошибок для оценивания точности определения местоположения земных станций систем спутниковой связи с применением беспилотного летательного аппарата / К.Л. Овчаренко, И.Ю. Еремеев, Ю.Н. Гайчук, П.Е. Петухов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2017. – Т. 18, № 11. – С. 22–26.
7. Мезин В.К. Автоматические радиопеленгаторы. – М.: Сов. радио, 1969. – 216 с.
8. Кукес И.С., Старик М.Е. Основы радиопеленгации. – М.: Сов. радио, 1964. – 640 с.
9. Дворников С.В., Саяпин В.Н., Симонов А.Н. Теоретические координатометрии источников радиоизлучений: учеб. пособие. – СПб.: ВАС, 2007. – 80 с.
10. Симонов А.Н., Волков Р.В., Дворников С.В. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учеб. пособие / под ред. А.Н. Симонова. – СПб.: ВАС, 2017. – 248 с.
11. Кудрявцев А.М., Смирнов А.А., Федянин А.В. Алгоритм "трассовой" обработки данных радиомониторинга // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 1 (93). – С. 38–42.
12. Симонов А.Н., Богдановский С.В. Пространственно-поляризационная модель источника радиоизлучения на основе математики кватернионов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – №5. – С. 60–64.
13. Пат. РФ на изобретение № 2624449. Способ поляризационного пеленгования радиосигналов / Симонов А.Н., Богдановский С.В., Волков Р.В. Севидов В.В. – Оpubл. 04.07.2017, Бюл. №19.
14. Пат. РФ на изобретение № 2619915. Способ определения координат источника радиоизлучений с борта летательного аппарата / Симонов А.Н., Богдановский С.В., Гайдин А.П., Клишин А.В. – Оpubл. 19.05.2017, Бюл. №14.
15. Симонов А.Н., Богдановский С.В., Теслевич С.Ф. Поляризационный метод пеленгования источников радиоизлучения в пространстве // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2016. – Т. 17, № 12. – С. 40–43.
16. Богдановский С.В., Дворников С.В., Симонов А.Н. Способ поляризационно-адаптивной обработки радиоизлучений в определении местоположения радиоэлектронных средств с беспилотных летательных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2017. – Вып. 3. – С. 62–69.
17. Богдановский С.В., Симонов А.Н., Овчаренко К.Л. Метод определения координат источников радиоизлучения на основе поляризационных измерений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 657. – С. 41–46.
18. Дворников С.В., Симонов А.Н. Поляризационное пеленгование интерферирующих радиоизлучений источников мобильного телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2018. – Вып. 3. – С. 116–122.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1977. – 832 с.

Т.О. Мысливцев;
доктор техн. наук, доцент;
В.Ф. Павский,
кандидат техн. наук, доцент;
В.Н. Цыкунов

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВОЙ ПУЛЬСАРНОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В условиях развития ГНСС ГЛОНАСС важным вопросом остается совершенствование средств и систем эфемеридно-временного обеспечения. Одним из направлений, позволяющим качественно улучшить характеристики навигационной системы, является создание высокоточного репера частоты и времени в космосе.

Технологический подход требует выведения на орбиту стандартов частоты, характеристики которых должны постоянно поддерживаться на уровне, сравнимом с наземными синхронизаторами. Другой вариант создания высокоточного репера частоты и времени – это использование источников естественного космического радиоизлучения, например пульсаров.

При формировании на борту геостационарного космического аппарата (КА) автономной пульсарной шкалы времени необходимо учитывать множество эффектов, вносящих погрешности в формирование шкалы.

В статье рассмотрены вопросы влияния эффекта Доплера на точность формирования пульсарной шкалы времени, возникающего за счет движения КА по орбите как относительно пульсара, так и относительно Земли.

Ключевые слова: эфемеридно-временное обеспечение, космический аппарат, пульсар, шкала времени, эффект Доплера.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стратегия развития системы ГЛОНАСС предполагает развертывание высокоорбитального сегмента, в том числе выведение на орбиту нескольких геостационарных космических аппаратов, позволяющих повысить качество координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей [1].

Для поддержания качественных показателей эфемеридно-временного обеспечения ГНСС ГЛОНАСС предлагается принимать излучение нейтронных звезд (пульсаров) на борту КА, расположенного на геостационарной орбите (ГСО).

С использованием технологии приема и обработки излучения пульсаров становится возможным сформировать высокостабильную бортовую шкалу времени КА, сопоставимую по характеристикам с наземными атомными часами [2]. Эффект от предлагаемого варианта формирования репера частоты и времени в космосе достигается за счет повышения автономности функционирования орбитального сегмента системы ГЛОНАСС в условиях ограниченного взаимодействия с наземным комплексом управления. При приеме излучения пульсаров на борту КА, за счет его движения по орбите относительно барицентра Солнечной системы и Земли, возникает сдвиг частоты, вызванный эффектом Доплера, который необходимо учитывать при формировании пульсарной бортовой шкалы времени.

ПУЛЬСАРНАЯ ШКАЛА ВРЕМЕНИ НА БОРТУ КА

В случае формирования автономной пульсарной шкалы на борту КА стабильность зависит от периодичности прихода импульсов излучения пульсара. Момент прихода наблюдаемых радиоимпульсов зависит от параметров вращения – периода P или частоты ν и их

производных [3]. Связь времени, частоты и периода выражается либо в виде зависимости номера импульса N от частоты импульсов и ее производных –

$$N(v, t) = v_0 t + \frac{1}{2} \dot{v} t^2 + \frac{1}{6} \ddot{v} t^3 \quad (1)$$

либо в виде зависимости времени прихода импульса N от периода и его производных –

$$PT(N) = t_0 + P_0 N + \frac{1}{2} P_0 \dot{P} N^2 + \frac{1}{6} (P^2 \ddot{P} - 2P_0 \dot{P}^2) N^3. \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой модель пульсарной шкалы ($PT - PulsarTime$), где t_0 – начало эпохи хронометрирования излучения пульсара; P_0 – период вращения пульсара; N – номер импульса; \dot{P} и \ddot{P} – первая и вторая производные периода вращения пульсара. При этом необходимо учитывать ряд астрономических поправок, связанных с собственным движением и параллаксом пульсара, релятивистского запаздывания радиосигналов в гравитационном поле Солнечной системы, межзвездной среде, ионосфере и тропосфере Земли [3]. В предлагаемом варианте формирования шкалы времени поправки, связанные с прохождением излучения пульсара через слои атмосферы, исключаются путем размещения приемника на борту КА.

При приеме излучения пульсаров на борту КА, за счет его движения по орбите относительно барицентра Солнечной системы и Земли, возникает сдвиг частоты на величину F_d . Так как при размещении репера частоты и времени в космосе эффект Доплера становится наиболее существенным, необходимо оценить его влияние на стабильность пульсарной шкалы времени [5].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ ПРИ ПРИЕМЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ НА БОРТУ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО КА

Для оценки проявления эффекта Доплера на принимаемое на борту КА излучение пульсара предположим (рис. 1), что направление его излучения совпадает с плоскостью орбиты КА (угол $\alpha = 0$, положение 1 по стрелке A). КА, находясь на орбите с высотой $H_{КА}$ над уровнем моря вращается вместе с Землей относительно ее центра по окружности с радиусом $R_r = R_3 + H_{КА}$, где R_3 – радиус Земли.

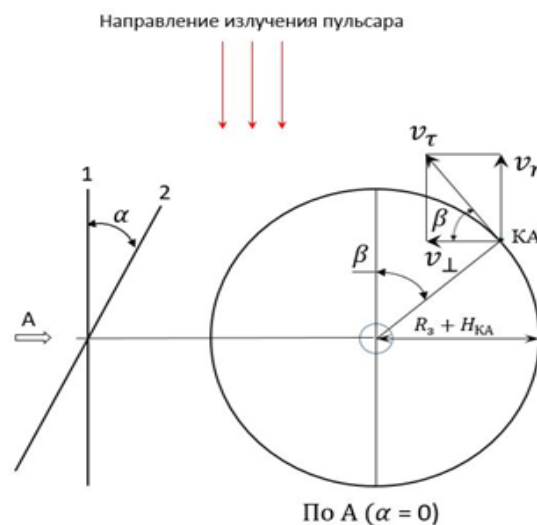


Рис. 1. Схема наблюдения пульсара

КА движется с тангенциальной скоростью $v_{\tau_{КА}}$, которая по отношению к направлению радиоизлучения пульсара представляется в виде векторной суммы двух взаимно ортогональных составляющих – продольной (радиальной) v_r и поперечной v_{\perp} , которые в принятой системе координат, в зависимости от угла β , и составляют:

$$\begin{aligned}v_r &= v_{\tau_{КА}} \sin \beta, \\v_{\perp} &= v_{\tau_{КА}} \cos \beta.\end{aligned}$$

При этом полагается, что ось диаграммы направленности основного лепестка приемной антенны КА совпадает с направлением излучения пульсара независимо от угла β . При изменении положения плоскости орбиты КА, относительно направления излучения пульсара на угол α (положение 2 по стрелке), изменяется радиальная составляющая относительной скорости:

$$v_r = v_{\tau_{КА}} \sin \beta \cos \alpha.$$

Указанные составляющие скорости приводят к изменению частоты принимаемого излучения пульсара – доплеровскому смещению частоты F_d первого, обусловленного радиальным движением, и второго, определяемого поперечным движением КА, порядков.

Входящая в приведенные выше формулы тангенциальная скорость КА определяется соотношением [4]

$$v_{\tau_{КА}} = \left(\frac{GM_3}{R_3 + H_{КА}} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где G – гравитационная постоянная;

M_3 – масса Земли.

Знание приведенных выше скоростей и зависимостей продольной и поперечной составляющих от пространственного положения КА на орбите позволяет оценить уровень доплеровского смещения частоты и его роль в формировании пульсарной шкалы времени. Используя классическую формулу специальной теории относительности, определяющую сдвиг (смещение) частоты при эффекте Доплера первого и второго порядков, представим соотношение для относительного доплеровского смещения частоты F_d / f_0 для рассматриваемого варианта движения КА:

$$F_d / f_0 = \left(1 + \frac{v_{\tau_{КА}} \sin \beta \cos \alpha}{c} \right) / \left[1 - \left(\frac{v_{\tau_{КА}} \cos \beta}{c} \right)^2 \right]^{0,5} - 1, \quad (4)$$

где c – скорость света;

f_0 – частота приема пульсарного излучения;

или

$$F_d / f_0 = \frac{v_{\tau_{КА}} \sin \beta \cos \alpha}{c} - 0,5 \left(\frac{v_{\tau_{КА}} \cos \beta}{c} \right)^2. \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) следует, что при фиксированном угле α существует положение КА на орбите, характеризуемое углом β , при котором вследствие противоположности знаков частоты Доплера первого и второго порядков величина $F_d = 0$. Значение угла β может быть найдено из соотношения

$$\alpha = \arccos \left(\frac{v_{\tau_{КА}} \cos \beta}{c} \operatorname{tg} \beta \right). \quad (6)$$

Приведенные выше формулы отражают парциальное воздействие вращения КА вокруг центра Земли и Солнца на доплеровское смещение частоты принимаемого излучения пульсара. Совместное воздействие этих факторов при приеме излучения пульсаров на борту КА можно представить в виде сложного движения КА со скоростью, ортогональные составляющие которой – продольная (радиальная, вдоль направления радиоизлучения пульсара) $v_{r\Sigma}$ и соответственно поперечная $v_{\perp\Sigma}$ – составляют:

$$v_{r\Sigma} = (v_{\tau_{КА}} \sin \beta_3 + v_{\tau_3} \sin \beta_C) \cos \alpha, \quad (7)$$

$$v_{\perp\Sigma} = v_{\tau_{КА}} \cos \beta_3 + v_{\tau_3} \cos \beta_C. \quad (8)$$

В этом случае величина F_D / f_0 окончательно может быть записана как следующее соотношение:

$$F_D / f_0 = \left(\frac{v_{\tau_{КА}}}{c} \sin \beta_3 + \frac{v_{\tau_3}}{c} \sin \beta_C \right) \cos \alpha - 0,5 \left(\frac{v_{\tau_{КА}}}{c} \cos \beta_3 + \frac{v_{\tau_3}}{c} \cos \beta_C \right)^2. \quad (9)$$

В данных условиях суммарная временная поправка к формируемой бортовой пульсарной шкале времени может быть определена из соотношения (9).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВОЙ ПУЛЬСАРНОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ

Результаты моделирования изменения величины F_D / f_0 при изменении угла β и фиксированных значениях угла направления на пульсар α представлены на рис. 2 и 3.

На рис. 3 более детально показаны значения F_D / f_0 при фиксированном угле наблюдения пульсара $\alpha = 90^\circ$ и угле положения КА относительно Земли.

При расчетах были приняты следующие значения, входящих в формулы величин: масса и радиус Земли с $M_3 = 6 \cdot 10^{24}$ кг, $R_3 = 6370$ км; высота орбиты КА $H_{КА} = 35786$ км; тангенциальная скорость Земли $v_{\tau_3} = 30$ км/с; скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²·кг⁻²; частота приема излучения пульсаров $f_0 = 1$ ГГц

Если переходить в барицентрическую систему координат для оценивания пульсарной шкалы времени, то необходимо провести расчет доплеровского смещения частоты относительно барицентра Солнечной системы. Полученные формулы могут быть применены для оценки влияния доплеровского смещения частоты на принимаемое КА излучение пульсара при вращении вокруг Солнца, при этом полагая, что КА находится на ГСО и период вращения равен периоду вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости величины F_D / f_0 от угла β , отсчитываемого от годового вращения КА в плоскостях орбиты Земли вокруг Солнца $\beta = \beta_C$, при фиксированных значениях угла α .

На рис. 5 более детально показаны значения F_D / f_0 при фиксированном угле наблюдения пульсара $\alpha = 90^\circ$ и угле положения КА относительно Солнца.

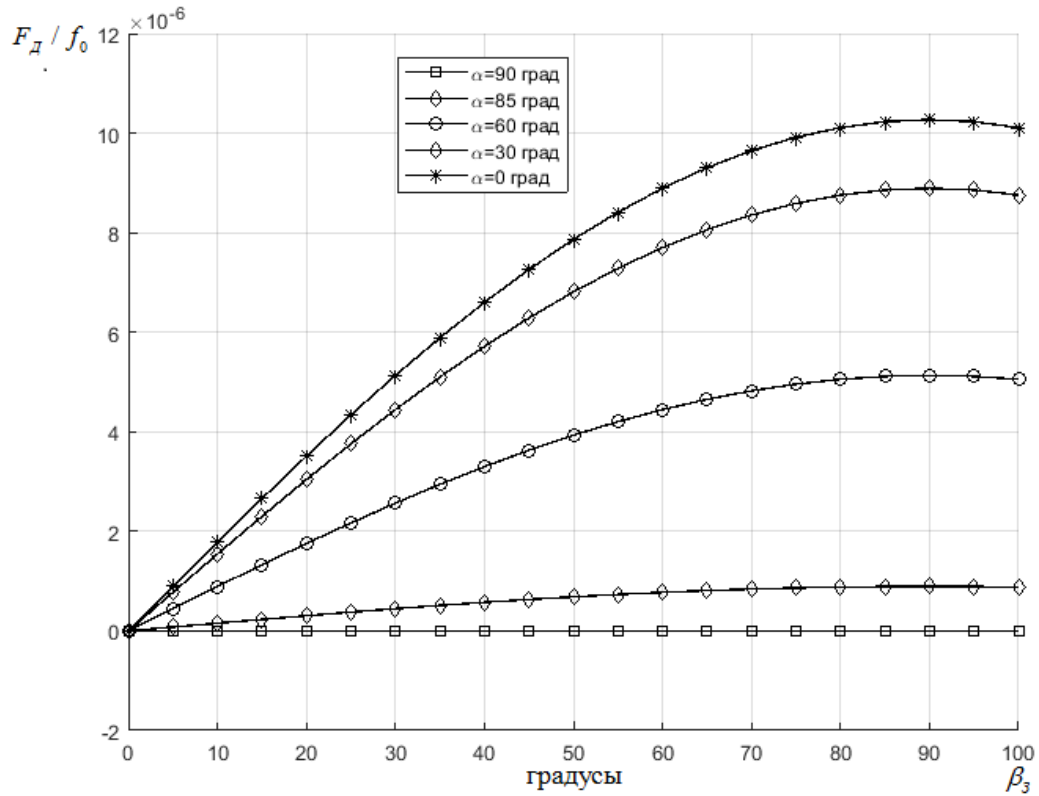


Рис. 2. Зависимости величины F_D / f_0 в плоскости орбиты Земли $\beta = \beta_3$ при фиксированных значениях угла α

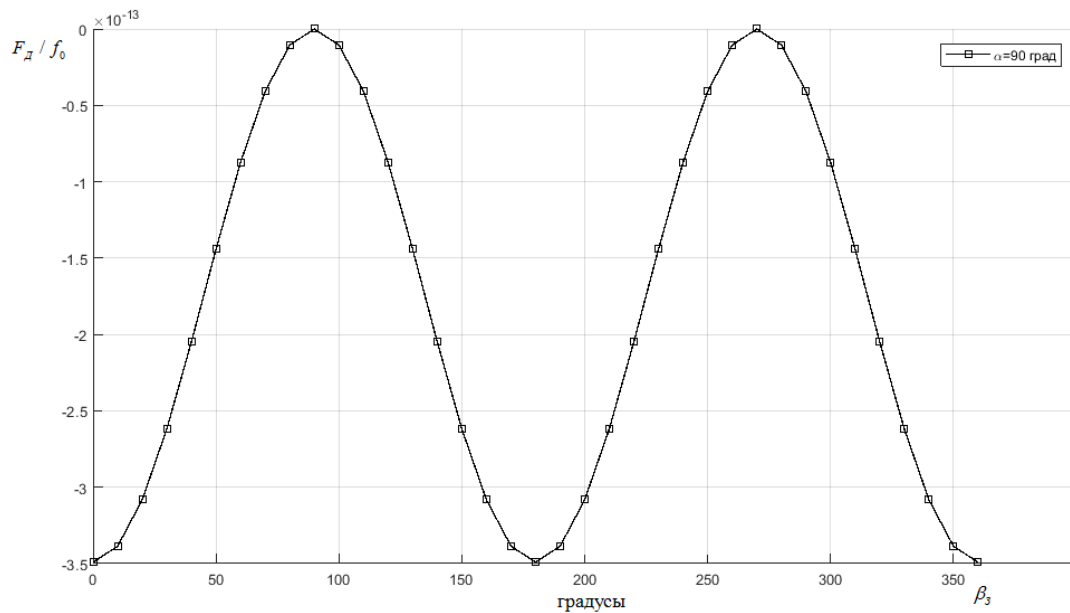


Рис. 3. Изменения значения F_D / f_0 при фиксированном угле наблюдения пульсара $\alpha = 90^\circ$

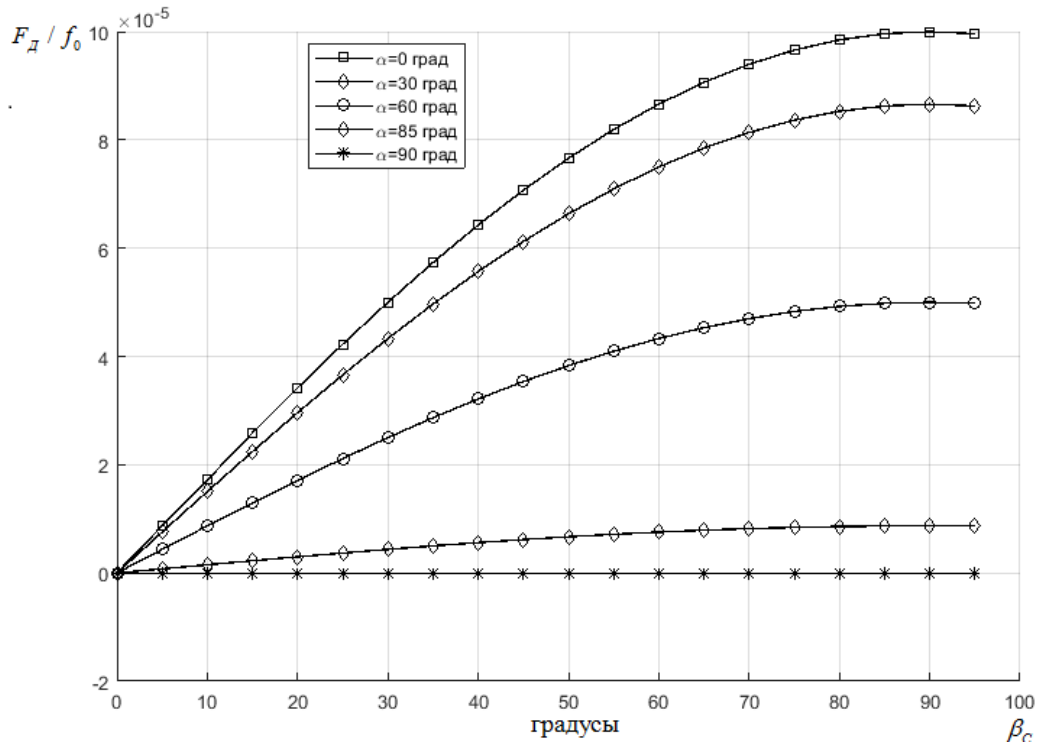


Рис. 4. Зависимости величины F_D / f_0 в плоскости орбиты Солнца $\beta = \beta_C$ при фиксированных значениях угла α .

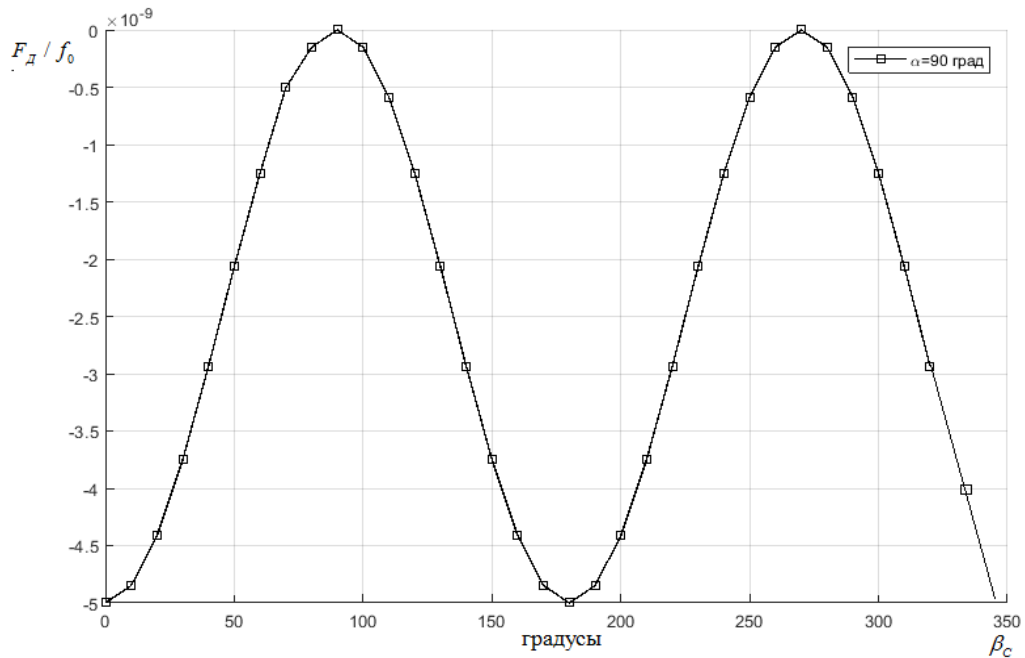


Рис. 5. Положение КА относительно Солнца, когда парциальные значения $F_D / f_0 = 0$

Приведем результаты численного расчета доплеровского сдвига частоты и его влияния на характеристики пульсарной шкалы времени на примере пульсара J1643-1224 (табл. 1) с фиксированными углами наблюдения α на частоте приема, равной 1000 МГц.

Таблица 1

**Доплеровский сдвиг частоты и поправки времени к пульсарной шкале времени
на примере пульсара J1643-1224**

α , градусы	$F_{D_3 \max}$, Гц	$F_{D_C \max}$, Гц	$\Delta t_{D_3 \max}$, мкс	$\Delta t_{D_C \max}$, мкс	Δt , мкс
0	11000	100000	0,12	1,38	1,5
30	8350	812000	0,0256	0,752	0,776
60	4500	37000	0,0089	0,0926	0,1015
85	250	1500	0,00092	0,0069	0,0782

В таблице используются следующие обозначения:

$F_{D_3 \max}$ – максимальное значение сдвига частоты приема при движении относительно Земли;

$F_{D_C \max}$ – максимальное значение сдвига частоты приема при движении относительно Солнца;

$\Delta t_{D_3 \max}$ – максимальное значение ухода пульсарной шкалы времени при $F_{D_3 \max}$;

$\Delta t_{D_C \max}$ – максимальное значение ухода пульсарной шкалы времени при $F_{D_C \max}$;

Δt – максимальное значение ухода пульсарной шкалы времени в барицентрической системе координат при приеме излучения пульсаров на борту КА.

Из анализа результатов численного моделирования следует, что доплеровский сдвиг частоты, возникающий за счет движения КА на ГСО относительно Земли, оказывает существенное влияние на нестабильность формируемой пульсарной шкалы и требует разработки алгоритмов и аппаратно-программных решений для компенсации сдвига частоты при приеме излучения пульсаров.

Кроме того, доплеровское смещение частоты относительно барицентра Солнечной системы на несколько порядков выше, что также необходимо учитывать при вычислении моментов прихода импульсов пульсаров в барицентрической системе координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного математического и численного моделирования учета влияния эффекта Доплера при приеме излучения пульсаров на борту геостационарного КА в интересах эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС можно сделать следующие выводы:

– для уменьшения нестабильности бортовой пульсарной шкалы времени необходима разработка программно-алгоритмического комплекса компенсации эффекта Доплера, возникающего за счет движения геостационарного КА по орбите;

– наибольшее смещение частоты приема излучения пульсаров происходит при углах β , равных и близких к 90° и 270° , за счет радиальной составляющей радиальной скорости КА; наименьшее смещение частоты приема излучения пульсаров наблюдается при углах β , равных и близких к 0° и 180° , за счет поперечной составляющей скорости КА;

– существует положение КА, при котором вследствие противоположности знаков продольного и поперечного смещений частоты приема, результирующая частота доплеровского смещения обращается в ноль;

– для минимизации смещения частоты следует выбирать по возможности пульсары, направление радиоизлучения которых по отношению к плоскости орбиты КА составляет угол α , близкий к 90° ;

– полученная после компенсации эффекта Доплера высокоточная пульсарная шкала времени может быть использована при автономном формировании временных поправок для коррекции бортовых шкал времени навигационных КА системы ГЛОНАСС.

Список используемых источников

1. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы». – Утв. Постановлением Правительства РФ №189 от 3 марта 2012 г. – URL: <https://www.glonass-iac.ru/> (дата обращения: 27.12.2019).
2. Пульсарная шкала времени / В.Е. Жаров, В.В. Орешко, В.А. Потапов и др. // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96, №2. – С. 102–143.
3. *Авраменко А.Е.* Пульсар: Природный эталон времени – пространства. – М.: Ленанд, 2015. – 164 с.
4. *Авраменко А.Е.* Нейтронная звезда: от экстремальной турбулентности вспышки сверхновой к эталонной монотонности когерентного излучения пульсара // *Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. – 2015. – № 5. – С. 25–35
5. *Кузнецов В.И.* Обоснование метода решения задачи автономного определения параметров движения космических аппаратов на основе взаимной обработки результатов измерений пульсарных излучений // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2019. – Вып. 667. – С. 110–116.

О.С. Алексеев,
кандидат техн. наук;
В.И. Гущин;
С.А. Масленников,
кандидат военных наук;
И.А. Николаев

МОДЕЛЬ СОЗДАНИЯ ЭТАЛОНОВ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ОРТОФОТОПЛАНОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ АЭРОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ДАННЫХ ВОЗДУШНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

Предлагается модель создания эталонов фотоизображений объектов местности цифровых ортофотопланов на основе комплексирования информации аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов и данных воздушной лазерной локации. Эта модель основана на операционно-временной модели системы создания цифровых карт и фотодокументов. Обоснованы качественные характеристики эталонных фотоизображений, используемых в программных комплексах интерактивного дешифрирования. Определены преимущества способа создания эталонов фотоизображений на основе цифровых ортофотопланов, созданных по материалам аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов и данных воздушной лазерной локации.

Ключевые слова: цифровой ортофотоплан, эталонные фотоизображения, аэросъемка, беспилотный летательный аппарат, фотодокументы, воздушная лазерная локация.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы интерактивного дешифрирования фотоизображений местности значительно сокращают сроки картографирования территории. В основу работы таких систем закладываются различные алгоритмы анализа как фотоизображений картографируемой территории, так и эталонов фотоизображений, по которым производится распознавание объектов местности. При этом для корректной работы программно-аппаратных комплексов дешифрирования необходимо соответствующее обеспечение в виде эталонных фотоизображений объектов исследуемой местности. В работах [3, 7] рассмотрены способы создания эталонных фотоизображений на основе съемки поверхности Земли космическими аппаратами. Перспективным способом создания эталонных фотоизображений является способ аэросъемки с использованием беспилотного летательного аппарата (далее – БпЛА), оснащенного аппаратурой воздушной лазерной локации.

На основе материалов аэросъемки с использованием БпЛА подразделениями Топографической службы Вооруженных Сил Российской Федерации могут создаваться различные виды геопространственной информации. Существующей технологией предусмотрено выполнять плано-высотное обоснование съемки с использованием БпЛА на базе имеющихся картографических данных, что существенно снижает точность определения координат по конечному документу. Вместе с тем низкая точность определения координат не позволяет производить обработку материалов съемки в части трансформирования снимков с необходимым качеством. Исходя из изложенного можно сделать вывод, что существующие модели создания фотодокументов о местности, на основе которых получают эталоны фотоизображений отдельных объектов, не применимы для решения задач автоматизированного дешифрирования.

Рассматриваемая в настоящей статье модель создания эталонов фотоизображений объектов местности отличается от ранее созданных наличием математического аппарата, позво-

ляющего определить требования к геометрическому разрешению аэроснимков БпЛА с учетом их последующего комплексирования с данными, полученными способом воздушной лазерной локации.

В условиях недоступности местности для наземных геодезических измерений данные воздушной лазерной локации могут заменить материалы планово-высотного обоснования снимков [6]. С этой целью необходимо увеличивать плотность воздушной лазерной локации для получения полноценного лазерного изображения земной поверхности, что в дальнейшем будет являться основой для ортотрансформирования материалов аэросъемки БпЛА. Сущность способа воздушной лазерной локации заключается в получении в процессе полета БпЛА большого количества точек лазерных отражений (далее – ТЛО) путем многократных измерений лазерным сканером импульсного типа. Данный способ получения ТЛО является альтернативой способу получения точек плановой полевой подготовки путем наземных геодезических измерений.

После создания ортофотоплана на основе аэрофотосъемки и воздушной лазерной локации и выполнения оценки его качества оператором производится выбор отдельных фрагментов его изображения, которые содержат соответствующие объекты местности. Данные изображения переносятся в базу эталонов фотоизображений местности с указанием пространственных характеристик объекта местности. Для детального рассмотрения вопроса создания эталонов фотоизображений объектов необходимо обоснование качественных характеристик материалов съемки БпЛА, которыми следует руководствоваться при создании ортофотопланов для целей дешифрирования.

ОБОСНОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПОГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, СОЗДАВАЕМОЙ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗДУШНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БпЛА

На этапе планирования производства работ по картографированию территории всегда определяются размеры искомых объектов. Интерактивное дешифрирование с использованием эталонов, как правило, производится по компактным объектам. Для определения оптимального разрешения эталонов фотоизображений воспользуемся формулой определения вероятности распознавания простых искусственных объектов [3]:

$$P_{\text{распоз}} = \exp\left[-\left(B \frac{A}{L}\right)^2\right], \quad (1)$$

где A – разрешение снимка;

L – максимальный линейный размер объекта;

B – коэффициент распознавания формы объекта.

Коэффициент распознавания формы объекта определяется как [3]

$$B = \sqrt{\frac{GR}{S_{\phi}}}, \quad (2)$$

где S_{ϕ} – площадь объекта;

G – периметр, рассчитываемый по контуру объекта (на снимке);

\overline{R} – среднее между радиусами окружностей вписанной в контур фигуры и описанной вокруг контура.

При расчете B необходимо учитывать наличие теней и атмосферных искажений. Поэтому величину A необходимо рассчитывать исходя из возможности распознавания объекта с вероятностью не менее 0,8 [1].

Таким образом, зная минимальные значения площади объекта, определим требуемую разрешающую способность документа:

$$A_{\text{треб}} = \frac{\sqrt{(-\ln P_{\text{распоз}})}}{B} \times L. \quad (3)$$

При дешифрировании снимков для осуществления целеуказания артиллерии размеры объектов принято рассматривать как произведение длины цели по фронту l_c на длину цели в глубину h_c , тогда преобразуем выражение (3) в другой вид –

$$A_{\text{треб}} = \sqrt{(h_c^2 + l_c^2)} \cdot \sqrt{(-\ln P_{\text{распоз}})} \cdot \left(\sqrt{\frac{(2h_c + 2l_c) \cdot R}{(h_c \cdot l_c)}} \right)^{-1}.$$

После упрощения выражения получим

$$A_{\text{треб}} = \sqrt{\left(\frac{h_c \cdot l_c (h_c^2 + l_c^2)}{2(h_c + l_c) \cdot R} \right)} \cdot (-\ln P_{\text{распоз}}). \quad (4)$$

Полученное выражение применимо и в системах автоматизированного дешифрирования. Применительно к таким системам заменим значения l_c и h_c на размеры объекта по фронту l_n и в глубину m_n соответственно.

На практике значение $A_{\text{треб}}$ нельзя воспринимать однозначно как окончательное. Его необходимо сравнивать с требуемым значением разрешения снимков, получаемых в целях обеспечения точности определения координат A_h и высот точек местности $A_{ск}$, и выбирать из этих значений самое минимальное, т. е.

$$A = \min \{ A_h, A_{ск}, A_{\text{треб}} \}. \quad (5)$$

Вследствие значимости критерия оперативности при создании эталонов фотоизображений объектов местности построение модели создания цифровых ортофотопланов целесообразно выполнять на основе расчета операционно-временных затрат.

ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ОРТОФОТОПЛАНОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ АЭРОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ДАННЫХ ВОЗДУШНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

Общий математический вид классической операционно-временной модели топогеодезического обеспечения имеет вид

$$\tau_{\text{ТГО}} = \tau_{\text{геод}} + \tau_{\text{фотогр}} + \tau_{\text{карт}} + \tau_{\text{скарт}}, \quad (6)$$

где $\tau_{\text{геод}}$ – блок геодезической подсистемы;

$\tau_{\text{фотогр}}$ – блок фотограмметрической подсистемы;

$\tau_{\text{карт}}$ – блок картографической подсистемы;

$\tau_{\text{спкарт}}$ – блок специальной картографической подсистемы.

Если рассматривать модель, функционирующую на основе применения БпЛА, то в модель необходимо вводить дополнительный блок, описывающий работу подсистемы аэросъемки $\tau_{\text{афс}}$. Также необходимо учесть и блок навигационной подсистемы $\tau_{\text{нав}}$. Таким образом, модель системы будет состоять из шести блоков. При этом мероприятия по аэрофотосъемке и воздушной лазерной локации и мероприятия полевых топографических работ могут осуществляться параллельно друг другу. Тогда преобразуем выражение (6) к следующему виду:

$$\tau_{\text{ТГНО}} = \left(\left(\frac{\tau_{\text{геод}} + \tau_{\text{афс}}}{2} \right) + \left| \frac{\tau_{\text{геод}} - \tau_{\text{афс}}}{2} \right| \right) + \tau_{\text{фотогр}} + \tau_{\text{карт}} + \tau_{\text{спкарт}} + \tau_{\text{нав}}. \quad (7)$$

Предложенная в выражении (7) математическая зависимость блоков геодезической подсистемы $\tau_{\text{геод}}$ и подсистемы аэросъемки $\tau_{\text{афс}}$ позволяет произвести оценку временных затрат на выполнение протекающих параллельно процессов.

Для определения последовательности обработки материалов аэросъемки с использованием БпЛА рассмотрим технологию изготовления топогеодезической информации (далее – ТГИ) по материалам аэрофототопографической съемки [2, 3].

Аэрофототопографическая съемка включает:

- аэрофотосъемку (воздушную съемку и лазерную локацию);
- полевые топографические работы;
- камеральные фототопографические работы.

Камеральные фототопографические работы при аэрофототопографической съемке включают [4]:

а) Фотограмметрические работы.

Отличительной особенностью предлагаемой модели является использование данных воздушной лазерной локации, которые позволяют вместо точек планово-высотной основы, полученных способом наземных геодезических измерений, применять массив ТЛО.

В свою очередь, обработка массива ТЛО включает следующие этапы [5, 6]:

- сшивку лазерных сканов $\tau_{2.1}$;
- трансформацию ТЛО в локальную систему координат участка работ, «нарезку» на планшеты длиной до 1000 м вдоль оси трассы $\tau_{2.2}$;
- классификацию лазерных точек $\tau_{2.3}$;
- создание цифровой модели рельефа $\tau_{2.4}$;
- ортотрансформирование аэроснимков $\tau_{2.5}$;
- создание растровой модели поверхности земли $\tau_{2.6}$;
- трансформирование аэрофотоснимков $\tau_{2.7}$;
- монтаж трансформированных аэрофотоснимков $\tau_{2.8}$.

б) Работы по дешифрированию и оформлению.

Они включают:

- камеральное дешифрирование полученного аэроматериала $\tau_{3.1}$;
- создание слоя семантики $\tau_{3.2}$;
- изготовление репродукций $\tau_{3.3}$.

Полевые топографические работы при аэрофототопографической съемке включают:

а) Наземные геодезические работы.

К ним относятся:

– определение координат точек установки наземных пунктов управления полетом БПЛА (в условной системе координат) $\tau_{1.1}$;

– дешифрирование аэрофотоснимков и съемку неизобразившихся на аэрофотоснимках объектов местности $\tau_{1.2}$;

– пересчет координат точек установки наземных пунктов управления полетом в геодезическую систему координат $\tau_{1.3}$;

– сбор других сведений о местности $\tau_{1.4}$.

б) Съемка местности БПЛА.

Процесс получения материалов аэросъемки с использованием БПЛА в зависимости от различных факторов и технических характеристик аппаратов будет иметь различные технологические циклы. Вместе с тем все они сводятся к одной последовательности [1, 2].

– предпусковые работы и запуск $\tau_{4.1}$;

– съемка на маршрутах (ограничена максимальным временем полета БПЛА) $\tau_{4.2}$;

– поиск места приземления БПЛА и извлечение полученных материалов $\tau_{4.3}$.

Таким образом, технология создания фотодокументов с применением цифровых снимков БПЛА подразумевает задействование только четырех подсистем из существующих шести. Еще одной значимой подсистемой является подсистема управления. Рассмотрим каждый из пяти задействованных блоков более подробно.

1. Блок геодезической подсистемы.

Общий вид блока геодезической подсистемы обусловлен выполняемыми видами геодезических работ по привязке наземных станций управления полетом, которые помогают определять координаты точек фотографирования:

$$\tau_{\text{геод}} = \begin{cases} \tau_{1.1} = \tau_{1.1.1} + \tau_{1.1.2} + \tau_{1.1.3} + \tau_{1.1.4} \\ \tau_{1.2} = \tau_{1.2.1} + \tau_{1.2.2} \\ \tau_{1.3} = \tau_{1.3.1} + \tau_{1.3.2} + \tau_{1.3.3} + \tau_{1.3.4} \end{cases} \Rightarrow \max \{ \tau_{1.1}; \tau_{1.2}; \tau_{1.3} \}. \quad (8)$$

Отличительной особенностью данного блока является то, что все этапы функционирования геодезической подсистемы могут осуществляться как согласованно друг с другом, так и независимо друг от друга.

2. Блок фотограмметрической подсистемы.

Блок данной подсистемы, так же, как и блок геодезической подсистемы, зависит от количества выделяемого личного состава, уровня автоматизации используемой техники и располагаемого времени. Однако отличительной особенностью данного блока является его строгая последовательность действий в соответствии с технологией изготовления фотодокументов о местности. Общий вид блока можно представить как

$$\tau_{\text{фотогр}} = \{ \tau_{2.1} \} + \{ \tau_{2.2} \} + \{ \tau_{2.3} \} + \tau_{2.4} + \{ \tau_{2.5} \} + \tau_{2.6} + \{ \tau_{2.7} \} + \{ \tau_{2.8} \}. \quad (9)$$

При этом в данном блоке учтена особенность зависимости времени функционирования подсистемы от количества точек планово-высотного обоснования и количества снимков в проекте аэросъемки.

3. Блок картографической подсистемы.

Картографическая подсистема менее зависима от автоматизации техники и в большей степени зависит от производительности средств размножения, доставки и хранения фотодокументов, поэтому ее вид можно представить следующим образом:

$$\tau_{\text{карт}} = \tau_{3.1} + \tau_{3.2} + \{\tau_{3.3}\}. \quad (10)$$

4. Блок подсистемы аэрофотосъемки.

Так как в некоторых случаях могут использоваться несколько БПЛА или один, но несколько раз, то блок будет иметь вид

$$\tau_{\text{афс}} = \{\tau_{4.1} + \tau_{4.2} + \tau_{4.3}\}. \quad (11)$$

5. Блок подсистемы управления.

При осуществлении руководства работами, выборе способа обработки материалов, а также при получении и уяснении задачи по созданию ТГИ будут присутствовать определенные временные затраты $\tau_{\text{упр}}^i$. Определим данные временные потери как

$$\tau_{\text{упр}} = \{\tau_{\text{упр}}^i\}. \quad (12)$$

Основываясь на операционно-временной модели топогеодезического обеспечения (7), выявленных особенностях создания ТГИ с использованием способа аэросъемки БПЛА и данных воздушной лазерной локации, предложим усовершенствованную операционно-временную модель создания специальных карт и фотодокументов на основе аэросъемки с БПЛА и данных воздушной лазерной локации

$$T_{\text{орт}} = \tau_{\text{упр}} + \left(\left(\frac{\tau_{\text{геод}} + \tau_{\text{афс}}}{2} \right) + \left| \frac{\tau_{\text{геод}} - \tau_{\text{афс}}}{2} \right| \right) + \tau_{\text{фотогр}} + \tau_{\text{карт}}. \quad (13)$$

Результатом работ по созданию фотодокументов является получение пространственно-определенной модели местности в виде ортофотоплана, состоящего из пикселей, описывающих как поверхность Земли, так и все расположенные на ней объекты в виде плановых координат X и Y , аппликаты Z и цветовой характеристики I . Погрешность получения координат по данному документу определяется как сумма ошибок – ошибок определения координат наземной станции управления полетом, определения координат точки фотографирования, определения углов крена и тангажа БПЛА.

Существуют и другие ошибки, влияющие на точность определения координат по ортофотоплану, но их значением можно пренебречь. Опыт создания ортофотопланов по данным БПЛА в рамках тактико-специального учения на местности «Горизонт-2019», проведенного в июле 2019 года, позволил на практике определить значение ошибок определения координат по цифровому ортофотоплану. В зависимости от количества точек планово-высотной основы, применяемых при создании ортофотоплана, точность определения координат составляет 0,6–0,65 мм в масштабе создаваемого ортофотоплана.

Основываясь на существующей методике создания ортофотопланов по материалам аэросъемки с БПЛА и данных воздушной лазерной локации, предложим соответствующую модель создания цифровых ортофотопланов на базе комплексирования информации аэросъемки с БПЛА и данных воздушной лазерной локации. В модель целесообразно включить все вышеописанные блоки подсистем ТГНО, а в блок подсистемы управления включить выражения (4) и (5) как составную часть подготовительных работ.

Применение предлагаемой модели позволит выполнять создание ортофотопланов на территории, расположенной в различных физико-географических условиях. При этом информация о растительном покрове и уменьшение влияния рельефа на структуру фотоизображения позволят из ортофотопланов выбирать отдельные участки местности, которые целесообразно применять в качестве эталонов дешифрирования. Качество данных эталонов будет способ-

ствовать повышению вероятности распознавания объектов местности при использовании комплексов интерактивного дешифрирования.

Блок-схема предлагаемой модели показана на рис. 1.

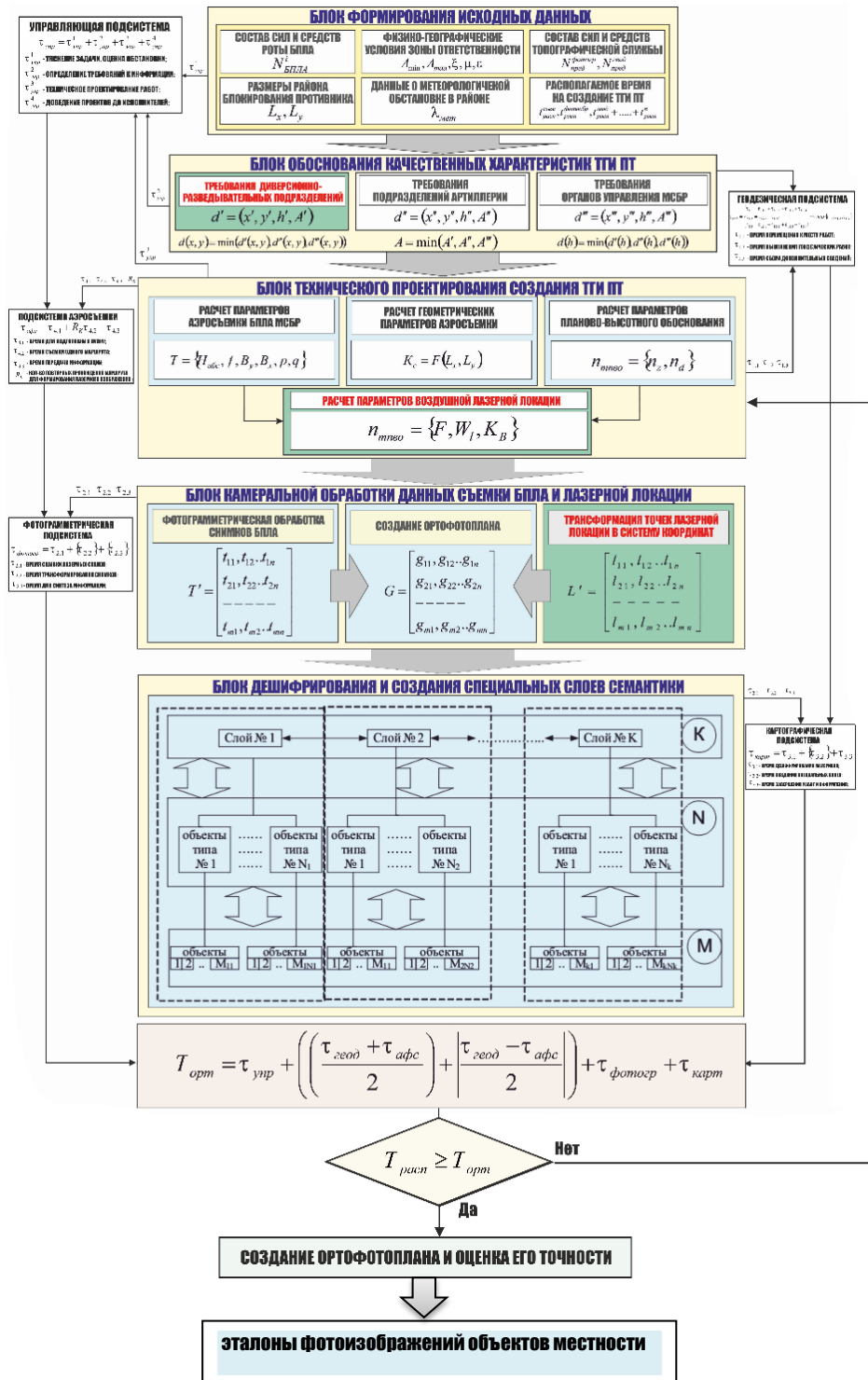


Рис. 1. Блок-схема модели создания эталонов фотоизображений объектов местности с использованием цифровых ортофотопланов на основе комплексирования информации аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов и данных воздушной лазерной локации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования информационных процессов по созданию эталонов фотоизображений в целях обеспечения работы комплексов интерактивного дешифрирования позволили:

- разработать модель создания цифровых ортофотопланов на основе комплексирования информации аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов и данных воздушной лазерной локации;
- обосновать качественные характеристики фотодокументов, создаваемых на основе результатов аэросъемки БПЛА и воздушной лазерной локации (4) и (5);
- обосновать операционно-временную модель создания эталонов фотоизображений на основе аэросъемки беспилотных летательных аппаратов и данных воздушной лазерной локации (6)–(12).

Исходя из изложенного использование соотношений (4) и (5) дает возможность определять требования программных средств интерактивного дешифрирования к качеству эталонов фотоизображений местности, на основе которых производится распознавание объектов.

Предложенная модель создания эталонов фотоизображений объектов местности с использованием цифровых ортофотопланов на основе комплексирования информации аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов и данных воздушной лазерной локации позволяет применять существующие средства аэросъемки, стоящие на вооружении и планируемые к закупке, для создания ортофотопланов. При этом она имеет ряд особенностей:

- *достоверность содержания создаваемых эталонов фотоизображений* будет обеспечиваться за счет высокой детализации материалов съемки;
- *высокая точность построенных цифровых моделей рельефа* позволяет избегать ошибок фотоизображения создаваемых эталонов путем уменьшения влияния рельефа местности за счет уменьшения шага построения ЦМР;
- *оперативность создания эталонных изображений* достигается за счет сокращения объемов полевых работ и внедрения нового способа планово-высотного обоснования снимков – способа воздушной лазерной локации.

Список используемых источников

1. *Гущин В.И., Котенок А.А., Кутузов Е.В.* Методика проектирования маршрутов патрулирования БЛА топогеодезического назначения в интересах огневого поражения противника мотострелковой бригады в наступлении. – СПб.: МВАА, 2013. – С. 164–171.
2. *Ессин С.А., Костюк А.Н.* Выбор параметров аэрофотосъемки для картографирования с БПЛА // *Земельный вестник Московской области.* – 2012. – №7. – URL: <http://zemvest.ru/jurnalarchive-jurnal7-201211> (дата обращения: 05.03.2019).
3. *Живичин А.Н., Соколов В.С.* Дешифрирование фотографических изображений. – М.: Недра, 1980. – 253 с.
4. *Дворецкий Е.М., Замалиев Ф.Ф., Козин Е.В.* Применение беспилотных летательных аппаратов при топогеодезическом обеспечении войск // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – Вып. 637, ч. 1. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – С. 32–37.
5. *Кочнева А.А., Мустафин М.Г.* Создание цифровых моделей рельефа для проектирования автодорог на основе технологии воздушного лазерного сканирования // *Естественные и технические науки.* – 2015. – №12 (90). – С. 90–96.

6. *Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р.* Лазерная локация земли и леса: учеб. пособие / Геолидар, Геокосмос. – 2-е изд., перераб. и доп. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.

7. *Назаров А.С.* Фотограмметрия: учеб. пособие для студентов вузов. – Мн.: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.

С.Г. Алёхин,
кандидат техн. наук, доцент

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА ОБЛАКОВ

Известно, что краткосрочный прогноз общего количества облаков составляется на основе учета факторов их образования, эволюции и рассеяния, т. е. прогноз облачности тесно связан с прогнозом синоптического положения.

При отсутствии аэрологического и синоптического материала прогноз облачности может осуществляться только физико-статистическими методами, среди которых сегодня наиболее предпочтительным в практике метеорологического обеспечения авиации является метод вероятностного инерционного прогноза.

Предлагается альтернатива этому методу – метод краткосрочного прогноза общего количества облаков, в основе которого лежит учет изменчивости такого метеорологического фактора, характеризующего состояние неба, как дефицит точки росы.

Ключевые слова: прогноз облачности, общее количество облаков, дефицит точки росы, вероятностный прогноз

ВВЕДЕНИЕ

Одной из типовых, но далеко не последней по значимости, задач метеорологического обеспечения пилотируемой и беспилотной авиации является краткосрочный прогноз общего количества облаков (ОКО).

В нашей стране при метеорологическом обеспечении полетов гражданской авиации такой прогноз составляется подразделениями ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» на основе синоптического материала, который непрерывно циркулирует между ними посредством программно-аппаратных комплексов (например, комплекса MITRA.Multilink). В состав комплекса MITRA.Multilink входят такие программные средства, как Гис-Метео, AVIA32m, Mitra-Navigator, Mitra-Access, обеспечивающие оперативное получение фактической и прогностической информации в удобном для пользователей виде. Кроме того, в качестве резервных источников метеорологической информации используются выделенные каналы сети Интернет. В этой связи в современной научной литературе практически отсутствуют новости о разработках физико-статистических методов прогноза метеорологических параметров, так как не предполагается, что информационный поток может быть нарушен и передача метеорологической информации, пусть и временно, но будет прервана.

В статье сделано такое предположение и предлагается метод краткосрочного прогноза общего количества облаков при отсутствии синоптического материала.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОГНОЗА ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА ОБЛАКОВ

Наблюдения за общим количеством облаков производятся визуально наблюдателем. Если не брать во внимание субъективный характер этих наблюдений и степень закрытости горизонта наземными объектами окружающей обстановки (известно, что ошибки наземных наблюдений составляют 1-2 балла), то степень закрытия неба облаками определяется по площади, равной площади круга с радиусом, который, в свою очередь, равен дальности видимого горизонта [1, 2]. Тогда

$$S_N = \pi r_g^2, \text{ где } r_g = 4,1\sqrt{h}. \quad (1)$$

Здесь S_N – площадь неба, наблюдаемая визуально с поверхности земли;
 r_g – дальность видимого горизонта, км;
 h – высота глаз наблюдателя над поверхностью земли, м.

Вывод приведенной формулы дается в учебниках геодезии и физической географии.

Так как наблюдения за общим количеством облаков не отличаются большой точностью, их прогноз составляется по градациям, например:

0–3 балла (ясно), 4–7 баллов (полуясно), 8–10 баллов (пасмурно);

0–3 балла (ясно), 4–6 баллов (полуясно), 7–10 баллов (пасмурно);

0 баллов (ясно), 1–3 балла, 4–6 баллов, 7–9 баллов, 10 баллов (пасмурно).

Прогнозы категорического типа для ОКО не составляются, так как они имеют низкую и разную абсолютную точность.

Степень уверенности в прогнозе ОКО является вероятностным фактором, который должен учитываться количественно, в виде некоторых вероятностных показателей. Поэтому для прогноза ОКО целесообразно использовать вероятностный подход. Самым известным на сегодняшний день методом физико-статистического прогноза ОКО можно считать метод на основе показателей двумерных распределений ОКО во времени. При составлении такого прогноза утверждается, что процесс изменения значений ОКО во времени в заданной точке при исключении суточного и годового хода можно с некоторым приближением считать стационарным и марковским [3].

Выбор временного интервала $\tau = t - t_0$ определяется заблаговременностью прогноза, которая зависит не только от цели и назначения прогноза, но и от изменчивости ОКО.

Облачность обладает большой изменчивостью, поэтому на практике удовлетворительные результаты дает вероятностный инерционный прогноз ОКО с заблаговременностью в несколько часов. При $\tau \geq 1$ сутки связь между значениями ОКО очень слаба, коэффициенты корреляции не превышают 0,4, и ее использование для прогноза нецелесообразно. Если брать более короткие промежутки времени до 24 ч, например $\tau = 3, 6, 9, \dots, 21$ ч, то коэффициенты корреляции значений ОКО в среднем составляют 0,7, что позволяет строить прогностические зависимости.

При высоких коэффициентах корреляции ($\geq 0,7$), полученных по достаточно длинному ряду наблюдений, оправдываемость вероятностного инерционного прогноза ОКО также высока. Но при небольших коэффициентах корреляции вероятностный инерционный прогноз может иметь достаточную оправдываемость, если велики двумерные или условные повторяемости используемого при прогнозе двумерного распределения.

Двумерные и условные повторяемости – это показатели двумерного распределения, позволяющие оценить вероятности появления различных значений метеорологического параметра в зависимости от предшествующей истории исследуемого процесса [4].

Двумерная повторяемость – это повторяемость различных сочетаний значений данного метеорологического параметра, разделенных заданным интервалом.

Условная повторяемость – это вероятность различных значений метеорологического параметра через заданный промежуток времени при заданных исходных значениях.

Двумерная повторяемость определяется как отношение суммы абсолютных частот попадания значений метеорологического параметра в соответствующие интервалы в исходный момент и в срок, для которого составляется прогноз к общему числу пар двумерного распределения:

$$p_{ij} = \frac{p_i + p_j}{n}, \quad (2)$$

где p_i – повторяемость значений метеорологического параметра в исходный момент;

p_j – повторяемость значений метеорологического параметра в срок, для которого составляется прогноз;

n – число пар двумерного распределения.

Условная повторяемость равна отношению значения двумерной повторяемости конкретного интервала к общему числу попаданий в заданной градации исходных значений:

$$p_{ij}^0 = \frac{p_{ij}}{\sum_{k=1}^n p_{ik}}. \quad (3)$$

Достоинства метода вероятностного инерционного прогноза состоят в следующем:

- используется максимум возможной климатической информации;
- в отличие от обычного вероятностного прогноза учитывается конкретное значение параметра в исходный срок, а значит, косвенно и характер атмосферных процессов;
- результаты вероятностного прогноза легче использовать, чем результаты категорического прогноза при решении прикладных задач с применением теории игр и теории принятия решений;
- прогноз имеет достаточно высокую оправдываемость;
- обеспечивается возможность количественно оценить в каждом конкретном случае целесообразность инерционного прогноза.

Рассмотрим содержание метода вероятностного инерционного прогноза ОКО, предложенного Н.В. Кобышевой [3, 5].

ПРОГНОЗ ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА ОБЛАКОВ ПО МЕТОДУ Н.В. КОБЫШЕВОЙ И ОЦЕНКИ ЕГО ОПРАВДЫВАЕМОСТИ

Развитие облачности во времени считается случайным процессом. Для получения вероятностных характеристик распределения ОКО во времени формируется ряд наблюдений и рассчитываются корреляционные функции для разных временных интервалов: сезонов года или месяцев. Если кривые корреляционных функций имеют вид экспоненты, то полагают, что процесс изменения во времени ОКО является марковским процессом, так как это необходимое и достаточное условие.

Марковский процесс, как было сказано выше, может быть охарактеризован двумерным законом распределения. В этом случае двумерные распределения количества облаков во времени несут в себе наиболее полную климатологическую информацию об этом процессе.

Данные распределения оформляются в виде таблицы, входами в которую служат значения количества облаков в исходный момент (левый столбец) и в срок, для которого составляется прогноз (рис. 1).

00-03 ч						00-03 ч					
Балл	Ясно	1-3	4-6	7-9	10	Балл	Ясно	1-3	4-6	7-9	10
Ясно	7,32	4,20	3,96	5,20	9,60	Ясно	0,24	0,14	0,13	0,17	0,32
1-3	4,68	1,56	1,32	2,56	6,96	1-3	0,27	0,09	0,08	0,15	0,41
4-6	4,12	1,00	0,76	2,00	6,40	4-6	0,29	0,07	0,05	0,14	0,45
7-9	5,24	2,12	1,88	3,12	7,52	7-9	0,26	0,11	0,09	0,16	0,38
10	9,00	5,88	5,64	6,88	11,28	10	0,23	0,15	0,15	0,18	0,29

а)

б)

Рис. 1. Двумерная повторяемость сочетаний общего количества облаков в 00 и 03 ч (а), число случаев; условная повторяемость прогнозируемого общего количества облаков разных градаций в 03 ч по данным за 00 ч (б), в долях единицы (ст. Кемь, март)

На рисунке представлен фрагмент таблицы, содержащей двумерную повторяемость сочетаний общего количества облаков по градациям в 00 и 03 ч (рис. 1,а) и условную повторяемость прогнозируемого общего количества облаков разных градаций в 03 ч по данным за 00 ч (рис. 1,б) в районе г. Кемь в марте. Если в 00 ч было ясно, то с вероятностью 0,32 в 03 ч бу-

дет пасмурно, а если было облачно 4–6 баллов, то пасмурно в 03 ч будет с вероятностью 0,45.

Для оценки качества вероятностного прогноза ОКО двумерное распределение аппроксимируется распределением Моргенштерна – Гумбеля [1, 5, 7]. Двумерная повторяемость $P(x_i, y_i)$ значений случайных величин, в данном случае общее количество облаков в исходный срок и срок прогноза, попадающих в градации $x_i - x_{i+1}$ и $y_i - y_{i+1}$, может быть рассчитана по формуле

$$P(x_i, y_i) = [F(x_{i+1}) - F(x_i)] \cdot [F(y_{i+1}) - F(y_i)] \cdot \{1 + [F(x_{i+1}) + F(x_i) - 1] \cdot [F(y_{i+1}) + F(y_i) - 1]\},$$

где $F(x_i)$, $F(x_{i+1})$, $F(y_i)$, $F(y_{i+1})$ – накопленные повторяемости значений общего количества облаков нижних и верхних границ интервалов в исходный срок и в срок прогноза.

Сравнительные оценки двумерных повторяемостей сочетаний облачности в 06 ч и 12 ч для Санкт-Петербурга в октябре, рассчитанные по уравнению Моргенштерна – Гумбеля и с помощью описанного метода, приведены в табл. 1, где согласование данных по критерию χ^2 выполняется на 5%-ном уровне значимости.

Таблица 1

**Двумерные повторяемости сочетаний облачности, число случаев
(г. Санкт-Петербург, октябрь)**

Количество облаков в 06 ч, баллы	Количество облаков в 12 ч, баллы							
	0–2		3–5		6–8		9–10	
	МГ	К	МГ	К	МГ	К	МГ	К
0–2	2,0	2,9	1,6	1,6	2,1	2,3	11,2	10,0
3–5	0,7	1,0	0,7	0,3	0,9	1,0	5,4	5,5
6–8	0,6	0,0	0,6	0,0	0,7	1,6	5,2	5,5
9–10	2,8	2,6	2,9	2,3	4,3	3,9	58,3	59,5

Примечание. МГ – оценки, рассчитанные по уравнению Моргенштерна – Гумбеля; К – оценки, рассчитанные по методу Н.В. Кобышевой.

В табл. 1 представлены двумерные повторяемости, которые в климатологии также называют средними значениями абсолютных частот интервалов. Эти значения получены по 10-летнему ряду наблюдений в октябре в г. Санкт-Петербург [5]. Сама по себе абсолютная частота не может служить климатическим показателем, так как зависит от длительности ряда, т. е. от входящего в него числа наблюдений. Поэтому, чтобы получить климатическую характеристику, не зависящую от длины ряда, вычисляют среднее, о чем и свидетельствует выражение (2).

Практическое использование описанного метода вероятностного инерционного прогноза ОКО Н.В. Кобышевой показало невысокую его точность в некоторых районах, в различные сезоны (месяцы) года и в случаях, когда условные повторяемости прогнозируемого общего количества облаков составляют менее 0,55.

Например, на рис. 2 представлены условные повторяемости прогнозируемого общего количества облаков разных градаций в 12, 15 и 18 ч по данным за 09 ч в Санкт-Петербурге в июне. Из рис. 2 видно, что независимо от наблюдаемого общего количества облаков в 9 ч с наибольшей вероятностью в 12, 15 и 18 ч следует ожидать облачность 7–10 баллов. Для проверки оправдываемости такого прогноза был использован архив данных наблюдений за ОКО в г. Санкт-Петербург с 2000 по 2016 год, полученный с сайта <http://aisori.meteo.ru>.

09-12 ч			
Балл	0-3	4-6	7-10
0-3	0,30	0,22	0,48
4-6	0,29	0,17	0,54
7-10	0,31	0,25	0,43
09-15 ч			
Балл	0-3	4-6	7-10
0-3	0,27	0,25	0,48
4-6	0,24	0,22	0,54
7-10	0,29	0,28	0,44
09-18 ч			
Балл	0-3	4-6	7-10
0-3	0,29	0,24	0,47
4-6	0,27	0,21	0,52
7-10	0,30	0,27	0,43

Рис. 2. Условные повторяемости прогнозируемого общего количества облаков разных градаций в 12, 15 и 18 ч по данным за 09 ч, в долях единицы (г. Санкт-Петербург, июнь)

Для сроков 12, 15 и 18 ч и градаций облачности: 0–3 балла (ясно), 4–6 баллов (полуясно), 7–10 баллов (пасмурно), по данным наблюдений за облачностью в 9 ч определялось ОКО методом Н.В. Кобышевой. Из 1419 произведенных прогнозов оправдались 977, т. е. оправдываемость вероятностного инерционного прогноза ОКО в июне в г. Санкт-Петербург составила 0,69.

Рассмотрим другой пример – для октября (рис. 3).

09-12 ч			
Балл	0-3	4-6	7-10
0-3	0,22	0,19	0,59
4-6	0,20	0,16	0,64
7-10	0,28	0,26	0,46
09-15 ч			
Балл	0-3	4-6	7-10
0-3	0,20	0,19	0,61
4-6	0,17	0,17	0,66
7-10	0,27	0,27	0,46
09-18 ч			
Балл	0-3	4-6	7-10
0-3	0,22	0,20	0,58
4-6	0,20	0,17	0,63
7-10	0,28	0,27	0,45

Рис. 3. Условные повторяемости прогнозируемого общего количества облаков разных градаций в 12, 15 и 18 ч по данным за 09 ч, в долях единицы (г. Санкт-Петербург, октябрь)

Из рис. 3 видно, что условные повторяемости прогнозируемого ОКО 7–10 баллов в октябре в среднем на 10% больше, чем для июня. Проверка оправдываемости такого прогноза в соответствии с упомянутым выше архивом данных наблюдений показала, что для сроков 12, 15 и 18 ч по данным наблюдений за облачностью в 9 ч из 1413 произведенных прогнозов оправдались 1124, т. е. оправдываемость вероятностного инерционного прогноза ОКО в октябре в г. Санкт-Петербург составила 0,80.

Кроме того, были использованы контрольные выборки данных наблюдений за ОКО в г. Санкт-Петербург за 2017, 2018 и 2019 годы. Оценки оправдываемости прогнозов ОКО для этих лет приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Оценки оправдываемости вероятностного инерционного прогноза ОКО
в 12, 15 и 18 ч по данным за 09 ч (г. Санкт-Петербург)**

Год	Июнь			Октябрь		
	Кол-во прогнозов	Успешных	Оправд.	Кол-во прогнозов	Успешных	Оправд.
2017	68	33	0,49	88	83	0,94
2018	71	40	0,56	93	63	0,68
2019	68	34	0,50	89	78	0,88

Относительно высокая оправдываемость прогнозов в октябре, в отличие от июня месяца, объясняется тем, что повторяемость ОКО 7–10 баллов в Санкт-Петербурге для светлого времени суток (09–18 ч) составляет $\approx 81\%$. Для июня этот показатель равен $\approx 69\%$.

Исходя из анализа проведенных исследований, можно сделать вывод, что для Санкт-Петербурга инерционный прогноз ОКО менее 7 баллов не целесообразен для тех месяцев, когда облачность 7–10 баллов наблюдается менее чем в 70% случаев. При этом замечено, что если значения условных повторяемостей ОКО для отдельных градаций не устойчивы и не превышают $\approx 0,55$, то оправдываемость инерционных прогнозов мала и они не представляют практический интерес.

Сделанные выводы согласуются с результатами исследований и выводами Н.В. Кобышевой [3, 5, 6]. Анализ немногочисленных работ по физико-статистическим методам прогнозирования ОКО и результатов большого количества численных экспериментов позволил получить аналитическую зависимость для краткосрочного прогноза ОКО, основанную на ряде рассуждений.

ПРОГНОЗ ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА ОБЛАКОВ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

На сегодняшний день теоретические и экспериментальные исследования [1, 3, 4, 7–9 и др.] показали связь между влагосодержанием атмосферы и облачностью. Признаком существования облачности на какой-либо высоте являются малые величины дефицита точки росы (d). Близость дефицита точки росы к нулю (или относительной влажности воздуха к 100%) означает близость состояния воздуха к условиям конденсации и, следовательно, наличие облачности. Дефицит точки росы также широко используется в оперативной практике для прогноза облачных слоев, хотя о наличии облачности не всегда однозначно можно судить по значениям дефицита точки росы, свойственным облакам. Редко, но бывают случаи, когда при малых значениях дефицита точки росы облачность отсутствует и, наоборот, она существует при его значениях, больших критических. В основном это связано с тем, что облачность постоянно эволюционирует, и здесь требуется знать вариации значений дефицита точки росы, характерных при рассеивании и образовании облачности.

Исследовать все возможные вариации дефицита точки росы для определения ОКО в различных географических районах – достаточно трудоемкая задача. Вместо этого обратим внимание на величину, характеризующую изменение дефицита точки росы от срока производства последних наблюдений до срока, на который составляется прогноз

$$\Delta d^* = d_0 - d^*, \quad (4)$$

где d_0 – значение дефицита точки росы в момент наблюдений;

d^* – прогностическое значение дефицита точки росы в срок, на который составляется прогноз ОКО.

Для снижения размерности величины Δd^* произведем ее нормировку на выборочное среднее:

$$\bar{d}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, i = 1(1)n, \quad (5)$$

где n – общее количество значений дефицита точки росы в выборке за сроки наблюдений, которые используются при составлении прогноза ОКО;

d_i – значение дефицита точки росы в i -й срок наблюдений.

Тогда величина $\frac{\Delta d^*}{\bar{d}^*}$ будет характеризовать долю изменения дефицита точки росы относительно выборочного среднего от срока производства последних наблюдений (t_0) до срока, на который составляется прогноз (t_i). То есть если $\frac{\Delta d^*}{\bar{d}^*} < 0$, то значения дефицита точки росы от срока к сроку увеличиваются и следует ожидать уменьшения ОКО. Обратное утверждение также справедливо, при $\frac{\Delta d^*}{\bar{d}^*} > 0$ следует ожидать увеличения ОКО. Если $\frac{\Delta d^*}{\bar{d}^*} = 0$, то от срока к сроку дефицит точки росы не меняется.

Допустим, что в заданном районе изменение дефицита точки росы за некоторый промежуток времени в течение суток пропорционально изменению ОКО за то же время. Тогда прогностическое значение балла ОКО на заданный срок (N^*) можно рассчитать на основе фактических данных наблюдений в срок, когда составляется прогноз, по формуле

$$N^* = N_0 + N_0 \cdot \frac{\Delta d^*}{\bar{d}^*}, \quad (6)$$

где N_0 – общее количество облаков в срок составления прогноза.

Таким образом, получена полуэмпирическая формула для прогноза ОКО в течение суток.

Так как для практического применения формулы (6) необходимо правильно интерпретировать результаты вычислений по ней, сделаем ряд замечаний.

Прогноз по формуле (6) имеет низкую оправдываемость, когда при малых значениях дефицита точки росы ($\leq 3^\circ\text{C}$) в начальный срок t_0 и их сохранении или уменьшении в сроки прогноза t_i облачность отсутствует. Аналогичный результат будет получен и при обратной ситуации, когда при больших значениях дефицита точки росы ($\gg 4 - 5^\circ\text{C}$) в течение суток наблюдается облачность 7–10 баллов. Как правило, это облачность верхнего яруса.

В случаях, когда вычисления по формуле (6) дают отрицательные значения, следует прогнозировать ясное или малооблачное небо. Если рассчитанные значения превышают 10, то следует прогнозировать пасмурную погоду с общим количеством облаков 7–10 баллов.

В остальных случаях формула (6) дает точечную оценку ОКО, точность которой зависит от вида прогноза. Если прогноз дается в виде интервальных оценок – в градациях облачности, то его оправдываемость оценивается по попаданию прогностического значения в ту или иную градацию. Если оценивается близость прогностического значения ОКО к фактическому, то здесь оправданно рассчитывать абсолютную ошибку прогноза $\varepsilon_N = |N_0 - N^*|$ [10], которая, например, с учетом того, что ошибки наземных наблюдений составляют 1-2 балла, для точного прогноза не должна быть больше 2 или 3 баллов.

Кроме того, точность прогноза ОКО полуэмпирическим методом по формуле (6) зависит от точности прогноза дефицита точки росы (d^*) в срок, на который составляется прогноз.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки адекватности формулы (6) и оправдываемости прогнозов использовался вышеупомянутый архив данных наблюдений за ОКО в г. Санкт-Петербург с 2000 по 2016 год, полученный с сайта <http://aisori.meteo.ru>.

Учитывая, что визуальные наблюдения за ОКО в дневное время суток точнее, чем в ночное, в качестве исходного срока наблюдений был принят срок 09 ч. Прогнозы производились на сроки 12, 15 и 18 ч. Прогноз считался успешным, если его абсолютная ошибка не превышала 3 баллов.

В табл. 3 приведены оценки оправдываемости прогноза ОКО, полученные полуэмпирическим методом.

Таблица 3

Оценки оправдываемости прогноза ОКО полуэмпирическим методом

Месяц	Количество прогнозов	Успешных прогнозов	Оправдываемость
01	1509	1162	0,77
02	1344	1015	0,76
03	1410	1063	0,75
04	1458	1083	0,74
05	1436	1150	0,80
06	1419	1150	0,81
07	1461	1139	0,78
08	1458	1133	0,78
09	1374	1017	0,74
10	1413	1102	0,78
11	1455	1145	0,79
12	1491	1139	0,76

Из анализа табл. 3 понятно, что точность прогноза ОКО полуэмпирическим методом на основе формулы (6) практически не зависит от времени года. В течение всего года оправдываемость метода достаточно высока – более 70%.

В отличие от вероятностного инерционного прогноза ОКО, разработанный метод позволяет определять облачность в градациях 0–3 и 4–6 баллов, т. е. ясное небо и с переменной облачностью. Кроме того, полуэмпирический метод не требует предварительных сравнительно затратных по времени вычислений двумерных и условных повторяемостей общего количества облаков для различных сроков. Он может применяться сразу после производства наблюдений за фактическим общим количеством облаков и на любой срок в течение 24 ч и с любым шагом по времени. Очевидно, что чем короче этот шаг, тем оправдываемость метода выше, что подтверждает табл. 4.

Таблица 4

Оценки оправдываемости прогноза ОКО полуэмпирическим методом на 12, 15 и 18 ч по данным за 09 ч (г. Санкт-Петербург)

Срок прогноза	Июнь			Октябрь		
	Кол-во прогнозов	Успешных	Оправд.	Кол-во прогнозов	Успешных	Оправд.
12 ч	473	413	0,87	471	383	0,81
15 ч	473	382	0,81	471	373	0,79
18 ч	473	355	0,75	471	346	0,73

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье рассмотрен новый полуэмпирический метод краткосрочного прогнозирования общего количества облаков на основе учета изменчивости дефицита точки росы у поверхности земли для случаев, когда другие методы, требующие наличия синоптического материала, не применимы. Приведена сравнительная характеристика этого метода относительно метода вероятностного инерционного прогноза, который до настоящего момента является предпочтительным в практике метеорологического обеспечения авиации, так как позволяет принимать оптимальные и оперативные решения при руководстве полетами воздушных судов.

Разработанный метод послужит достойной альтернативой методу вероятностного инерционного прогноза, так как имеет по сравнению с ним несколько значимых преимуществ, несмотря на наличие видимых ограничений. К преимуществам нового разработанного метода относятся:

- возможность прогнозировать общее количество облаков в любых градациях;
- отсутствие предварительных трудоемких расчетов;
- высокая оправдываемость прогнозов.

К его ограничениям относятся:

- оправдываемость прогнозов общего количества облаков зависит от точности прогноза дефицита точки росы в срок, на который составляется прогноз;
- низкая оправдываемость прогнозов в случаях, когда при малых значениях дефицита точки росы ($\leq 3^{\circ}\text{C}$) в срок составления прогноза и их сохранении или уменьшении в сроки прогноза облачность отсутствует. Аналогичный результат возможен и при обратной ситуации, когда при больших значениях дефицита точки росы ($\gg 4 - 5^{\circ}\text{C}$) в течение суток наблюдается облачность 7–10 баллов (в основном – облачность верхнего яруса).

Список используемых источников

1. *Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я.* Климатологическая обработка метеорологической информации. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 295 с.
2. *Гаврилов В.А.* Видимость в атмосфере. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 324 с.
3. *Кобышева Н.В.* Косвенные расчеты климатических характеристик: автореф. дис. ...докт. геогр. наук. – Л.: ЛВИКА им. А.Ф. Можайского, 1971. – 33 с.
4. *Чернышева Л.С., Платонова В.А.* Расчет и интерпретация основных климатических показателей отдельных метеорологических величин: учебно-метод. пособие. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2009. – 88 с.
5. *Кобышева Н.В., Зябриков В.А.* Вероятностный прогноз характеристик облачности и условий погоды различной степени сложности для метеорологического обеспечения авиации // Труды всесоюзной конференции по вопросам метеорологического обеспечения сверхзвуковой авиации 24–26 марта 1971 г. / под ред. проф. С.В. Солонина. – Л., 1971. – С. 96–103.
6. *Кобышева Н.В.* Косвенные расчеты климатических характеристик. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 190 с.
7. *Дубровина Л.С., Верзунова В.Д.* Об использовании дефицита точки росы для определения вероятности облаков на различных высотах // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – М.: Гидрометеоиздат, 1979. – Вып. 65. – С. 79–86.

8. *Дмитриева-Арраго Л.Р., Колоскова Л.Ф., Орлова Л.С.* Испытания графика Дж. Смагоринского для определения балла облачности // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1969. – Вып. 236. – С. 31–34.
9. *Абрамович К.Г.* Некоторые особенности распределения метеорологических элементов в нижней части тропосферы в облачные и безоблачные дни // Труды ЦИП. – 1964. – Вып. 136. – С. 3–11.
10. *Хандожко Л.А.* Оценка успешности метеорологических прогнозов: учеб. пособие. – Л.: ЛПИ, 1977. – 68 с.

А.В. Астапович,
кандидат техн. наук, доцент;
Д.Д. Колесников,
кандидат техн. наук

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА СОВМЕСТНОГО УРАВНИВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлены результаты изысканий метода уравнивания геодезических сетей в пространственной геоцентрической системе координат. Изложены методики построения в геоцентрической системе отсчета параметрических моделей уравниваемых величин и вычисления ковариационных матриц их ошибок. Рассмотрена методика составления параметрических уравнений наземных измерений в геоцентрической системе координат. С позиций метода максимального правдоподобия и теории решения некорректных задач обоснован принцип оптимального оценивания параметров геодезического построения и параметров редуцированных величин. Теоретически обоснована методика совместного уравнивания измерений в геодезических построениях, изложены выводы и доказательства. Предложен принципиальный алгоритм решения задачи регуляризованного уравнивания.

Ключевые слова: параметрическая модель измерений, принцип уравнивания геодезических сетей, уравнивание спутниковых геодезических сетей, параметрические уравнения поправок, ковариационная матрица, топоцентрическая горизонтная система координат, пространственная геоцентрическая система отсчета.

ВВЕДЕНИЕ

При комплексировании результатов измерений, полученных наземными средствами, в состав которых входят средства космической геодезии, возникает задача их совместной обработки для получения оптимальных оценок параметров геодезических построений. Как правило, алгоритмы уравнивания геодезических построений реализуют метод наименьших квадратов (МНК). Однако классическая теория МНК дает оптимальные оценки только в условиях, когда параметры линейных моделей уравниваемых величин постоянны. При этом сами модели вполне точны, а их невязки представляют собой независимые нормально распределенные случайные величины. Обеспечить такие условия практически невозможно. Поэтому формальное применение принципа МНК еще не гарантирует оптимальности оценивания.

В данной статье решение проблемы оптимального оценивания параметров геодезических построений рассматривается на основе регуляризованного уравнивания геодезических сетей в геоцентрической системе координат.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УРАВНИВАЕМЫХ ВЕЛИЧИН

Между уравниваемыми величинами $\mathbf{L} = [L_1 \ L_2 \ \dots \ L_n]^T$ и параметрами геодезического построения $\mathbf{T} = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_k]^T$ в общем случае предполагается наличие нелинейной связи:

$$\mathbf{L} = \Phi(\mathbf{T}). \quad (1)$$

Для любого наблюдения

$$L_i \neq L_i^0,$$

где L_i – наблюдаемое значение уравниваемой величины;
 L_i^0 – вычисленное значение той же величины.

На основании дифференциального соотношения, связывающего измеренные величины с параметрами, запишем:

$$L_i + \Delta L_i + \delta L_i + v_i = L_i^0 + \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial T_1}\right)_0 \tau_1 + \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial T_2}\right)_0 \tau_2 + \dots + \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial T_k}\right)_0 \tau_k, \quad (2)$$

где $\delta L_i, \Delta L_i, v_i$ – поправки за редуцицию, за систематическую и случайную (не моделируемую) ошибки измерений;

$L_i^0 = \Phi(t_{0_1}, t_{0_2}, \dots, t_{0_k}), t_{0_j}$ – приближенные значения параметров;

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ – малые поправки к параметрам.

Поправки v_i к наблюдениям L_i должны исключать все разности $l_i = L_i - L_i^0$, которые нельзя компенсировать поправками τ_j к параметрам T_j , т. е. должны устранять все расхождения (невязки), вызванные ошибками измерений и несовершенством математической модели, заданной параметрами T_j . Поправки v_i могут быть вызваны и причинами, которые вообще не являются следствием ошибок в наблюдениях, в обычном смысле. Такая ситуация, например, возможна из-за того, что в принятой модели не учитываются в полной мере влияние внешних условий. В этой связи уравнения (2) можно представить в виде

$$l = B\tau + \Delta + C\lambda + \varepsilon, \quad (3)$$

где $B\tau$ – параметрическая часть в векторе l , обусловленная неслучайными погрешностями параметров принятых моделей геодезического объекта и систематических ошибок измерений;

Δ – стохастическая часть в векторе l , отражающая случайные ошибки, которые проявляются при многократных измерениях;

$C\lambda$ – стохастическая параметрическая часть в векторе l , отражающая влияние ошибок параметров редуцированных величин;

ε – стохастическая часть в векторе l , отражающая скрытые систематические ошибки, которые не поддаются моделированию и прогнозированию.

Предполагается, что скрытые систематические ошибки измерений конкретного элемента сети постоянны, а для сети в целом приобретают черты центрированной случайной величины. Например, ошибки в векторах вследствие влияния местных полей тропосферной и ионосферной рефракции.

Составляющие вектора Δ можно рассматривать как случайные величины в вероятностном пространстве Ω . В то же время их можно рассматривать и как возможные значения случайной величины, которая распределена в другом пространстве – в пространстве измерений Ξ (Δ непредсказуемо изменяется при переходе к измерениям другой величины).

Ошибки λ_i и ε_i при многократных измерениях уравниваемой величины постоянны, но с переходом к измерениям других величин непредсказуемо изменяются. Поэтому векторы λ и ε являются реализациями величин, которые распределены в пространстве измерений Ξ .

Математические ожидания векторов Δ, λ и ε в пространствах Ω и Ξ соответственно равны:

$$\begin{aligned} E\{\Delta\} &= 0, & E\{\lambda\} &= \lambda, & E\{\varepsilon\} &= \varepsilon, \\ M\{\Delta\} &= 0, & M\{\lambda\} &= 0, & M\{\varepsilon\} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для отражения условия центрированности величин, одновременно распределенных в пространствах Ω и Ξ , вводится понятие общего среднего $G = ME\{\}$, которое представляет собой одновременное усреднение по пространствам Ω и Ξ . Тогда с учетом (4) будем иметь:

$$G = ME\{\Delta\} = 0, \quad G = ME\{\lambda\} = 0, \quad G = ME\{\varepsilon\} = 0. \quad (5)$$

В обобщенном пространстве ковариации таких величин определяются формулами:

$$\begin{aligned} K_{\Delta\Delta} &= G\{\Delta\Delta^T\} = ME\{\Delta\Delta^T\} = E\{\Delta\Delta^T\}; \\ K_{\lambda\lambda} &= G\{\lambda\lambda^T\} = ME\{\lambda\lambda^T\} = M\{\lambda\lambda^T\}; \\ K_{\varepsilon\varepsilon} &= G\{\varepsilon\varepsilon^T\} = ME\{\varepsilon\varepsilon^T\} = M\{\varepsilon\varepsilon^T\}; \\ K_{\Delta\lambda} &= G\{\Delta\lambda^T\} = ME\{\Delta\lambda^T\} = 0; \\ K_{\Delta\varepsilon} &= G\{\Delta\varepsilon^T\} = ME\{\Delta\varepsilon^T\} = 0; \\ K_{\lambda\varepsilon} &= G\{\lambda\varepsilon^T\} = ME\{\lambda\varepsilon^T\} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Квадратные матрицы $K_{\Delta\Delta}$, $K_{\lambda\lambda}$, $K_{\varepsilon\varepsilon}$ и аналогичные им являются автоковариационными матрицами, прямоугольные матрицы $K_{\Delta\lambda}$, $K_{\Delta\varepsilon}$, $K_{\lambda\varepsilon}$ считаются матрицами взаимных ковариаций.

Последние три формулы в выражении (6) означают, что Δ , λ , ε – взаимно независимые величины. Следовательно, автоковариационная матрица составного вектора

$$\mathfrak{D} = [\Delta \quad \lambda \quad \varepsilon]^T \quad (7)$$

будет следующей:

$$K_{\mathfrak{D}} = \begin{bmatrix} K_{\Delta\Delta} & 0 & 0 \\ 0 & K_{\lambda\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & K_{\varepsilon\varepsilon} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Ковариационная матрица вектора l вычисляется по формуле

$$K_{ll} = K_{\Delta\Delta} + CK_{\lambda\lambda}C^T + K_{\varepsilon\varepsilon}. \quad (9)$$

Автоковариационные матрицы $K_{\Delta\Delta}$ и $K_{\lambda\lambda}$ оцениваются априори. Матрица $K_{\varepsilon\varepsilon}$, ввиду непредсказуемости ошибок ε , задается в результате анализа условий наблюдений в виде

$$K_{\varepsilon\varepsilon} = \mu_{\varepsilon}^2 I, \quad (10)$$

или

$$K_{\varepsilon\varepsilon} = \mu_{\varepsilon}^2 Q_{\varepsilon\varepsilon}, \quad (11)$$

где μ_{ε} – неизвестный масштабный множитель;
 I – единичная матрица;
 $Q_{\varepsilon\varepsilon}$ – корреляционная матрица скрытых ошибок.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ ПРИРАЩЕНИЙ КООРДИНАТ

В геоцентрической пространственной прямоугольной системе отсчета измеренные величины ΔX_{ij} , ΔY_{ij} , ΔZ_{ij} являются разностями координат пунктов сети $X_i, Y_i, Z_i, X_j, Y_j, Z_j$, т. е.

$$\begin{aligned} \Delta X_{ij} &= X_j - X_i; \\ \Delta Y_{ij} &= Y_j - Y_i; \\ \Delta Z_{ij} &= Z_j - Z_i. \end{aligned} \quad (12)$$

Параметрическим уравнениям связи (12) соответствуют уравнения поправок:

$$\begin{aligned} v_{\Delta X_{ij}} &= \delta X_j - \delta X_i - l_{\Delta X_{ij}}; \\ v_{\Delta Y_{ij}} &= \delta Y_j - \delta Y_i - l_{\Delta Y_{ij}}; \\ v_{\Delta Z_{ij}} &= \delta Z_j - \delta Z_i - l_{\Delta Z_{ij}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\delta X_i, \delta Y_i, \delta Z_i, \delta X_j, \delta Y_j, \delta Z_j$ – поправки к приближенным значениям параметров $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}$;

$l_{\Delta X_{ij}}, l_{\Delta Y_{ij}}, l_{\Delta Z_{ij}}$ – свободные члены (невязки приближенной модели), при этом

$$\begin{aligned} l_{\Delta X_{ij}} &= \Delta X_{ij} - (X_{0j} - X_{0i}); \\ l_{\Delta Y_{ij}} &= \Delta Y_{ij} - (Y_{0j} - Y_{0i}); \\ l_{\Delta Z_{ij}} &= \Delta Z_{ij} - (Z_{0j} - Z_{0i}). \end{aligned} \quad (14)$$

Система уравнений поправок для всей сети записывается в виде

$$B\tau - l = v. \quad (15)$$

Фрагмент матрицы коэффициентов B для базовой линии (12) выглядит следующим образом:

$$B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -10 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Вектор неизвестных τ состоит из векторов поправок к приближенным значениям параметров:

$$\tau = [\delta X_1 \quad \delta Y_1 \quad \delta Z_1 \delta X_2 \quad \delta Y_2 \quad \delta Z_2]^T. \quad (16)$$

Вектор свободных членов и вектор поправок состоят соответственно из отдельных векторов:

$$l = [l_{\Delta X_{12}} \quad l_{\Delta Y_{12}} \quad l_{\Delta Z_{12}}]^T, \quad (17)$$

$$v = [v_{\Delta X_{12}} \quad v_{\Delta Y_{12}} \quad v_{\Delta Z_{12}}]^T. \quad (18)$$

Стохастические свойства модели (13) отражает ковариационная матрица

$$K_{ll} = K_{\Delta\Delta} + \mu_{\varepsilon}^2 Q_{\varepsilon\varepsilon}. \quad (19)$$

Автоковариационную матрицу $K_{\Delta\Delta}$ получают в результате постобработки фазовых измерений по каждому отдельному измеренному вектору.

Большинство программ обработки спутниковых определений не дают информацию о взаимной корреляции ошибок совместно измеренных векторов. В работе [3] показано, что коэффициенты корреляции между ошибками приращений координат совместно измеренных векторов комплектами n спутниковых приемников в два раза меньше коэффициентов корреляций для ошибок приращений координат базовых линий. Однако на практике вычисление векторов осуществляется по каждой базовой линии отдельно по результатам наблюдений всех видимых спутников, что снижает коррелированность между ошибками приращений координат совместно измеренных векторов.

Замечено, что в условиях открытого горизонта приращения координат базовой линии в топоцентрической горизонтной системе определяются с ошибками, которые имеют слабую корреляционную зависимость. В этом случае все векторы, измеряемые комплектами n спутниковых геодезических приемников, можно считать практически независимыми друг от друга. Ковариационная матрица ошибок для таких определений будет иметь блочно-диагональную структуру:

$$K'_{\Delta\Delta} = \begin{bmatrix} K'_{12} & & & & & & & & \\ & K'_{13} & & & & & & & \\ & & \ddots & & & & & & \\ & & & K'_{1n} & & & & & \\ & & & & K'_{23} & & & & \\ & & & & & \ddots & & & \\ & & & & & & K'_{2n} & & \\ & & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & & K'_{(n-1)n} \end{bmatrix},$$

где $K'_{ij} = \begin{bmatrix} K_{\Delta X' \Delta X'} & K_{\Delta X' \Delta Y'} & K_{\Delta X' \Delta Z'} \\ K_{\Delta Y' \Delta X'} & K_{\Delta Y' \Delta Y'} & K_{\Delta Y' \Delta Z'} \\ K_{\Delta Z' \Delta X'} & K_{\Delta Z' \Delta Y'} & K_{\Delta Z' \Delta Z'} \end{bmatrix}$ – ковариационная матрица ошибок в топоцентрической системе координат, получаемая при решении отдельных базовых линий.

Она характеризует точность вектора $R'_{ij} = [X'_{ij} \quad Y'_{ij} \quad Z'_{ij}]^T$ по внутренней сходимости. Здесь не учитывается влияние ошибок центрирования, измерения высоты антенны, много-

Для перехода к геоцентрической системе координат в уравнениях (20) и (21) dR' представляется в виде

$$dR' = A^T dR = A^T \begin{bmatrix} \delta X_2 - \delta X_1 \\ \delta Y_2 - \delta Y_1 \\ \delta Z_2 - \delta Z_1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где

$\delta X, \delta Y, \delta Z$ – поправки к параметрам в геоцентрической системе координат;

$$A^T = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} \text{ – матрица преобразования координат;}$$

B, L – геодезические широта и долгота точки стояния прибора в геоцентрической системе отсчета.

ПРИНЦИП УРАВНИВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Для обоснования принципа уравнивания воспользуемся методом максимального правдоподобия. Функция правдоподобия для вектора ошибок

$$\vartheta = \begin{bmatrix} \Delta \\ \lambda \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (23)$$

имеет вид

$$L(\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_n) = \frac{1}{\sqrt{\det K_{\vartheta\vartheta}}} e^{-\frac{1}{2} \vartheta^T K_{\vartheta\vartheta}^{-1} \vartheta}. \quad (24)$$

Функция правдоподобия становится максимальной при условии

$$\vartheta^T K_{\vartheta\vartheta}^{-1} \vartheta = \min. \quad (25)$$

С учетом формул (8) и (11) выражение (25) принимает вид

$$\Delta^T K_{\Delta\Delta}^{-1} \Delta + \lambda^T K_{\lambda\lambda}^{-1} \lambda + \mu_\varepsilon^{-2} \varepsilon^T Q_{\varepsilon\varepsilon}^{-1} \varepsilon = \min. \quad (26)$$

Таким образом, формула (26) может быть использована в качестве принципа уравнивания геодезических сетей в пространственной геоцентрической системе координат.

Предлагаемый принцип имеет тесную связь с вариационным принципом отбора возможных решений некорректно поставленных задач. Определение параметров геодезической сети по результатам измерений является типичной некорректной задачей, так как условие о единственности решения не соблюдается.

Рассмотрим задачу решения уравнения (3) относительно τ, Δ и λ с позиции теории некорректных задач. Обозначим

$$v = \begin{bmatrix} \tau \\ \Delta \\ \lambda \end{bmatrix}, \quad D = [B \quad E \quad C].$$

Тогда искомые величины τ, Δ и λ должны быть получены из решения уравнения

$$Dv = l.$$

Решение формально можно записать в виде

$$v = D^{-1}l, \quad (27)$$

но оно заведомо не единственное. В решении (27) D^{-1} означает обобщенное обращение прямоугольной матрицы D .

Стандартным методом решения некорректных задач является регуляризация по методу Тихонова. Она состоит в минимизации нелинейного функционала

$$M^\alpha(\mathbf{v}, \mathbf{l}) = \|D\mathbf{v} - \mathbf{l}\|^2 + \alpha\Omega[\mathbf{v}], \quad (28)$$

где α – некоторый числовой параметр (параметр регуляризации);

$\Omega[\mathbf{v}]$ – так называемый стабилизирующий функционал, который можно взять в виде квадрата некоторой нормы

$$\Omega[\mathbf{v}] = \|\mathbf{v}\|^2. \quad (29)$$

Используя норму (29), получим условие

$$\alpha\|\mathbf{v}\|^2 + \|D\mathbf{v} - \mathbf{l}\|^2 = \min. \quad (30)$$

Согласно уравнению (3)

$$D\mathbf{v} - \mathbf{l} = B\boldsymbol{\tau} + \Delta + C\boldsymbol{\lambda} - \mathbf{l} = -\boldsymbol{\varepsilon}$$

представляет собой немоделируемые ошибки (с обратным знаком), так что условие (30) можно записать так:

$$\alpha\|\mathbf{v}\|^2 + \|\boldsymbol{\varepsilon}\|^2 = \min. \quad (31)$$

Всякую квадратичную норму в евклидовом пространстве можно записать в виде

$$\|\boldsymbol{\varepsilon}\|^2 = \boldsymbol{\varepsilon}^T P_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}} \boldsymbol{\varepsilon},$$

где $P_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}}$ – некоторая симметричная положительно определенная весовая матрица. Обозначая через $Q_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}}$ ее обратную матрицу, запишем

$$\|\boldsymbol{\varepsilon}\|^2 = \boldsymbol{\varepsilon}^T Q_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}}^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (32)$$

Если положить, что $\boldsymbol{\tau}$, Δ и $\boldsymbol{\lambda}$ – независимые друг от друга величины, то норма вектора

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \Delta \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix}$$

будет такой:

$$\|\mathbf{v}\|^2 = \|\boldsymbol{\tau}\|^2 + \|\Delta\|^2 + \|\boldsymbol{\lambda}\|^2. \quad (33)$$

Аналогично $\|\boldsymbol{\varepsilon}\|^2$ запишем квадратичные нормы для векторов $\boldsymbol{\tau}$, Δ и $\boldsymbol{\lambda}$

$$\|\boldsymbol{\tau}\|^2 = \boldsymbol{\tau}^T P_{\boldsymbol{\tau}\boldsymbol{\tau}} \boldsymbol{\tau};$$

$$\|\Delta\|^2 = \Delta^T P_{\Delta\Delta} \Delta;$$

$$\|\boldsymbol{\lambda}\|^2 = \boldsymbol{\lambda}^T P_{\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\lambda}} \boldsymbol{\lambda}.$$

Матрицы $P_{\boldsymbol{\tau}\boldsymbol{\tau}}$, $P_{\Delta\Delta}$, $P_{\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\lambda}}$ дают ограничения на вариации векторов $\boldsymbol{\tau}$, Δ и $\boldsymbol{\lambda}$. В стабилизирующем функционале в качестве таких матриц естественно взять обратные априорные ковариационные матрицы для $\boldsymbol{\tau}$, Δ и $\boldsymbol{\lambda}$. Следовательно,

$$\|\boldsymbol{\tau}\|^2 = \boldsymbol{\tau}^T K_{\boldsymbol{\tau}\boldsymbol{\tau}}^{-1} \boldsymbol{\tau};$$

$$\|\Delta\|^2 = \Delta^T K_{\Delta\Delta}^{-1} \Delta;$$

$$\|\boldsymbol{\lambda}\|^2 = \boldsymbol{\lambda}^T K_{\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\lambda}}^{-1} \boldsymbol{\lambda}. \quad (34)$$

Если дисперсии случайных величин малы, то эти величины могут варьироваться только в узких пределах. Для больших дисперсий возможны большие вариации. Если допускается без ограничений любой вектор параметров $\boldsymbol{\tau}$, то каждый элемент этого вектора имеет бесконечную дисперсию, или нулевой вес, то есть $P_{\boldsymbol{\tau}\boldsymbol{\tau}} = 0$. При этом $\|\boldsymbol{\tau}\|^2 = 0$ и условие (31) с учетом (32)–(34) принимает вид

$$\alpha(\Delta^T K_{\Delta\Delta}^{-1} \Delta + \boldsymbol{\lambda}^T K_{\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\lambda}}^{-1} \boldsymbol{\lambda}) + \boldsymbol{\varepsilon}^T Q_{\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}}^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} = \min. \quad (35)$$

Если параметр регуляризации α принять равным μ_ε^2 , то условие (35) совпадает с принципом (26).

Масштабный множитель μ_ε^2 следует определять из условия согласованности его значения с величиной случайных погрешностей наблюдений и ошибок параметров редуцированных ве-

личин. В качестве критерия согласия принимается равенство априорной и пост априорной дисперсий единицы веса $\mu_0^2 = \mu^2$.

Следовательно, отношение

$$\frac{\mu^2}{\mu_0^2} = \frac{\hat{\mathfrak{D}}^T P_{\mathfrak{D}\mathfrak{D}} \hat{\mathfrak{D}}}{\mu_0^2 r_0},$$

с учетом $\mu_0^{-2} P_{\mathfrak{D}\mathfrak{D}} = K_{\mathfrak{D}\mathfrak{D}}^{-1}$, можно записать

$$1 = \frac{\hat{\mathfrak{D}}^T K_{\mathfrak{D}\mathfrak{D}}^{-1} \hat{\mathfrak{D}}}{r_0}. \quad (36)$$

Так как в выражении (36) масштабный множитель μ_ε^2 присутствует в неявном виде, то его проще находить методом простых итераций

$$\mu_{\varepsilon_{i+1}}^2 = \mu_{\varepsilon_i}^2 \frac{\hat{\mathfrak{D}}^T K_{\mathfrak{D}\mathfrak{D}}^{-1} \hat{\mathfrak{D}}}{r_0}. \quad (37)$$

ОСНОВЫ РЕГУЛЯРИЗОВАННОГО УРАВНИВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Задача регуляризованного уравнивания заключается в решении уравнений (3) под условием (26). Решим ее методом Лагранжа. Для этого продифференцируем функцию Лагранжа

$$\Phi_{\text{Л}} = \Delta^T K_{\Delta\Delta}^{-1} \Delta + \lambda^T K_{\lambda\lambda}^{-1} \lambda + \mu^{-2} \varepsilon^T Q_{\varepsilon\varepsilon}^{-1} \varepsilon - 2k^T (B\tau + \Delta + C\lambda + \varepsilon - l) \quad (38)$$

по переменным Δ , λ , ε , k , τ и частные производные приравняем нулю. После несложных преобразований получим систему уравнений

$$\begin{cases} \Delta = K_{\Delta\Delta} k; \\ \lambda = K_{\lambda\lambda} C^T k; \\ \varepsilon = \mu_\varepsilon^2 Q_{\varepsilon\varepsilon} k; \\ \Delta + C\lambda + \varepsilon = l - B\tau; \\ B^T k = 0. \end{cases} \quad (39)$$

Исключим Δ , λ и ε . Получим

$$\begin{cases} K_{\Delta\Delta} k + C K_{\lambda\lambda} C^T k + \mu_\varepsilon^2 Q_{\varepsilon\varepsilon} k = l - B\tau; \\ B^T k = 0. \end{cases} \quad (40)$$

Из первого уравнения системы (40) с учетом формулы (9) находим

$$k = K_{\text{л}}^{-1} (l - B\tau). \quad (41)$$

Подстановка полученного выражения во второе уравнение системы (40) дает

$$B^T K_{\text{л}}^{-1} B\tau - B^T K_{\text{л}}^{-1} l = 0, \quad (42)$$

откуда получаем оценки параметров τ

$$\hat{\tau} = (B^T K_{\text{л}}^{-1} B)^{-1} B^T K_{\text{л}}^{-1} l. \quad (43)$$

Объединяя формулы (39), (41) и (43), находим оценки векторов Δ , λ , ε

$$\begin{cases} \hat{\Delta} = K_{\Delta\Delta} K_{\text{л}}^{-1} (I - B(B^T K_{\text{л}}^{-1} B)^{-1} B^T K_{\text{л}}^{-1}) l; \\ \hat{\lambda} = K_{\lambda\lambda} C^T K_{\text{л}}^{-1} (I - B(B^T K_{\text{л}}^{-1} B)^{-1} B^T K_{\text{л}}^{-1}) l; \\ \hat{\varepsilon} = \mu_\varepsilon^2 Q_{\varepsilon\varepsilon} K_{\text{л}}^{-1} (I - B(B^T K_{\text{л}}^{-1} B)^{-1} B^T K_{\text{л}}^{-1}) l. \end{cases} \quad (44)$$

Обозначая

$$I - B(B^T K_{ll}^{-1} B)^{-1} B^T K_{ll}^{-1} = P_B, \quad (45)$$

запишем

$$\begin{cases} \hat{\Delta} = K_{\Delta\Delta} K_{ll}^{-1} P_B l; \\ \hat{\lambda} = K_{\lambda\lambda} C^T K_{ll}^{-1} P_B l; \\ \hat{\varepsilon} = \mu_\varepsilon^2 Q_{\varepsilon\varepsilon} K_{ll}^{-1} P_B l. \end{cases} \quad (46)$$

или

$$\hat{\vartheta} = K_{\vartheta l} K_{ll}^{-1} P_B l, \quad (47)$$

где $K_{\vartheta l} = \begin{bmatrix} K_{\Delta\Delta} \\ K_{\lambda\lambda} C^T \\ \mu_\varepsilon^2 Q_{\varepsilon\varepsilon} \end{bmatrix}$.

Получим выражение для вектора поправок к уравниваемым величинам

$$v = -(\hat{\Delta} + C\hat{\lambda} + \hat{\varepsilon}) = -(K_{\Delta\Delta} + C K_{\lambda\lambda} C^T + \mu_\varepsilon^2 Q_{\varepsilon\varepsilon}) K_{ll}^{-1} P_B l = -P_B l. \quad (48)$$

Ковариационная матрица K_{ll} , необходимая для регуляризованного уравнивания, должна вычисляться из итераций:

$$\begin{aligned} K_{ll_i} &= K_{\Delta\Delta} + C K_{\lambda\lambda} C^T + \mu_{\varepsilon_i}^2 Q_{\varepsilon\varepsilon}; \\ P_{B_i} &= I - B(B^T K_{ll_i}^{-1} B)^{-1} B^T K_{ll_i}^{-1}; \\ \mu_{\varepsilon_{i+1}}^2 &= \mu_{\varepsilon_i}^2 \frac{l^T K_{ll_i}^{-1} P_{B_i} l}{r_0}, \end{aligned} \quad (49)$$

где r_0 – число избыточных измерений.

Для оценки точности $\hat{\tau}, \hat{\Delta}, \hat{\lambda}, \hat{\varepsilon}$ получим выражения для ковариационных матриц их ошибок.

Линейные оценки (43) и (47) для векторов τ и ϑ представим в виде

$$\begin{cases} \hat{\tau} = (B^T K_{ll}^{-1} B)^{-1} B^T K_{ll}^{-1} l = Ml; \\ \hat{\vartheta} = K_{\vartheta l} K_{ll}^{-1} P_B l = Nl, \end{cases} \quad (50)$$

где $M = (B^T K_{ll}^{-1} B)^{-1} B^T K_{ll}^{-1}$ и $N = K_{\vartheta l} K_{ll}^{-1} P_B$.

Напишем выражения для истинных ошибок оценок $\hat{\tau}$ и $\hat{\vartheta}$.

$$e_{\hat{\tau}} = \hat{\tau} - \tau = Ml - \tau = M(B\tau + \theta) - \tau = M\theta, \quad (51)$$

$$e_{\hat{\vartheta}} = \hat{\vartheta} - \vartheta = Nl - \vartheta = N(B\tau + \theta) - \vartheta = N\theta - \vartheta. \quad (52)$$

Обозначим $e = \begin{bmatrix} e_{\hat{\tau}} \\ e_{\hat{\vartheta}} \end{bmatrix}$.

Тогда искомые ковариационные матрицы $K_{\hat{\tau}\hat{\tau}}$ и $K_{\hat{\vartheta}\hat{\vartheta}}$ будут являться соответствующими блоками матрицы K_{ee}

$$K_{ee} = G \left\{ \begin{bmatrix} e_{\hat{\tau}} \\ e_{\hat{\vartheta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\hat{\tau}}^T & e_{\hat{\vartheta}}^T \end{bmatrix} \right\} = G \left\{ \begin{bmatrix} e_{\hat{\tau}} e_{\hat{\tau}}^T & e_{\hat{\tau}} e_{\hat{\vartheta}}^T \\ e_{\hat{\tau}} e_{\hat{\vartheta}}^T & e_{\hat{\vartheta}} e_{\hat{\vartheta}}^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} K_{\hat{\tau}\hat{\tau}} & K_{\hat{\tau}\hat{\vartheta}} \\ K_{\hat{\vartheta}\hat{\tau}} & K_{\hat{\vartheta}\hat{\vartheta}} \end{bmatrix}. \quad (53)$$

Точность вектора $\hat{\tau}$ оценивается по ковариационной матрице

$$K_{\hat{\tau}\hat{\tau}} = G \{ e_{\hat{\tau}} e_{\hat{\tau}}^T \} = G \{ M\theta\theta^T M^T \} = (B^T K_{ll}^{-1} B)^{-1}. \quad (54)$$

Точность оценок $\hat{\vartheta}$ отражает ковариационная матрица

$$K_{\hat{\vartheta}\hat{\vartheta}} = G \{ e_{\hat{\vartheta}} e_{\hat{\vartheta}}^T \} = G \{ (N\theta - \vartheta)(N\theta - \vartheta)^T \} = N K_{\theta\theta} N^T - N K_{\theta\vartheta} - K_{\vartheta\theta} N^T + K_{\vartheta\vartheta}. \quad (55)$$

На основании $K_{\theta\theta} = K_{ll}$ и $K_{\theta\vartheta} = K_{l\vartheta}$ с учетом равенств $P_B^T K_{ll}^{-1} = K_{ll}^{-1} P_B$ и $P_B P_B = P_B$, получим

$$K_{\hat{\vartheta}\hat{\vartheta}} = K_{\vartheta\vartheta} - N K_{l\vartheta} = K_{\vartheta\vartheta} - K_{\vartheta l} K_{ll}^{-1} P_B K_{l\vartheta}. \quad (56)$$

Взаимные ковариации ошибок векторов $\hat{\mathbf{t}}$ и $\hat{\mathbf{\theta}}$ составляют матрицу

$$K_{\hat{\mathbf{t}}\hat{\mathbf{\theta}}} = G\{\mathbf{e}_{\hat{\mathbf{t}}}\mathbf{e}_{\hat{\mathbf{\theta}}}^T\} = G\{\mathbf{M}\boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{\theta}^T N^T - \boldsymbol{\theta}^T)\} = -K_{\hat{\mathbf{t}}\mathbf{l}} B^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} K_{\mathbf{l}\boldsymbol{\theta}}.$$

Поскольку $K_{\hat{\mathbf{t}}\mathbf{l}} B^T$ определяет взаимные ковариации векторов $\hat{\mathbf{t}}$ и \mathbf{l} , то

$$K_{\hat{\mathbf{t}}\hat{\mathbf{\theta}}} = -K_{\hat{\mathbf{t}}\mathbf{l}} K_{\mathbf{ll}}^{-1} K_{\mathbf{l}\boldsymbol{\theta}}. \quad (57)$$

Представим выражение для $K_{\hat{\mathbf{\theta}}\hat{\mathbf{\theta}}}$ в виде

$$K_{\hat{\mathbf{\theta}}\hat{\mathbf{\theta}}} = K_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}} - K_{\boldsymbol{\theta}\mathbf{l}} K_{\mathbf{ll}}^{-1} K_{\mathbf{l}\boldsymbol{\theta}} + K_{\boldsymbol{\theta}\mathbf{l}} K_{\mathbf{ll}}^{-1} B K_{\hat{\mathbf{t}}\mathbf{l}} B^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} K_{\mathbf{l}\boldsymbol{\theta}}.$$

Очевидно, что слагаемое $K_{\boldsymbol{\theta}\mathbf{l}} K_{\mathbf{ll}}^{-1} B K_{\hat{\mathbf{t}}\mathbf{l}} B^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} K_{\mathbf{l}\boldsymbol{\theta}}$ выражает влияние ошибок оценок параметров \mathbf{t} .

Для оценки точности вектора $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \mathbf{v} = \mathbf{x} - P_B \mathbf{l}$, потребуется иметь выражение истинных ошибок, которое можно представить в виде

$$\mathbf{e}_{\hat{\mathbf{x}}} = \boldsymbol{\theta} - P_B \boldsymbol{\theta}.$$

Тогда ковариационная матрица $K_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ будет составлять

$$K_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = G\{(\boldsymbol{\theta} - P_B \boldsymbol{\theta})(\boldsymbol{\theta} - P_B \boldsymbol{\theta})^T\} = K_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}} - P_B K_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}} \quad (58)$$

или

$$K_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = B(B^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} B)^{-1} B^T. \quad (59)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотренный метод регуляризованного уравнивания геодезических сетей позволяет использовать всю имеющуюся информацию для получения оптимальных оценок, как геодезического построения, так и параметров систематических ошибок и редуционных величин.

Методика регуляризованного уравнивания геодезической сети включает следующие основные этапы:

1) составление параметрических уравнений поправок, вычисление масштабного множителя μ_{ε}^2 и ковариационной матрицы невязок модели измерений

$$\begin{aligned} K_{\mathbf{ll}_i} &= K_{\Delta\Delta} + C K_{\lambda\lambda} C^T + \mu_{\varepsilon_i}^2 Q_{\varepsilon\varepsilon}; \\ P_{B_i} &= I - B(B^T K_{\mathbf{ll}_i}^{-1} B)^{-1} B^T K_{\mathbf{ll}_i}^{-1}; \\ \mu_{\varepsilon_{i+1}}^2 &= \mu_{\varepsilon_i}^2 \frac{I^T K_{\mathbf{ll}_i}^{-1} P_{B_i} I}{r_0}; \end{aligned}$$

2) решение уравнений поправок регуляризованным методом наименьших квадратов

$$\hat{\mathbf{t}} = (B^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} B)^{-1} B^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} \mathbf{l};$$

3) вычисление поправок к результатам измерений уравниваемых величин

$$\mathbf{v} = -P_B \mathbf{l};$$

4) вычисление поправок к параметрам систематических ошибок измерений и параметрам редуционных величин

$$\mathbf{v}_{\lambda} = -K_{\lambda\lambda} C^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} P_B \mathbf{l};$$

5) оценка точности уравненных величин, параметров геодезического построения и уточненных параметров редуционных величин

$$\begin{aligned} K_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} &= B(B^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} B)^{-1} B^T; \\ K_{\hat{\mathbf{t}}\hat{\mathbf{t}}} &= (B^T K_{\mathbf{ll}}^{-1} B)^{-1}; \\ K_{\hat{\lambda}\hat{\lambda}} &= K_{\lambda\lambda} - K_{\lambda\mathbf{l}} K_{\mathbf{ll}}^{-1} P_B K_{\mathbf{l}\lambda}. \end{aligned}$$

Список используемых источников

1. *Астапович А.В.* Теория математической обработки геодезических измерений: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. Можайского, 2015. – Ч. 2: Метод наименьших квадратов. – 106 с.
2. *Астапович А.В.* Регуляризованный метод оптимального уравнивания геодезических сетей // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – М.: МИИГАиК, 2002. – № 1. – С. 30–39.
3. *Астапович А.В., Брынь М.Я.* О корреляции ошибок приращений координат, измеренных комплектом спутниковых геодезических приемников // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – М.: МИИГАиК, 2007. – № 3. – С. 3–9.
4. *Герасимов А.П.* Спутниковые геодезические сети. – М.: ООО «Издательство «Проект», 2012. – 176 с.
5. *Машимов М.М.* Уравнивание геодезических сетей. – М.: Недра, 1979. – 367 с.

И.А. Готюр,
доктор техн. наук, доцент;
А.Н. Мешков;
М.Ю. Рудь;
И.А. Яременко

МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДХОДОВ «БОЛЬШИХ ДАННЫХ»

В статье рассмотрены подходы к организации базы данных (БД) гидрометеорологических данных (ГМД), а также способы повышения оперативности выполнения запросов к ней. Показаны преимущества и недостатки реляционной и нереляционной моделей данных применительно к работе с гидрометеорологической информацией.

Ключевые слова: технологии хранения и обработки данных, «большие данные», реляционная модель данных, нереляционная модель данных, MongoDB.

ВВЕДЕНИЕ

В абонентских пунктах автоматизированной системы гидрометеорологического обеспечения (АС ГМО) ежедневно принимается более 2 гигабайт гидрометеорологических данных, и с каждым днем их количество только увеличивается. С увеличением объема накопленных ГМД, вследствие особенностей технологий их хранения, увеличивается соответственно и время доступа к ним.

Как правило, хранение данных осуществляется на базе технических средств. Для организации хранилища данных используются накопители на магнитных дисках и твердотельные накопители. В результате технологического прогресса произошло значительное снижение стоимости накопителей информации, поэтому данные стало выгодно хранить и накапливать для последующего детального анализа. В то же время ГМД непрерывно подвергаются анализу: на их основе корректируются выводы из метеорологической обстановки и выдаются рекомендации по применению сил и средств Воздушно-космических сил. Для проведения такого анализа требуется оперативный доступ к значительному объему ГМД, а существующие АС ГМО справляются с этой задачей не в полной мере. Исходя из этого представляется важным исследовать возможные пути повышения оперативности получения ГМД из БД в условиях непрерывного увеличения их объемов и обеспечения доступа не только к оперативным, но и к архивным (заблаговременностью более 3 суток) данным.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Гидрометеорологические данные, циркулирующие в системе ГМО, подвергаются нескольким стадиям обработки и анализа. Во время обработки данные классифицируются, сортируются, а также оценивается их качество и достоверность. В настоящей статье под данными будем понимать совокупность сведений, зафиксированных на определенном носителе в форме, пригодной для постоянного хранения, передачи и обработки. Результатом преобразования и обработки данных является информация.

Гидрометеорологическая информация необходима для составления прогнозов, на основе которых синтезируются знания и принимаются решения. Выделяют три группы подходов к прогнозированию ГМИ [1]: физико-статистические, гидродинамические, динамико-стохас-

тические. Наиболее применимыми, ввиду простоты расчетов и адаптивности, являются *физико-статистические методы*. Гидродинамические методы используются для расчетов глобальных и мезомасштабных моделей атмосферы гидрометеорологическими центрами.

В процессе метеорологического обеспечения деятельности ВС РФ инженерами-метеорологами решаются задачи, представленные на рис. 1.



Рис 1. Задачи, решаемые в ходе ГМО ВС РФ

Для того чтобы появилась возможность за минимальное время выполнить вышеперечисленные задачи, необходимо получить подготовленные к обработке данные. Эти данные циркулируют в системе АС ГМО по каналам связи, через Центры коммутации сообщений, и в итоге поступают на комплекс обработки, где подвергаются обработке, этапы которой представлены на рис. 2.

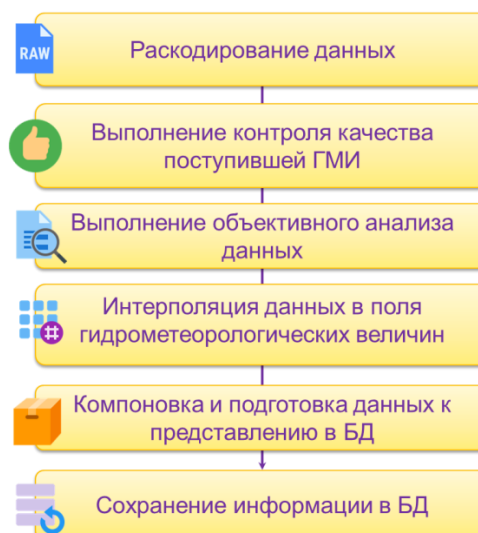


Рис 2. Этапы обработки ГМД

После обработки данные сохраняются в БД в определенном виде и заданном формате. Тип, количество необходимых для обработки данных определяются исходя из решаемых за-

дач. Следовательно, запросы на получение данных из системы управления данными (СУБД) можно разделить на три категории:

- запросы по площади на фиксированном уровне и за фиксированный срок;
- запросы по станции или точке на фиксированном уровне за несколько сроков;
- запросы по станции или точке на нескольких уровнях за фиксированный срок.

Для удобства представим эти запросы в формализованном виде.

Пусть T – множество сроков наблюдений, по которым могут быть получены ГМД, L – множество уровней, на которых производились измерения метеорологических величин (МВ), а S – множество станций, по которым имеются данные. Получим:

$$\begin{aligned} T &= \langle t_i \rangle, i \in 0 \dots n, \\ L &= \langle l_j \rangle, j \in 0 \dots m, \\ S &= \langle s_k \rangle, k \in 0 \dots p, \end{aligned} \quad (1)$$

где n – количество сроков;

m – количество изобарических поверхностей;

p – количество станций.

Тогда функция формирования запроса по площади на фиксированном уровне и за фиксированный срок будет выглядеть следующим образом:

$$Q_s = f(S, t_i, l_j), \quad (2)$$

функция формирования запроса по станции или точке на фиксированном уровне за несколько сроков –

$$Q_l = f(s_k, T, l_j), \quad (3)$$

а функция формирования запроса по станции или точке на нескольких уровнях за фиксированный срок примет вид

$$Q_t = f(s_k, t_i, L). \quad (4)$$

Для обеспечения наибольшей производительности необходимо спроектировать БД таким образом, чтобы обеспечить наименее затратное по времени получение необходимых данных (при этом t_q – время выполнения запроса, $meta_{db}$ – вариант организации БД, $meta_{db}^{\partial}$ – допустимые варианты организации БД). Тогда

$$meta_{db}^* = \operatorname{argmin}_{meta_{db}^* \in \{meta_{db}^{\partial}\}} t_q(meta_{db}; \langle Q_t, Q_l, Q_s \rangle). \quad (5)$$

При проектировании структуры БД необходимо учитывать специфику применения данных. В частности, какие данные запрашиваются чаще, а какие – реже; каким этапам обработки они будут подвергаться, и какая в итоге информационная продукция требуется потребителю.

В случае с ГМД особенностью проектирования БД является пространственно-временная распределенность данных. Традиционные модели представления информации в БД, применяемые для геоинформационных систем (ГИС), предназначены для работы с информацией, используемой в трехмерной системе координат, в виде векторных или растровых примитивов без учета ее временной и вертикальной распределенности. В то же время традиционные реляционные БД в условиях постоянно возрастающего объема ГМД быстро достигают предела производительности. Для обеспечения оперативного доступа к пространственно-временным данным необходимо спроектировать комплекс БД с использованием NoSQL и SQL решений. Для этого рассмотрим подробнее реляционную и нереляционную модели данных применительно к ГМД.

РЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ

Реляционная модель появилась в начале 1970-х годов в работах Э. Кодда [2, 3]. Успех реляционной модели данных объясняется тем, что в ней определены мощные и выразительные языки манипулирования данными.

На основе реляционной модели данных построены реляционные базы данных (далее – реляционные БД), где данные организованы в таблицы. Удобство поиска и навигации по таким БД заключается в наличии смысловых и ссылочных связей между таблицами, а также в возможности создания индексов по полям таблиц. Для соблюдения требований математической логики реляционных БД и исключения противоречивости и избыточности хранимой информации разработаны требования нормирования [4] к реляционным БД. Они необходимы для того, чтобы разделить типы данных и зависимости между объектами данных. При нормировании базы данных редко меняющиеся или повторяющиеся характеристики выносятся в отдельную таблицу.

Рассмотрим модель реляционной БД для хранения гидрометеорологических данных. Для этого обозначим множество поступающей ГМД следующим образом:

$$A = \langle a_i \rangle, i \in 0 \dots n, \quad (6)$$

где n – количество всех данных, поступающих в систему АС ГМО. Гидрометеорологические данные разделяются по типам, например: данные наземных наблюдений, данные аэрологического зондирования атмосферы, данные МРЛ, спутниковые данные. Обозначим типы поступающей ГМД:

$$P = \langle p_j \rangle, j \in 1 \dots m, \quad (7)$$

где m – типы данных. Таким образом, все поступающие ГМД однозначно принадлежат определенному типу данных:

$$a_i \in p_j. \quad (8)$$

Нередко ГМД логически связаны с другими данными, исходя из логической схемы организации данных. Наличие таких нетривиальных зависимостей может приводить к нежелательным эффектам, которые принято называть аномалиями [5]. Для их устранения существуют требования нормальности. Рассмотрим требования трех основных нормальных форм.

Требования первой нормальной формы (1NF):

1. Каждая ячейка таблицы БД должна содержать одно значение.
2. Каждая запись должна быть уникальной.

Вторая нормальная форма (2NF) содержит следующие требования:

1. Соответствие 1NF.
2. Наличие внешнего ключа.

Третья нормальная форма (3NF):

1. Соответствие 2NF.
2. Устранение полей, не зависящих от ключа.

Обозначим требования 1NF реляционных БД:

$$niq(A) \vee \langle A \times A \rangle \in tf_{1NF} = uable(A). \quad (9)$$

Тогда требования 2NF нормальности

$$f_{2NF} = f_{1NF}(A) \vee f_{foreignkey}(A). \quad (10)$$

Для того чтобы информация соответствовала 3NF, необходимо, чтобы

$$f_{3NF} = f_{2NF}(A_i) \vee f_{foreignkey}(A_j) \notin f_{2NF}(A). \quad (11)$$

После усвоения данные индексируются, что значительно увеличивает скорость поиска по индексируемому полю. Изначально существует сложность операции поиска значений в БД – $O(n)$. С помощью индексации полей БД (например, B-tree) сложность поиска значений в БД становится $O(\log(n))$. Таким образом, индексация позволяет снизить затраты ресурсов на получение искомым данных.

Существуют следующие типы индексов [6]: B-tree, пространственные индексы, индексы пространственной сетки, R-tree, хэш-индекс, битовые индексы, Partial индекс и др. Для хранения геопропространственных данных лучше всего подходят пространственные индексы и индексы пространственной сетки. В реляционных БД для каждой таблицы необходимо подобрать наиболее подходящий под структуру запросов индекс.

Ситуация становится критической, когда возрастает количество запросов к БД. С распространением информационных технологий растет количество абонентов-потребителей, и, как следствие, растет нагрузка на БД. Обозначим потребителей ГМИ:

$$U = \langle u_k \rangle, k \in 0 \dots h, \quad (12)$$

где h – количество потребителей ГМИ. Тогда множество запросов выразим следующим образом:

$$M = \langle m_z^k \rangle, z \in 0 \dots g, \quad (13)$$

где g – количество запросов к БД. Далее, суммарное количество запросов будет иметь вид

$$M_{\Sigma} \subseteq M \times U. \quad (14)$$

Важно помнить, что количество обрабатываемых в единицу времени запросов ограничено и зависит от производительности системы, структуры БД, индексируемых полей БД, вложенности запросов. Важным показателем работы системы является время выполнения запроса. Обозначим функцию времени обработки запроса через f_t :

$$f_t(X, Y, f_{ind}(Y), (M \times M)). \quad (15)$$

Здесь X – производительность системы;
 Y – множество полей и таблиц БД;
 $f_{ind}(Y)$ – функция индексирования;
 $(M \times M)$ – количество вложенных запросов.

Таким образом, при одинаковой производительности систем время выполнения запроса будет зависеть от Y , $f_{ind}(Y)$ и $(M \times M)$.

В реляционных БД при выполнении простых запросов с малой вложенностью, где

$$(M \times M) = \{m_1^k, \dots, m_z^k\}, z \rightarrow 1, \quad (16)$$

и запрос производится по полям, которые проиндексированы:

$$f_{ind}(Y) = \{f_{ind}^{type}(y_1), \dots, f_{ind}^{type}(y_v)\}, v \rightarrow 1 \vee m_z^k \in Y_v, v \in 0 \dots b, \quad (17)$$

где b – количество полей и таблиц в БД. Тогда при условии (5) и соответствии 3NF

$$A = \langle a_i \rangle \vee f_{НФ3}(A_i), \quad (18)$$

время выполнения запроса наиболее оптимально и принадлежит области допустимых значений времени выполнения операции

$$\left(f_t(X, Y, f_{ind}(Y), (M \times M)) \in \{t_q^d\}^{PP} \right) \cong U, \quad (19)$$

где t_q^d – допустимые значения времени выполнения операции;

U – достоверное событие.

С учетом особенностей ГМИ выражение (16) примет вид

$$(M \times M) = \{m_1^k, \dots, m_z^k\}, z > 1. \quad (20)$$

Чтобы значения $f_t(X, Y, f_{ind}(Y), (M \times M))$ с учетом ограничений находились в области $\{t_q^A\}^{PP}$, необходимо реорганизовать индексацию БД таким образом, чтобы учесть максимальное количество полей, участвующих в запросах, с учетом вложенных запросов

$$f_{ind}(Y) = \{f_{ind}^{type}(y_1), \dots, f_{ind}^{type}(y_v)\}, v \rightarrow z. \quad (21)$$

При увеличении количества индексов возрастает объем, занимаемый БД. В то же время вследствие большой вложенности запросов и так как запросы обрабатываются одним процессом (сервером), растет итоговое время выполнения запроса. Практика использования реляционной БД PostgreSQL в ОКР «Новость» показала, что при достижении размера БД 200–300 Гб (данные метеорологических наблюдений за период в 2 месяца) время выполнения запроса резко увеличивается и перестает удовлетворять критерию оперативности

$$A = \langle a_i \rangle, i \rightarrow \infty \vee (f_t(X, Y, f_{ind}(Y), (M \times M)) \in \{t_q^A\}^{PP}) \not\equiv U. \quad (22)$$

Одним из возможных путей уменьшения времени выполнения запросов к БД является выбор другой модели представления данных.

НЕРЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ

Под *нереляционными моделями данных* будем понимать документ-ориентированную модель данных, главным отличием которой от реляционной модели является отсутствие логических связей между структурами данных и самой четкой структуры представления данных. Как следствие – отсутствуют требования форм нормальности, и данные можно усваивать в любом виде, например в виде JSON-документов.

Первым шагом на пути реализации выбранного подхода будет создание распределенной базы данных, запросы к которой могут обрабатываться параллельно. Вычислительная нагрузка в этом случае распределяется между серверами, производительность системы $X_{(m)}^{нерел}$ в целом повышается, и, как следствие, уменьшается время выполнения запроса

$$f_t(X_{(n)}^{перел}) > f_t(X_{(m)}^{нерел}), n < m. \quad (23)$$

Так как отсутствуют требования нормальности, есть возможность уменьшить или исключить вложенность запросов

$$(M \times M) = \{m_1^k, \dots, m_z^k\}, z \rightarrow 1. \quad (24)$$

Это достигается путем включения в документ с полезной нагрузкой дополнительной метаинформации, которую при соблюдении требований форм нормальности необходимо получать дополнительно, повышая вложенность запросов.

Следующим шагом на пути оптимизации времени выполнения запроса будут поиск и составление такого индекса $f_{ind}(Y)$, который позволит, с одной стороны, быстро находить запрашиваемый документ в БД, с другой – не будет занимать лишнее место в БД:

$$f_t(f_{ind}(Y)) \rightarrow 0 \vee f_v(БД) \in \{V^A\}^{PP}, \quad (25)$$

где $f_v(БД)$ – функция расчета объема БД;

$\{V^A\}^{PP}$ – область пригодных объемов БД, при которых сохраняется приемлемое функционирование БД.

Использование нереляционной модели данных в сочетании с подходами обработки и хранения «больших данных» позволит хранить значительные объемы данных, сохраняя приемлемое время доступа к данным. Для перехода от реляционной к нереляционной модели данных необходимо выполнить ряд преобразований с данными, организовать структуру, подобрать функции индексирования, проанализировать наиболее частотные запросы к БД.

Вышеописанный подход позволит организовать долгосрочное хранилище информации, которое также обеспечит оперативный доступ к информации в режиме реального времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент с учетом круглосуточного приема и обработки метеорологической информации объем базы данных в течение 5 лет увеличится на ~15 Терабайт. Используемые в настоящее время реляционные модели данных и программно-технические решения на их базе не обеспечивают требуемую оперативность получения данных.

Организация хранения ГМД с применением комбинированного подхода при использовании реляционных и нереляционных моделей данных, а также с помощью подходов «больших данных» позволит сохранить оперативность доступа к ГМД. Такой подход может обеспечить накопление ГМД для последующего анализа, составления климатических справок и решения других задач.

Для применения комбинированного подхода предлагается разделить «оперативные» и «архивные данные». Так, оперативными будем считать ГМД, поступившие в БД в течение месяца, а «архивными» – данные, поступившие в БД более месяца назад. В качестве «оперативной» БД хорошо подходят SQL базы данных, например: PostgreSQL, Oracle, а для «архивной» БД необходимо выбрать СУБД, которая обеспечивает горизонтальное масштабирование. Как правило, такие СУБД основаны на NoSQL решениях, например: HBase, Cassandra, MongoDB, Hadoop. Указанная организация структуры хранения данных позволит получать «оперативные» данные значительно быстрее за счет того, что «архивные» данные хранятся в отдельной БД.

Следует отметить, что комбинация различных СУБД в соответствии с типами запросов ГМД и распределение ролей и обязанностей между различными типами СУБД могут позволить достичь более высоких показателей производительности АС ГМО.

Список используемых источников

1. *Суворов С.С.* Теоретические основы синтеза специализированных методов прогнозирования и диагностики геофизических условий в средней атмосфере: дисс... докт. физ.-мат. наук: 20.02.09 / Станислав Станиславович Суворов. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1997. – 275 с.
2. *Codd E.F.* A Relational model of data for large shared data banks // Communications of the ACM: journal. – 1970. – Vol. 3, № 6. – P. 377–387.
3. *Codd E.F.* The relational model for database management: Version 2. – Addison Wesley Publishing Company, 1990. – P. 538.
4. *Новиков Б.А.* Основы технологий баз данных. – М.: ДМК, 2019. – 239 с.
5. *Медетов А.А.* Термин Big Data и способы его применения // Молодой ученый. – 2016. – № 11. – С. 207–210.
6. *Иванов П.Д., Вампилов В.Ж.* Технологии Big Data и их применение на современном промышленном предприятии // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – Вып. 8. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1228.html> (дата обращения: 20.12.2019).

В.А. Овчаров,
доктор техн. наук;
А.С. Подшибякин;
И.А. Ушаков,
кандидат техн. наук;
А.Ф. Шинкаренко,
кандидат техн. наук

ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ КОММУНИКАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

В работе представлен оригинальный подход к тестированию безопасности веб-приложений, базирующийся на методе, который позволяет повторно использовать накопленный опыт по проникновению, основанный на исследуемой модели приложения. Данное тестирование рассматривается как основная форма контроля устойчивости объектов коммуникации к целенаправленным воздействиям на веб-сервер, которая позволяет оценить уровень защищенности объектов сетевой инфраструктуры.

Ключевые слова: аудит объектов коммуникаций, информационная безопасность, безопасность веб-приложений, модель для тестирования защищенности.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день вследствие развития информационных систем, их революционного внедрения в различные сферы повседневной жизни возникает острая необходимость решения вопросов обеспечения информационной безопасности (ИБ). Одной из составляющих процесса всестороннего обеспечения ИБ является аудит объектов коммуникации (пользователь ↔ веб-приложение) с целью выявления возможности доступа к информационным ресурсам (ИР), хранящимся на веб-сервере. Именно технические мероприятия тестирования защищенности в рамках аудита позволяют оценить правильность и адекватность принимаемых мер защиты, тенденции внедрения новых способов и средств обеспечения ИБ и, таким образом, дать окончательную оценку достигаемому уровню защищенности.

На сегодняшний день тестирование защищенности или тестирование на проникновение является наиболее распространенным подходом для анализа безопасности веб-приложений [1, 2]. В последнее время, наряду с данным подходом, динамичное развитие получило направление тестирования на основе моделей, которое стало жизнеспособным альтернативным и взаимодополняющим подходом [3, 4]. Тем не менее оба указанных подхода, применяемые в современных методах тестирования, по-прежнему требуют значительных усилий эксперта-аналитика, проводящего тестирование, даже при использовании существующих инструментов, руководств или библиотек, созданных на основе известных уязвимостей и компьютерных атак [2]. В модельном тестировании формализованная модель веб-приложения используется для получения типовых тестовых примеров. Для этого требуется, чтобы аналитик сначала создал такую модель, что может быть довольно сложно, особенно в промышленных условиях.

В статье предлагается оригинальный подход, фундаментом которого является гибкая платформа тестирования безопасности. Он базируется на методе, позволяющем повторно использовать накопленный опыт экспертов по проникновению и основанном на исследуемой модели приложения, что стало возможным за счет использования базы данных (БД) успешных действий и определения их уровня. Новизна подхода заключается в применении средств проверки модели с целью нахождения контрпримера (представляющего собой последова-

тельность действий, которые необходимо выполнить, чтобы перевести веб-приложение в вероятное небезопасное состояние) с последующим упорядочиванием процесса тестирования соответствующего приложения.

Разработанная схема этапов тестирования защищенности (рис. 1) использует действия веб-приложения как при моделировании его функционирования, так и при конкретизации и формализации тестируемых ситуаций.

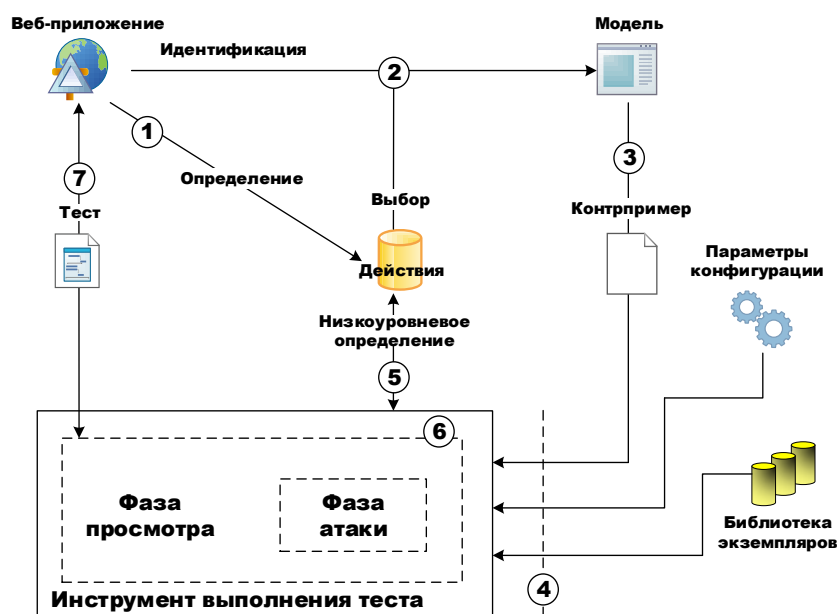


Рис. 1. Схема этапов тестирования защищенности объектов коммуникации

В рамках анализа эксперт по безопасности создает модели веб-приложений путем определения и добавления наиболее значимых действий. Действие представляет собой абстрактное представление части веб-приложения, предоставляющее определенные функции, которые могут быть использованы клиентами через пользовательский интерфейс или веб-браузер. Веб-приложения предлагают различные типы функциональных возможностей, причем как общего назначения (аутентификация, редактирование частной информации, поиск информации и др.), так и конкретных функций, реализующих чтение новостей, покупку товаров в интернет-магазинах и др.

Под *веб-приложениями* понимаются приложения, представляющие собой веб-сайт, на котором размещены страницы с частично либо полностью не сформированным содержимым, а также приложения, с помощью которых ведется административное управление веб-сайта, например: Microsoft IIS, ASP.NET, Apache и др.

После выполнения действий по моделированию функционирования приложения разработанная модель наполняется данными о состоянии подсистемы безопасности. Эти данные згружаются в модуль тестирования, возвращающий контрпримеры (при их наличии). Однако и сами действия, и контрпримеры являются слишком абстрактными для непосредственного использования при тестировании веб-приложения, что требует модификации подхода к тестированию защищенности, используемого в известных методиках. Таким образом, указанная структура обеспечивает механизм выполнения тестирования, преобразующий контрпример в соответствующую последовательность HTTP-запросов (действий), которые могут быть выполнены в веб-приложении.

ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

На первом этапе эксперт-аналитик по безопасности на основе всестороннего анализа спецификации задействуемой информационной инфраструктуры должен определить действия веб-приложения (этап 1 на рис. 1). Также на данном этапе аналитик должен проверить вручную, какие из действий, содержащихся в БД, могут быть (повторно) использованы для моделирования другого веб-приложения (если оба приложения имеют одинаковую функциональность, то можно повторно использовать связанное действие). Если таковые действия отсутствуют в БД, необходимо добавить в нее соответствующие описания новых действий.

База данных, заполненная надлежащим множеством действий, обеспечивает аналитика средствами для создания модели веб-приложения (этап 2). Модель включает выбранное подмножество определенных действий (идентифицированных в отношении тестируемого веб-приложения), взаимосвязь между ними и спецификацию цели безопасности, подлежащей тестированию.

На третьем этапе модель сопоставляется с контрольной моделью. Структура является общей и, следовательно, не привязана к определенному инструменту проверки модели. В статье используется инструмент AlloyAnalyzer [5], учитывающий ее ограничения и цели безопасности, записанные в синтаксисе Alloy, и проверяющий соответствие спецификации цели в модели, а также генерирующий один или несколько контрпримеров, если данная цель нарушена.

На заключительном этапе применяется автоматическая технология выполнения тестов, которую эксперт-аналитик может использовать для реализации тестовых примеров в веб-приложении. Механизм выполнения тестирования обеспечивает соединение с *InstLib* и данными, содержащимися в значениях конфигурации (*ConfVal*), необходимыми для взаимодействия с веб-приложением (этап 4), реализуя преобразование (через определение низкого уровня на этапе 5) контрпримеров (этап 4) в исполняемые тестовые примеры. В конце этого этапа информация, содержащаяся в контрпримере, действиях и HTTP-запросах, объединяется при создании набора тестовых примеров (этап 6), которые запускаются в веб-приложении (этап 7).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕХОДНЫХ СИСТЕМ

В работе [6] введена система перехода $TS = (S, Act, \rightarrow, I, AP, \mathcal{L})$, где S – совокупность состояний (т. е. некоторая информация о системе в определенный момент ее поведения); Act – множество действий (имена которых используются для неофициального описания того, что происходит во время перехода); $\rightarrow \subseteq S \times Act \times S$ – отношение перехода, описывающее, каким образом система может переходить из одного состояния в другое; I – множество начальных состояний; AP – множество неделимых предположений (которые интуитивно выражают известные факты о состояниях); $\mathcal{L}: S \rightarrow 2^{AP}$ – функция маркировки, выступающая в качестве модели для описания поведения систем. При этом TS являются в основном ориентированными графами, где узлы представляют собой состояния, а ребра – переходы, т. е. изменения состояния.

Как только будет определена система переходов, ее можно использовать для получения рабочего приложения (т. е. результат разрешения возможного недетерминизма в системе), описывающего возможное поведение системы при переходе в соответствующие состояния. Кроме того, необходимо описать каждый фрагмент выполнения приложения.

Конечный фрагмент выполнения $TS - \varrho$ представляет собой конечную чередующуюся последовательность состояний и действий:

$$\varrho = s_0 \alpha_1 s_1 \alpha_2 \dots s_n \alpha_n \text{ при } s_i \xrightarrow{\alpha_{i+1}} s_{i+1} \text{ для всех } 0 \leq i \leq n, \text{ где } n \geq 0. \quad (1)$$

Для тестирования возможности проникновения на основе эксплуатации уязвимости (дефекта) необходима следующая информация о веб-приложении:

- знания и данные, которые пользователи могут обрабатывать при взаимодействии с веб-приложением;
- поведение веб-приложения;
- механизмы безопасности и сведения, которые могут быть использованы для тестирования безопасности.

Данные, полученные в результате проводимого анализа, используются в моделях веб-приложений для определения множества неделимых предположений AP системы переходов TS .

Представленные в модели функции веб-приложения на прикладном уровне (как на стороне клиента, так и на стороне сервера) показаны на рис. 2.

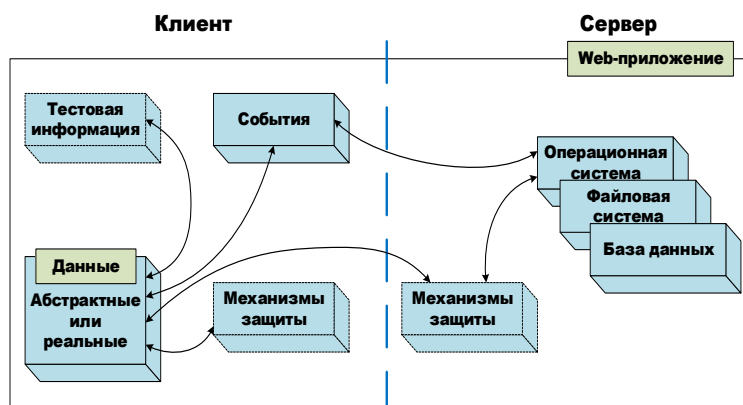


Рис. 2. Возможности, моделируемые в отношении данных, обрабатываемых веб-приложением

Модификация классической модели дискреционной безопасности на основе матрицы доступа используется для определения отношения перехода \rightarrow и множества действий Act . Модель веб-приложения с точки зрения анализа защищенности содержит структуру данных, обрабатываемых веб-приложением (и его пользователями); информацию о хранении и управлении этими данными веб-приложением; функции, предоставляемые веб-приложением; информацию о доступности этих функций пользователям веб-приложения.

Разработанная модель включает следующие компоненты: модель пользователя (пользователей), данные пользователей приложения, знания пользователей приложения, развитие знаний пользователей, модель противника, события и знания, механизмы и технологии безопасности, состояние веб-приложения. Рассмотрим данные компоненты более подробно.

В модели пользователя обязательным элементом функционирования веб-приложения является пользователь, обладающий следующими функциями:

- возможностью взаимодействия с веб-приложением на основе уникального идентификатора;
- возможностью управления данными, обрабатываемыми таким веб-приложением, и их использования;
- возможностью взаимодействия с данными других пользователей;
- возможностью взаимодействия только с одним приложением одновременно.

Множество ***UserName*** определяется как набор уникальных идентификаторов пользователей, взаимодействующих с веб-приложением. Множество ***UserName*** содержит имена пользователей, у которых есть учетная запись в приложении. В настоящее время большинство веб-приложений допускают анонимный просмотр, когда пользователи не входят в систему. Для идентификации этого типа пользователей предназначен специальный ярлык (***Anon***). Таким образом, примером множества ***UserName*** может являться

$$\mathit{UserName} = \{\mathit{Alice}, \mathit{Bob}, \mathit{Anon}\}. \quad (2)$$

Данные пользователей тестируемого веб-приложения. Одной из основных проблем, характерной для методов проверки моделей, является выбор правильного уровня абстракции модели, которая должна быть заранее определена. Определим ***MetaData*** как множество метаданных, которые определяет аналитик безопасности. При этом метаданные должны отражать значения данных, которые пользователи используют для взаимодействия с веб-приложением. Примером ***MetaData*** является следующее множество:

$$\mathit{MetaData} = \{\mathit{Credential}, \mathit{User} - \mathit{Id}, \mathit{Profile}, \mathit{Messages} - \mathit{List}, \mathit{User} - \mathit{Session}, \mathit{Uploaded} - \mathit{File}, \dots\}. \quad (3)$$

Определим набор значений для каждого элемента ***MetaData*** в вышеприведенном выражении:

Credential – идентификационные данные, принадлежащие пользователю и подтверждающие его личность (например, имя пользователя и пароль);

User – Id – идентификатор, который веб-приложение предоставляет пользователю;

Profile – персональные данные, связанные с пользователем (например, описание характеристик пользователя);

Messages – List – список сообщений, хранящихся на сервере, к которому пользователь может получить доступ;

User – Session – абстрактное представление обмена информацией между веб-приложением и пользователем;

Uploaded – File – файл, который можно загрузить на сервер через веб-приложение.

Множество ***MetaData*** должно быть создано в абстрактной записи ***UserData***, содержащей данные, обрабатываемые пользователем. Таким образом, запись ***UserData*** является представлением абстрактной информации в ***MetaData***, которую пользователь может обработать. Другими словами, запись ***UserData*** – это контейнер для знаний, которые пользователь может получить из веб-приложения.

Пусть $|\mathit{MetaData}| = n$ – количество элементов в ***MetaData***, в то время как ***BasicTypes*** = {***String, Int, Bool, ...***} является множеством конкретных типов данных, а ***StructTypes*** = {***Profile, Credential, ...***} – абстрактные типы элементов ***MetaData***.

Определим запись ***UserData*** как ***UserData*** = (***field₁, ..., field_n***), где ***field_i*** ∈ ***UserData*** является экземпляром (на некотором уровне абстракции) *i*-го элемента ***MetaData*** и записывается в форме ***field_i*** = [(***subfield_{i,1}***, [***subfield_{i,2}***], ...)], где ***field_i*** имеет тип ***StructTypes*** или ***BasicTypes***, а ***subfield_{i,j}*** является необязательным и имеет тип ***BasicTypes***.

Каждый пользователь имеет доступ к своим метаданным через пользовательский интерфейс веб-приложения. В многопользовательской среде аналитик безопасности должен иметь возможность отслеживать использование данных, и для этой цели недостаточно всего лишь множества ***UserData***.

Множество данных определяется путем создания связей каждого элемента в ***UserData*** с каждым пользователем в ***UserName***, т. е.

$$Data = \{x.y | x \in UserName \wedge y \in UserData\}. \quad (4)$$

Таким образом, множество *Data* содержит все возможные данные, которые пользователи могут обрабатывать во время их взаимодействия с веб-приложением.

Знания пользователей тестируемого веб-приложения. Во время взаимодействия с веб-приложением пользователь может иметь (или использовать) доступ к различным типам знаний. Например, он может использовать некоторую информацию, которую он уже знает, извлекать информацию из самого веб-приложения или, в пограничных случаях, даже угадывать некоторую информацию. Эти типы информации описаны соответствующими метками, содержащимися в множестве

$$K_{Source} = \{Initial, Gained, Guessed\}. \quad (5)$$

Предполагаемое значение для меток в K_{Source} определяется следующими возможными источниками знаний, которые могут быть смоделированы:

Initial – пользователь знает данные с момента начала взаимодействия с веб-приложением (источник этих знаний здесь не обсуждается, и его определение требуется аналитику безопасности);

Gained – знания получены в период времени взаимодействия с веб-приложением;

Guessed – значение данных было угадано, этот тип данных будет использоваться только противником.

Таким образом, выразим знания пользователей как множество триплетов:

$$U_{Knows} = \{(x, d, k_{src}) | x \in UserName \wedge d \in Data \wedge k_{src} \in K_{Source}\}. \quad (6)$$

Каждый триплет в U_{Knows} учитывает, что пользователь x знает данные d с некоторым предположением k_{src} о происхождении знания. В дальнейшем анализ предположения о происхождении знаний не производится.

Развитие знаний пользователя тестируемого веб-приложения. Чтобы объяснить, каким образом знания пользователей могут изменяться (эволюционировать), формализуем исходные знания и опишем две возможные альтернативы для определения эволюции знаний.

Когда пользователь начинает взаимодействовать с веб-приложением, он уже знает некоторую информацию о данных, которые он будет использовать. В предлагаемой структуре каждый пользователь в *UserName* имеет начальные знания, которые помечены как *Initial*. Можно извлечь из множества U_{Knows} те данные d , при которых $k_{src} = Initial$. Таким образом, начальные знания пользователя $x \in UserName$ – это такие данные, при которых

$$d \in Data \text{ при этом } (x, d, Initial) \in U_{Knows}. \quad (7)$$

Данные, относящиеся к исходным знаниям, определяются аналитиком безопасности в начале анализа. В дальнейшем множество *initialK* используется в качестве контейнера для первоначального знания пользователя.

Эволюция знаний пользователя возможна посредством присвоения меток данным в множестве U_{Knows} , что позволяет пользователям анализировать новую информацию. Назначение меток производится посредством действий. Когда действие выполняется пользователем, метки в U_{Knows} изменяются в соответствии с действием:

$$(U_{Knows}^{s_0} \xrightarrow{\alpha_1} U_{Knows}^{s_1} \xrightarrow{\alpha_2} \dots \xrightarrow{\alpha_n} U_{Knows}^{s_n} \in \{(x, d, k_{src}) | (usr, d, k_{src})\}). \quad (8)$$

Описание злоумышленника. В некоторых исследованиях по данной тематике авторы вводят в анализ мощного ad-hoc – атакующего (например, в работе для протоколов безопасности [7]). При тестировании на проникновение аналитики безопасности должны предполагать, что все пользователи системы являются потенциальными нарушителями и каждая

компонента веб-приложений может использоваться для ввода опасных данных или для их извлечения. Основное различие между этим подходом и другими типами анализа заключается в том, что злоумышленник не вводится в модель как объект или канал.

Как и при подходе на основе тестирования на проникновение, предлагаемая структура использует одного из пользователей веб-приложения в качестве нарушителя, при необходимости, и других пользователей для генерации трасс атаки с несколькими пользователями. Поскольку каждый пользователь может выступать в качестве противника, анализ веб-приложений не требует введения специальных пользователей (или каналов связи), помимо тех, что используются в исследуемом веб-приложении.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

События описывают, что происходит с данными веб-приложения (как на стороне клиента, так и на стороне сервера). События веб-приложений связаны с действиями. Когда действие α выполняется, происходят некоторые события (т. е. пользователь запускает некоторые события посредством использования действия). Пусть синтаксис событий выглядит следующим образом:

$$x.event(parameters, location), \quad (9)$$

где $x \in User Name$, $event$ – имя события;

$parameters \subseteq Data$, $location$ – расположение данных, относящихся к информационной технологии веб-приложения.

В случае использования действия записи некоторых данных в базу данных веб-приложения событие $x.write(targetData, database)$ будет связано с этим действием.

Чтобы упростить обозначение для действий, события указываются в целевом состоянии действия. Например, $s_i \xrightarrow{\alpha_i + \{events\}} s_{i+1}$, следовательно, $s_i \xrightarrow{\alpha_{i+1}} s'_{i+1}$, где для каждого события в $\{events\}$ s'_{i+1} – это метка, выражающая событие ($event$), его местоположение ($location$) и задаваемая параметром события ($parameters$).

Определим множество событий, связанных с пользователем и данными, которые он использует:

$$WA_{Event} = \{(x, d, e) | x \in User Name \wedge d \in Data \wedge e \in Event\}, \quad (10)$$

при этом каждый триплет в WA_{Event} описывает событие e , происходящее по данным d , и пользователя x , его запустившего.

События и знания. Начальные события. Как правило, пользователь начинает взаимодействие с веб-приложением с домашней страницы, поэтому аналитик безопасности может использовать домашнюю страницу в качестве отправной точки для тестов. Предположим, что аналитик может определить начальные знания пользователей, что также возможно и для событий. Начальные события должны быть согласованы с выбранной отправной точкой и изменены аналитиком в случае решения изменить начальную точку анализа.

Развитие знаний через события. Аналитик безопасности имеет две возможности для эволюции знаний в модели: монотонное знание, немонотонное знание.

Первый тип знаний должен использоваться в тех сценариях, где пользователи хранят в памяти данные, к которым у них есть доступ. Последний используется в тех сценариях, когда пользователи могут терять данные, например между разными сеансами. События также играют центральную роль в возможной эволюции знаний, поскольку пользователи могут полу-

чать новые данные во время взаимодействия с веб-приложением. Определим эту функцию в соответствии с фактом, который должен быть реализован в модели.

Моделирование механизмов безопасности. Моделирование веб-приложения требует интеграции возможных механизмов безопасности, которые применяются в отношении данных, обрабатываемых приложением.

В руководстве по тестированию OWASP указывается, что общий набор тестов безопасности может включать тесты безопасности для проверки как положительных, так и отрицательных требований для элементов управления безопасностью, таких как контроль подлинности и контроль доступа, входная проверка и кодирование, шифрование, управление пользователями и сессиями, обработка ошибок и исключений, аудит и ведение журнала [2].

Моделирование информации, связанной с тестированием. Введение механизмов безопасности в модель иногда бывает недостаточным для охвата всех типов тестов на проникновение. В качестве примера учтем использование AJAX в современных веб-приложениях. Этот тип функций подвержен различным типам атак. Аналогичным образом введем в модельную информацию использование функций AJAX, чтобы повысить результативность тестирования веб-приложений. Информация, которую необходимо добавить в модель, – это та, которая получена из опытного тестирования на проникновение аналитиком безопасности. Данная информация может использоваться для модификации поверхности атаки (т. е. суммы различных точек, в которых есть возможность ввода или извлечения данных).

Утверждения о механизмах безопасности и связанной с тестированием информации. Взаимодействие пользователя с веб-приложением всегда осуществляется через браузер. Из веб-приложения может быть извлечено много информации о том, как обрабатываются данные пользователя и как реализуются механизмы безопасности. Аналитик может определять утверждения (в форме соответствующих меток) об информации для определения множества **Assertion**. Стратегия, которой аналитик может придерживаться при определении множества **Assertion**, заключается в том, чтобы идентифицировать ключевые поверхности атаки, открывающие веб-приложения. Эта стратегия соответствует отображению поверхности атаки на веб-приложение.

В качестве примера приведем следующее множество:

Assertion = {Granted, Checked, AJAX, Sanitized, Admin, User, Echoed, PageIncluded}. (11)

Предполагаемые значения для элементов, соответствующие утверждениям:

Granted – используется вместе с данными, имитирующими сеанс (HTTP), и означает, что сеанс предоставлен (т. е. пользователь вошел в систему, а во время связи используется идентификатор сеанса);

Checked – если данные используются в запросе в базе данных (или файловой системе) и могут не отображаться пользовательским интерфейсом;

Sanitized – если выполняется санация данных перед сохранением или отображением;

isAdmin/isUser – если проверяется роль пользователей веб-приложения (эти утверждения определяют значения пользовательских данных **userType** и проверяются всякий раз, когда действие требует этих привилегий);

AJAX – если данные были отображены, а их значения получены с помощью функций AJAX;

Echoed – если данные, которые отправлены по запросу, отображаются на странице ответов идентично;

PageIncluded – если в URL/странице есть прямая ссылка на файл, размещенный на сервере.

Метки в **Assertion**, определяемые аналитиком безопасности, ссылаются на утверждения, связанные с действиями, и могут иметь некоторые параметры (подмножество **UserData**).

Как определено для множества *Event*, метки указываются в целевом состоянии действия, где для каждого утверждения метка, его выражающая, дается параметрам утверждения.

Таким образом, определим следующее множество:

$$SEC_{Assertion} = \{(x, d, p) | x \in UserName, d \in Data, p \in Assertion\}, \quad (12)$$

для которого следует, что определенный пользователь *x* использовал данные *d*, на которых аналитик безопасности сделал предположение *p* о том, как данные *d* обрабатываются с точки зрения безопасности.

Пусть $TS = (S, Act, \rightarrow, I, AP, \mathcal{L})$ является переходной системой и $\varrho = s_0 \alpha_1 s_1 \alpha_2 \dots s_n \alpha_n$ ($n \in \mathbb{N}$) – фрагмент выполнения, тогда получим:

- $SEC_{Assertion}^{s_i}$, обозначает нахождение множества $SEC_{Assertion}$ в состоянии s_i ;
- события, инициированные пользователем «usr» в состоянии s_i , являются множеством

$$\{(x, d, p) | (usr, d, k_{src}) \in SEC_{Assertion}^{s_i}\}. \quad (13)$$

Теперь определим множество неделимых утверждений *AP* переходной системы *TS* как

$$AP = \{X | X \in U_{Knows} \vee X \in WA_{Event} \vee X \in SEC_{Assertion}\}. \quad (14)$$

Описание состояний моделируемого веб-приложения. Каждое состояние $s_i \in S$ описывает конкретный снимок веб-приложения в отношении следующей информации:

- о пользователях (в *UserName*) и их знаниях в $U_{Knows}^{s_i}$;
- о случившихся событиях (в *Event*) на данных $WA_{Event}^{s_i}$;
- об утверждениях (*Assertion*) о механизмах безопасности и связанной с тестированием информации $SEC_{Assertion}^{s_i}$.

Состояние описывает, что происходит на стороне клиента во время взаимодействия с веб-приложением с дополнительной информацией об используемых серверных технологиях.

Разработанная модель использует матрицу доступа *P*, где строки соответствуют субъектам, столбы – объектам, и правило *R*, которое может быть назначено ячейкам *P*. Для веб-приложения состояние *TS* является экземпляром матрицы *M*. Таким образом, имена строк принимают значения из *UserName*, столбцов – из каждого элемента *Data*, а метки в *KSource*, *Event* и *Assertion* назначаются ячейкам *M*.

Пусть $TS = (S, Act, \rightarrow, I, AP, \mathcal{L})$ является переходной системой и *M* – матрица, определяющая ее состояния. Множество *I* начальных состояний определяется аналитиком безопасности с инстанцированием матрицы *M*.

Начальное состояние определяет начальные знания пользователей, начальные события и начальное состояние механизмов безопасности и тестирования соответствующей информации. Чтобы определить возможные начальные состояния, аналитик безопасности должен определить возможные исходные матрицы *M*, задающие эти значения для тестов, которые он хочет выполнить. Обозначим начальное состояние как M^0 .

Поскольку ячейки матрицы *M* содержат подмножество *AP*, можно утверждать, что каждая ячейка может содержать несколько значений, а состояние *TS* может изменяться в случае добавления значения из *AP* к значениям, содержащимся в одной ячейке, т. е. множество состояний *S* содержит все возможные экземпляры матрицы *M*.

Пусть *UserName* – множество имен пользователей, *Data* – множество данных, *AP* – множество неделимых утверждений, $n, m, p \in \mathbb{N}$, для которых $n = |UserName|$ и $m = |Data|$ – соответственно количество строк и столбцов матрицы *M*. Множество состояний *S* определяется как объединение всех возможных вариантов из *m* по *n* матрицы *M*:

$$S = \{M | \forall i < m, \forall j < n. M[i, j] \subseteq AP\}. \quad (15)$$

Пусть $n, m, p \in \mathbf{N}$, при этом $n = |UserName|$, $m = |Data|$ и $p = |AP|$, тогда число возможных состояний в S – количество элементов в множестве AP , умноженное на количество элементов (записано как \mathcal{P}) в матрице M (т. е. ячеек матрицы M):

$$|S| = \mathcal{P}(AP) \cdot \mathcal{P}(m \cdot n) = 2^{n \cdot m} \cdot 2^p = 2^{(n \cdot m) + p}. \quad (16)$$

Формализация переходов и достижимых состояний. Чтобы описать достижимые состояния переходной системы, необходимо ввести переходное отношение \rightarrow (и множество *Act* – множество названий действий, описывающих переходы).

Переходы описывают, как система переходит из одного состояния в другое. Аналитик определяет переходы через определение действий. Определение действий соответствует определению отношения перехода (\rightarrow) и в то же время – множеству *Act*. В качестве первоначального определения действие (т. е. переход) является процедурой, которая при условии текущего состояния проверяет, возможно ли применить действие, и вычисляет следующее состояние переходной системы.

Достижимыми состояниями системы перехода являются те, которые достижимы посредством применения всех возможных переходов \rightarrow из начальных состояний в I (т. е. начальных состояний, определенных аналитиком безопасности).

Действия. Веб-приложения предлагают различные типы функциональных возможностей, как общего назначения (аутентификация, редактирование частной информации, поиск информации и др.), так и специфичных функций, таких как чтение новостей или покупка товаров в интернет-магазине. На этапе моделирования для реализации единой функциональности необходимо рассматривать все детали для последующего использования. Особое внимание уделяется данным, к которым имеют доступ функциональные возможности, и происхождению/использованию этих данных в веб-приложении.



Рис. 3. Особенности, представляющие интерес при моделировании веб-приложений

Функциональность веб-приложений может варьироваться множеством способов, но могут быть найдены и некоторые общие функции (ряд из них уже обсуждалась выше) как на стороне клиента, так и на стороне сервера (как показано на рис. 3).

Моделирование действий. Пусть следующее множество – набор меток для функциональных возможностей:

$$functionName = \{Login, ViewProfile, GetEdit, EditProfile, ListId, Search, UpdateProfile, Logout\}. \quad (17)$$

Действия также описывают отношение перехода \rightarrow . Аналитик безопасности должен определить его в множестве **Action** (действий), которое вводится в модель.

Действие $\alpha \in Action$ определяется как

$$\alpha = name(agent, parameters) / [Conditions] Primitive Transitions, \quad (18)$$

где $name \in functionName$, $agent \in UserName$,

$parameters \subseteq Data$, $Conditions$ – множество условий, которые должны выполняться для реализации действия;

$PrimitiveTransitions$ – множество переходов, описывающих изменение состояния.

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ

На этапе проверки модели матрица **M** используется для определения состояний веб-приложения в отношении функциональных возможностей, которые реализует веб-приложение. Поскольку доступ к функциям возможен через HTTP-запросы, информация, хранящаяся в матрице **M** (т. е. данные, которые определяют состояние **TS**), может ссылаться на страницу или часть пользовательского интерфейса, где отображаются некоторые данные или в которых пользователь может получить доступ к функциям веб-приложения.

Чтобы определить отношения между страницами и функциональными возможностями (насколько они совпадают), опишем, каким образом действия соответствуют реализации веб-приложения в отношении его страниц. С определением представлений необходимо дать аналитику безопасности возможность моделировать каждую функциональность как одно действие, без необходимости определять одно и то же действие, относящееся к нескольким функциям.

Примеры просмотров находятся в **WebGoat**. Были определены две функции **Login** и **ListId**. В фактической реализации две функциональности используются конкатенированными, чтобы показать страницу после успешного входа в систему. Другими словами, аналитик безопасности имеет объединенное представление о двух действиях.

У эксперта-аналитика также есть две возможности для определения видов действий веб-приложения:

– предварительное определение (**Pre – definition**): аналитик безопасности может объединить функциональные возможности в модели, определяющей новое действие, содержащее конечный результат, или ввести факт, в котором говорится, что эти два действия должны быть всегда конкатенированы;

– постопределение (**Post – definition**): определение конкатенированных действий остается таким же, как определение отдельных действий, а аналитик безопасности занимается конкатенацией на этапе конкретизации.

Предположение о том, что анализ веб-приложения с обоими подходами применим, является интуитивно правильным, вследствие двух причин:

– первый ограничивает пространство исследований и следует за потоком между страницами, которые реализует веб-приложение, но зависит от ограничений, введенных с конкатенацией действий.

– последний может пропустить несколько отдельных действий, чтобы конкретизировать конкатенацию в контрпримерах (с возможностью наличия ложных срабатываний в контрпримерах), но следует за статусом отсутствия состояния HTTP-протокола.

Адекватность предложенной модели подтверждается совпадением функциональных свойств и соответствующих состояний веб-приложения, наблюдаемых и фиксируемых в ходе тестирования и оценивания защищенности веб-приложений [8], а также в процессе моделирования функционирования объектов информационного взаимодействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, перспективным направлением тестирования защищенности объектов коммуникации является экспериментальная проверка путем тестирования целенаправленными воздействиями, аналогичными тем, которые будут применяться нарушителем.

При тестировании объектов коммуникации целесообразно сформировать системный подход к оцениванию защищенности средствами и способами проведения компьютерных атак и в дальнейшем придерживаться его. При этом такое тестирование необходимо рассматривать как основную форму контроля устойчивости объектов коммуникации к целенаправленным воздействиям на веб-сервер.

Тестирование на основе моделей функционирования веб-приложений является весьма перспективной формой обоснования соответствующего инструментария для проведения экспериментальных исследований оценивания защищенности веб-приложений, а также для проектирования и построения перспективных систем информационной безопасности.

Список используемых источников

1. Тестирование на проникновение в веб-приложения // Минимальный контрольный список, основанный на руководстве по тестированию OWASP. – URL: <https://www.apriorit.com/dev-blog/622-qa-web-application-pen-testing-owasp-checklist/> (дата обращения: 09.09.2019).
2. Овчаров В.А. Моделирование субъектно-объектного взаимодействия в сетевых инфраструктурах // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 2 (39). – С. 42–61.
3. A survey on model-based testing approaches: A systematic review / C. Dias Neto Arilo, Subramanyan Rajesh, Vieira Marlon and H. Travassos Guilherme // In Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Empirical Assessment of Software Engineering Languages and Technologies: Held in Conjunction with the 22Nd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE) 2007. – New York, 2007. – P. 31–36.
4. Utting M., Pretschner A. and Legeard B. A taxonomy of model-based testing approaches // Software Testing, Verification and Reliability, 22(5):297–312. – August 2012.
5. Jackson D. Alloy: A language & tool for relational models. alloy.mit.edu/alloy/. – 2015.
6. Baier C., Katoen J.-P. Principles of Model Checking (Representation and Mind Series). – The MIT Press, 2008.
7. Dolev D., Chi-Chih Yao A. On the security of public key protocols // IEEE Transactions on Information Theory, 29(2):198–207. – 1983.
8. Анализ уязвимостей в веб-приложении с помощью Burp Scanner. – URL: <https://www.hackingarticles.in/vulnerability-analysis-web-application-using-burp-scanner/> (дата обращения: 09.09.2019).

А.В. Антропова;
В.А. Давидчук;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Лагун,
кандидат техн. наук, доцент

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЗАГРАДИТЕЛЬНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПЛОЩАДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлены результаты математического моделирования процессов создания и функционирования дисперсных экранов для защиты площадных объектов в районах дислокации ракетно-космических комплексов, а также оценки динамики их образования и развития. Разработан алгоритм проведения математического моделирования процесса создания защитного экрана. В итоге предложены соотношения для расчета защитного дисперсного экрана и даны рекомендации по их практическому применению.

Ключевые слова: дисперсное образование, дисперсная фаза, механика сплошных сред, двухфазная среда, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Наземная космическая инфраструктура космодромов включает большое количество объектов, размещенных на стартовых и технических комплексах. Существующие системы защиты стартовых ракетно-космических комплексов (РКК) предназначены для решения таких задач, как:

- защита элементов технологического оборудования от возникающих пусковых нагрузок;
- защита позиционного района стартового комплекса от возможного нападения противника имеющимися у него средствами;
- защита от аварийных ситуаций при возникновении проливов компонентов ракетных топлив (КРТ) или аварии в местах их хранения.

Одним из перспективных способов оперативного подавления указанных факторов является создание многофазных дисперсных экранов, препятствующих движению летательных аппаратов (ЛА) как вероятных средств нападения противника, а также несанкционированному движению паров КРТ. Изучение процесса создания многофазной среды на основе образования выбросных защитных экранов дает возможность судить о перспективах создания систем защиты РКК [1].

Разработка подобных систем возможна при условии, что известны функции газодинамических и теплофизических параметров защитного экрана, изменяющихся во времени и по пространству. Существующая в настоящее время экспериментальная база не позволяет охватить весь спектр необходимых характеристик процесса создания дисперсного экрана с необходимыми параметрами для защиты объектов РКК.

Исходя из этого приемлемым инструментом, позволяющим получить необходимые параметры защитного экрана, является его математическое моделирование [2].

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ ДИСПЕРСНОГО ЗАГРАДИТЕЛЬНОГО ЭКРАНА

Изучение процесса динамики многофазной среды с учетом эффектов образования выбросных защитных экранов дает возможность судить о перспективах создания систем защиты РКК, которые обеспечивали бы устойчивую преграду для пролета в позиционный район РКК. Разработка подобных систем может быть успешной при наличии необходимой информации о механике импульсного многофазного выброса, при наличии развивающейся во времени картины изменений полей скорости, плотности газа и твердых частиц, давления в несущей фазе, а также об интенсивности процессов тепло- и массопереноса между фазами. Получение наиболее полной информации о характере взаимодействия многофазных экранов с опасными факторами возможно при проведении сложного дорогостоящего натурального эксперимента. Следует отметить и то, что регистрирующая аппаратура, используемая в эксперименте, вносит определенную погрешность в процесс изучения параметров процесса формирования защитного дисперсного экрана. Поэтому информативным инструментом, позволяющим получить необходимые данные, является математическое моделирование этого процесса.

При математическом моделировании процесса взаимодействия защитного дисперсного экрана, витающего в приземной части атмосферы РКК, наибольшее затруднение вызывают математические соотношения, описывающие процессы образования, витания и оседания дисперсных экранов с заданными характеристиками. Предложенная математическая модель основана на имеющихся данных, полученных в результате численных экспериментов по постановке защитных экранов, а также данных о динамике развития защитных экранов. В основном эти данные сводились к описанию плотности дисперсного образования и скорости его оседания. Кроме того, при составлении уравнений движения летательных аппаратов противника сквозь защитный экран были использованы «аэродинамические» характеристики обтекания таких аппаратов дисперсными потоками с параметрами защитных экранов, полученных при выполнении специально поставленных физических экспериментов. Поэтому целью математического моделирования является получение пространственно-временной картины процесса создания многофазного защитного экрана дисперсного образования с учетом процессов внутри и межфазного взаимодействия.

В соответствии с имеющимися у рассматриваемой здесь задачи условиями и ограничениями в качестве физической модели устройства по образованию дисперсного защитного облака принята модель выбросного генератора, построенного по принципу аэродинамической ударной трубы.

В отличие от классической аэродинамической ударной трубы в принятом генераторе внутреннее пространство заполнено частичками твердой фазы с различной дисперсностью, а поровое пространство твердой фазы заполнено сжатым газом. Вскрытие мембраны такого канала приводит к нестационарному выбросу твердой фазы и сжатого газа. Движение дисперсного образования из канала в этом случае может быть описано в осесимметричной постановке. По аналогии с чистым газом при таком выбросе формируется волновая структура, представленная на рис. 1.

При моделировании процесса выброса математическая модель должна описывать динамику движения дисперсной среды с известными свойствами при заданных начальных и граничных условиях, как в канале генератора [6], так и в атмосфере [7]. В математической модели необходимо учесть основные свойства пористых сред, к которым относятся сыпучие среды, они рассматриваются в качестве потенциальных твердых наполнителей системы защиты (СЗ) РКК. Эти наполнители выбраны в основном по причине доступности и низкой стоимости в условиях РКК.

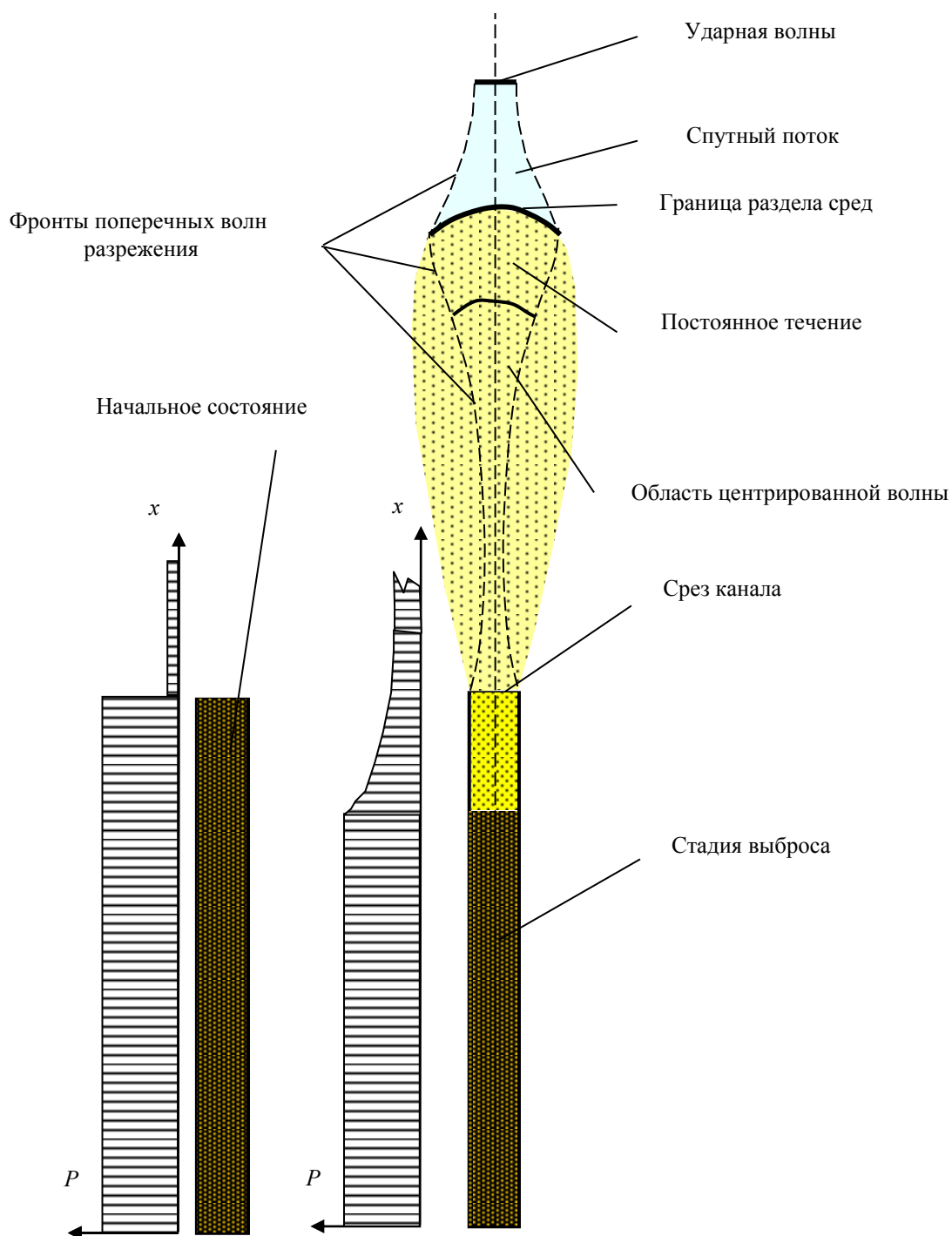


Рис. 1. Схема создания защитного экрана

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ ЗАГРАДИТЕЛЬНОГО ДИСПЕРСНОГО ЭКРАНА

При выборе математической модели динамики создания и развития заградительного дисперсного экрана можно воспользоваться методами, основанными на известных моделях сплошных сред [3]. В основе методов механики сплошных сред лежит так называемое «феноменологическое» представление газодисперсных течений. Такое представление подразу-

мекает возможность применения к дисперсной фазе, состоящей из отдельных частиц и позволяет представить многофазную среду искусственной сплошной средой со специфическими свойствами. Такие методы базируются на использовании уравнений Эйлера или Навье – Стокса.

Основная особенность построения феноменологической модели заключается в переходе от реальной физической среды к некому ее модельному представлению. Для этого исходная система дифференциальных уравнений записывается как осредненная. При этом не учитываются физические процессы, происходящие на микроуровне между отдельными частицами. Поэтому в основе двухфазного движения в рамках двухскоростной (двухконтинуальной) модели лежит схема с общим давлением фаз (бесстолкновительная модель). Бесстолкновительная математическая модель содержит основные данные для математического описания движения многофазных сред методами механики сплошных сред [4, 5]. При этом принимаются следующие допущения:

- размер дисперсных частиц в смеси много больше молекулярно-кинетических размеров молекул газа;
- размер дисперсных частиц мал, что соответствует монодисперсному описанию исследуемой среды;
- дисперсные частицы твердые и недеформируемые;
- отсутствуют процессы образования, слипания и дробления новых дисперсных частиц;
- кинетическая энергия газовой фазы заметно меньше, чем у твердой фазы;
- фазовые переходы не учитываются.

Описание методами [4, 5] гетерогенных смесей связано с определением взаимопроницающего движения составляющих и введением многоскоростного континуума. В каждой точке для каждого из континуумов определяется приведенная плотность, скорость:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i, \quad \rho v = \sum_{i=1}^N \rho_i v_i,$$

и остальные параметры, относящиеся к своей составляющей смеси и своему континууму: α_i – объемная доля фазы; E_i – полная энергия единицы массы каждой фазы; u_i – внутренняя энергия единицы массы каждой фазы; p – давление газа; p_d – эффективное давление частиц; σ_f – тензор эффективных напряжений; k_2 – пульсационная энергия единицы массы дисперсной фазы; g – вектор ускорения сил тяжести.

Для математического моделирования межфазного взаимодействия используются математические модели уравнения сохранения массы, которые в интегральной форме имеют вид

$$\int_V \frac{\partial \rho_i}{\partial t} dV = - \int_S \rho_i v_i^n dS + \int_V \sum_{j=1, i \neq j}^N J_{ji} dV, \quad (1)$$

где J_{ij} – параметр, который характеризует интенсивность перехода массы из j -й в i -тую составляющую (или наоборот). Если применим формулу Гаусса – Остроградского в виде

$$\int_S A v \cdot n dS = \int_V \nabla^k A v^k dV \quad (2)$$

(k – номер декартовой координаты; ∇ – дифференциальный оператор Гамильтона), тогда соотношение (1) можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_i v_i = 0, \quad (3)$$

что для односкоростного случая соответствует известному соотношению

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = 0. \quad (4)$$

Для уравнений импульсов каждого компонента использовано выражение

$$\int_V \frac{\partial \rho_i v_i}{\partial t} dV = - \int_S \rho_i v_i v_i^n dS + \int_S \sigma_i^n dS + \int_S \rho_i g_i dV + \int_V \sum_{j=1, i \neq j}^N P_{ji} dV, \quad (5)$$

учитывающее притоки импульса, действие внешних массовых и поверхностных сил.

Из соотношения (5) следует выражение для дифференциальных уравнений импульсов каждой компоненты:

$$\frac{\partial \rho_i v_i}{\partial t} + \nabla^k \rho_i v_i v_i^k = \nabla^k \sigma_i^k + \rho_i g_i + \sum_{j=1}^N (P_{ji} - J_{ji} v_i), \quad (6)$$

а с учетом (3) можно записать следующее уравнение:

$$\rho_i \frac{d_i v_i}{dt} = \nabla^k \sigma_i^k + \rho_i g_i, \quad (7)$$

или, учитывая относительное движение составляющих смеси ($w_i = v_i - v$):

$$\rho_i \frac{d_i v_i}{dt} = \nabla^k \sigma_i^k + \rho_i g_i - \nabla^k \cdot (\rho_i w_i^k w). \quad (8)$$

Используя сумму внутренней и кинетической энергий $E = u + K$, а также очевидное соотношение $\rho u = \sum_{i=1}^N \rho_i u_i$, получим равенство $\rho K = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i v_i^2}{2}$.

Тогда энергия смеси может быть представлена в виде

$$\rho E = \sum_{i=1}^N \rho_i \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} \right) = \sum \rho_i E_i, \quad (9)$$

где $\left(E_i = u_i + \frac{v_i^2}{2} \right)$. С учетом этого (9) можно записать в следующем виде:

$$\rho K = \frac{\rho v^2}{2} + \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i w_i^2}{2}. \quad (10)$$

Используя равенства (1) и (5) для энергий компонент, можно получить выражение

$$\int_V \frac{\partial \rho_i E_i}{\partial t} dV = - \int_S \rho_i E_i v_i^n dS + \int_S c_i^n dS + \int_V \rho_i g_i \cdot v_i dV + \int_V \sum_{j=1, i \neq j}^N E_{ji} dV - \int_S q_i^n dS. \quad (11)$$

Исходя из того, что для различных взаимодействий компонентов среды справедливы соотношения:

$$E_{ij} = -E_{ji}, \quad E_{ii} = 0,$$

можно принять равенство

$$\frac{\partial \rho_i E_i}{\partial t} + \nabla^k \rho_i E_i v_i^k = \nabla \cdot (c_i - q_i) + \rho_i g_i \cdot v_i + \sum_{j=1}^N E_{ji}. \quad (12)$$

С учетом (4) это уравнение можно переписать в следующем виде:

$$\rho_i \frac{d_i}{dt} \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} \right) = \nabla \cdot (c_i - q_i) + \rho_i g_i \cdot v_i + \sum_{j=1}^N E_{ji}. \quad (13)$$

Суммируя (12) по i с учетом (4), получим уравнение энергии смеси в целом:

$$\rho \frac{dE}{dt} + \sum_{i=1}^N \nabla^k (\rho_i w_i^k E_i) = \nabla^k (c_i^k - q_i^k) + \rho g^k v^k + \sum_{i=1}^N \rho_i g_i^k w_i^k, \quad (14)$$

$$E = u + \frac{v^2}{2} + \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i w_i^2}{2}, \quad c^k = \sum_{i=1}^N c_i^k, \quad q^k = \sum_{i=1}^N q_i^k.$$

Как видно из приведенных выше соотношений, уравнение энергии смеси в целом, так же как уравнение сохранения импульса смеси, зависит от относительного движения фаз.

На основании соотношений (3), (8) и (13) для рассматриваемой среды получим:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_i v_i = 0,$$

$$\rho_i \frac{d_i v_i}{dt} = \nabla^k \sigma_i^k + \rho_i g_i - \nabla^k \cdot (\rho_i w_i^k w),$$

$$\rho_i \frac{d_i}{dt} \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} \right) = \nabla \cdot (c_i - q_i) + \rho_i g_i \cdot v_i + \sum_{j=1}^N E_{ji},$$
(15)

где $i, j = 1, 2, \dots, N$;

$$E_{ji} = -E_{ij}.$$

Тогда, используя очевидное равенство $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N = 1$ ($\alpha_i \geq 0$), для плотностей фаз следует записать

$$\rho_i^\circ = \rho_i / \alpha_i. \quad (16)$$

Для таких процессов, как смещение фаз в гетерогенных моделях, в соотношении, описывающем силы, действующие на частицу в дисперсной смеси, целесообразно использовать результаты, представленные в работе [4]:

$$f_{12} = f_{A1} + f_m + f_\mu, \quad (17)$$

где f_{A1} – сила Архимеда;

f_m – сила присоединенных масс;

f_μ – сила трения из-за вязкости несущей фазы.

Если принимаем, что реальное расположение центров частиц является промежуточным между кубической (наименее плотной) и тетраэдрической (наиболее плотной) решетками как крайними ситуациями, тогда итоговое выражение для связи между α_1 и α_2 выглядит следующим образом:

$$\alpha_{1*} = 1 - b \alpha_2^{2/3},$$

где $b \in (1, 205 \div 1, 103)$ – эмпирический коэффициент, нами принятый равным 1,16.

Представленная аппроксимация предложена М.А. Гольдштиком.

Учитывая сказанное выше, можно записать для всего объема, введя понятие числа частиц (молекул) в единице объема, следующее выражение:

$$n = \frac{3\alpha_2}{4\pi r^3},$$

где r – радиус частиц дисперсной фазы. Тогда

$$F_m = \alpha_1 n f_m = \frac{\chi_m}{2} \rho_1^\circ \alpha_1 \alpha_2 \left(\frac{d_1 v_1}{dt} - \frac{d_2 v_2}{dt} \right),$$

$$F_{A1} = \alpha_1 n f_{A1} = \frac{3\alpha_2}{4\pi r^3} \rho_1^\circ \alpha_2 \left(\frac{d_1 v_1}{dt} - g_1 \right),$$

$$F_\mu = \alpha_1 n f_\mu = \alpha_2 K_\mu \mu_1 r^{-2} (v_1 - v_2),$$
(18)

где χ_m – коэффициент, учитывающий влияние неоднородности и несферичности дисперсных частиц на силу присоединенных масс ($0 \leq \chi_m \leq 1$);

K_μ – коэффициент вязкого взаимодействия;

r – радиус частиц дисперсной фазы.

Выражения (18) представляют собой расчетные соотношения для определения сил межфазного взаимодействия во всем объеме, занимаемом смесью.

Для случаев, когда дисперсные частицы подходят к поверхности тела или оси симметрии с ненулевой нормальной скоростью, то неучет столкновений частиц может привести к аномальному росту концентрации частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были получены уравнения сохранения многофазной среды, а также расчетные соотношения для определения сил межфазного взаимодействия во всем объеме, занимаемом смесью, позволяющие построить математическую модель межфазного взаимодействия в гетерогенной смеси. Целью дальнейших исследований является создание дисперсного защитного экрана для предотвращения негативного воздействия на объекты РКК рассматриваемых опасных факторов. Учитывая требования к математической модели и особенности рассматриваемого явления, целесообразно методики численного моделирования строить на основе модели механики сплошных сред.

Взаимодействие твердой и газообразной фаз основано на учете аэродинамической, гравитационной силы и силы присоединенных масс. В математической модели учтено температурное влияние газовой фазы на эффект перемещения твердых частиц наполнителя.

Благодаря данной модели можно создать программный комплекс, позволяющий проводить расчет процесса создания и динамики развития дисперсного защитного экрана для предотвращения негативного воздействия на площадные объекты в районах дислокации ракетно-космических комплексов.

Список используемых источников

1. Экспериментальные исследования процессов образования и функционирования защитных экранов / Лагун А.В., Козлов В.В., Кукушкин И.О. и др. // Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» / под общ. ред. Ю.В. Кулешова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018.

2. *Лагун А.В., Козлов В.В.* Алгоритм создания защищенных космических ракетных комплексов // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации»: в 2 т. / под общ. ред. М.М. Пенькова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т. 2. – С. 206–211.

3. *Козлов В.В., Лагун А.В.* Концептуальные положения создания защищенных космических ракетных комплексов: сборник статей для депонирования. – М.: ЦВНИ МО РФ, 2010. – Вып. №1(106).

4. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. – М.: Наука. – Ч. 1. – 1987.

5. *Садин Д.В.* Основы теории моделирования волновых гетерогенных процессов: монография. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2000.

6. Методика обоснования генераторов заградительных дисперсных образований от воздействия факторов различной физической природы / А.В. Лагун, Д.В. Садин, В.А. Давидчук и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского / под общ. ред. Ю.В. Кулешова. – 2020 – Вып. 671.

7. *Садин Д.В.* Поведение нестационарной струи при истечении смеси газа высокого давления и дисперсной среды из цилиндрического канала в атмосферу // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40, № 1.

В.Н. Арсеньев,
доктор техн. наук, профессор;
А.Б. Петухов;
И.А. Трофимов,
кандидат техн. наук

КОРРЕКЦИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ГИПОТЕЗ О ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЯХ ИЗДЕЛИЯ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассматривается задача коррекции оценок изменяющихся в процессе эксплуатации вероятностей технических состояний изделия военной техники. Используется идея приоритета оперативных данных наблюдений за изделием над полученными на предыдущих этапах оценками вероятностей технических состояний. Вводятся коэффициенты значимости априорных и опытных данных при формировании апостериорных оценок вероятностей. Показано, что в отличие от байесовского подхода предлагаемый метод не позволяет априорной информации доминировать над представительными опытными данными и, как следствие, снижает риск принятия ошибочного решения.

Полученные результаты целесообразно использовать при разработке и реализации риск-ориентированного управления процессом эксплуатации изделий военной техники; планировании необходимых объемов запасных частей, инструментов и принадлежностей; определении и корректировке сроков проведения технического обслуживания изделия.

Ключевые слова: изделие военной техники, техническое состояние, весовые коэффициенты, приоритет опытных данных, апостериорные оценки.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации изделия военной техники (ИВТ) подвергаются воздействию большого числа различных внешних и внутренних факторов, в результате чего могут происходить изменения их технических состояний. Под *техническим состоянием* понимается совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации изделия свойств, характеризуемая в определенный момент времени степенью соответствия фактических показателей установленным в нормативно-технических документах [1]. Так, изделие может быть исправным или неисправным, работоспособным или неработоспособным, правильно функционирующим или неправильно функционирующим и т. д. [2].

Множество технических состояний образует полную группу несовместных событий. Знание вероятностей перехода изделия военной техники в то или иное техническое состояние в процессе эксплуатации позволяет оценить степень его функциональной пригодности к целевому применению, осуществлять риск-ориентированное управление процессом эксплуатации, планировать на различных этапах эксплуатации необходимые объемы запасных частей, инструментов и принадлежностей, корректировать сроки проведения технического обслуживания и т. д.

На практике, как правило, имеется некоторая априорная информация о вероятностях нахождения изделия в различных технических состояниях [3–5]. Однако, как уже было отмечено выше, в процессе эксплуатации эти вероятности могут изменяться. Наблюдение за изделием в течение некоторого периода времени позволяет получить дополнительную (опытную) информацию об изменении его состояний. Возникает задача коррекции априорных оценок вероятностей состояний изделий военной техники по опытным данным [3–9]. В настоящее время наиболее часто для ее решения используется теорема гипотез (формула Байеса) [3]. В работе [2] рассмотрены основные подходы к определению вероятностей технических состояний применительно к задаче диагностирования ИВТ. Главным их недостатком

ком, как и в целом байесовского подхода, является отсутствие в процедуре принятия решения о вероятностях технических состояний ИВТ проверки однородности имеющихся априорных и полученных в процессе эксплуатации опытных данных. Для уменьшения неопределенности получаемых апостериорных оценок предлагается использовать метод приоритета опытной информации (ПОИ) [9].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОЛУЧЕНИЯ АПОСТЕРИОРНЫХ ОЦЕНОК ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Рассматривается некоторое изделие военной техники. Полагается, что оно может находиться в одном из m технических состояний с неизвестной вероятностью p_i , $i = \overline{1, m}$, причем $\sum_{i=1}^m p_i = 1$. Имеется априорная информация о состояниях изделия, представленная априорными оценками p_{pi} соответствующих вероятностей p_i , $\sum_{i=1}^m p_{pi} = 1$.

Наблюдения за состояниями изделия в процессе эксплуатации в течение некоторого промежутка времени показали, что оно находилось в i -м техническом состоянии x_i раз, $i = \overline{1, m}$. Полагается, что $N_o \gg m$, где

$$N_o = \sum_{i=1}^m x_i.$$

Необходимо получить апостериорные оценки вероятностей состояний изделия, учитывающие априорную информацию и результаты наблюдений.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЫТНЫХ ОЦЕНОК ВЕРОЯТНОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ИВТ

При использовании метода приоритета опытной информации сначала на основе результатов наблюдений определяются оценки максимального правдоподобия p_{oi} вероятностей p_i , $i = \overline{1, m}$. Поскольку в соответствии с условием задачи числа x_i , $i = \overline{1, m}$, подчинены полиномиальному закону распределения, то вероятность того, что изделие будет находиться в 1-м состоянии x_1 раз, во 2-м – x_2 раз и т. д., а в m -м состоянии – x_m раз, определяется по формуле [10]

$$P(x_1, x_2, \dots, x_m; p_1, p_2, \dots, p_m) = C_o p_1^{x_1} p_2^{x_2} \dots p_m^{x_m}, \quad (1)$$

где $C_o = \frac{N_o!}{x_1! x_2! \dots x_m!}$.

Тогда оценки максимального правдоподобия p_{oi} , $i = \overline{1, m}$, должны удовлетворять условию $\sum_{i=1}^m p_{oi} = 1$ и обеспечивать максимум функции (1), т. е.

$$\begin{aligned} \{p_{oi}, i = \overline{1, m}\} &= \arg \max_{\sum_{i=1}^m p_i = 1} P(x_1, x_2, \dots, x_m; p_1, p_2, \dots, p_m) = \\ &= \arg \max_{\sum_{i=1}^m p_i = 1} (p_1^{x_1} p_2^{x_2} \dots p_m^{x_m}) = \arg \max_{\sum_{i=1}^m p_i = 1} \ln(p_1^{x_1} p_2^{x_2} \dots p_m^{x_m}) = \arg \max_{\sum_{i=1}^m p_i = 1} \sum_{i=1}^m x_i \ln p_i. \end{aligned}$$

Для решения данной задачи составляется функция Лагранжа

$$J_o = \sum_{i=1}^m x_i \ln p_i + \lambda \left(\sum_{i=1}^m p_i - 1 \right), \quad (2)$$

где λ – неопределенный множитель.

В указанном случае можно использовать необходимые условия максимума функции (2):

$$\left. \frac{\partial J_o}{\partial p_i} \right|_{p_i=p_{oi}} = 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad \left. \frac{\partial J_o}{\partial \lambda} \right|_{p_i=p_{oi}} = 0.$$

Первое условие дает систему линейных алгебраических уравнений

$$\frac{x_i}{p_{oi}} + \lambda = 0, \quad i = \overline{1, m},$$

из которой получаются оценки

$$p_{oi} = -\frac{x_i}{\lambda}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Из второго условия следует уравнение $\sum_{i=1}^m p_{oi} = 1$, подстановка в которое оценок (3) позво-

ляет найти величину $\lambda = -\sum_{i=1}^m x_i = -N_o$. Тогда формулы (3) для определения опытных оценок вероятностей технических состояний ИВТ принимают вид

$$p_{oi} = \frac{x_i}{N_o}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Вторым шагом метода приоритета опытной информации является получение апостериорных оценок вероятностей состояний изделия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АПОСТЕРИОРНЫХ ОЦЕНОК ВЕРОЯТНОСТЕЙ СОСТОЯНИЙ ИЗДЕЛИЯ

С учетом выражений (4) формулу (1) можно представить следующим образом:

$$P_o(p_{o1}, p_{o2}, \dots, p_{om}; p_1, p_2, \dots, p_m) = C_o p_1^{N_o p_{o1}} p_2^{N_o p_{o2}} \dots p_m^{N_o p_{om}}. \quad (5)$$

Отношение правдоподобия, характеризующее близость априорных оценок p_{pi} , вероятностей состояний изделия к соответствующим опытным оценкам p_{oi} , $i = \overline{1, m}$, определяется по формуле

$$\begin{aligned} v^* &= \frac{P(x_1, x_2, \dots, x_m; p_{p1}, p_{p2}, \dots, p_{pm})}{P(x_1, x_2, \dots, x_m; p_{o1}, p_{o2}, \dots, p_{om})} = \frac{P_o(p_{o1}, p_{o2}, \dots, p_{om}; p_{p1}, p_{p2}, \dots, p_{pm})}{P_o(p_{o1}, p_{o2}, \dots, p_{om}; p_{o1}, p_{o2}, \dots, p_{om})} = \\ &= \frac{p_{p1}^{N_o p_{o1}} p_{p2}^{N_o p_{o2}} \dots p_{pm}^{N_o p_{om}}}{p_{o1}^{N_o p_{o1}} p_{o2}^{N_o p_{o2}} \dots p_{om}^{N_o p_{om}}} = \left[\prod_{i=1}^m \left(\frac{p_{pi}}{p_{oi}} \right)^{p_{oi}} \right]^{N_o}. \end{aligned} \quad (6)$$

Следует отметить, что в процессе эксплуатации изделия в течение ограниченного промежутка времени оно может находиться не во всех m состояниях, а лишь в части из них. Пусть, например, ИВТ не было в i -м состоянии. В этом случае $x_i = 0$ и соответствующая опытная оценка вероятности i -го состояния $p_{oi} = 0$. Тогда при вычислении отношения правдоподобия по формуле (6) в i -м сомножителе возникает неопределенность «бесконечность в нулевой степени». Но поскольку

$$\lim_{p_{oi} \rightarrow 0} \left(\frac{p_{pi}}{p_{oi}} \right)^{p_{oi}} = \lim_{p_{oi} \rightarrow 0} \left(\frac{1}{p_{oi}} \right)^{p_{oi}} = \lim_{p_{oi} \rightarrow 0} e^{-p_{oi} \ln p_{oi}} = e^{-\lim_{p_{oi} \rightarrow 0} \left(\frac{\ln p_{oi}}{1/p_{oi}} \right)} = e^{-\lim_{p_{oi} \rightarrow 0} \left(\frac{1/p_{oi}}{-1/p_{oi}^2} \right)} = e^{\lim_{p_{oi} \rightarrow 0} p_{oi}} = 1,$$

то формула (6) позволяет оценить близость априорной информации к опытным данным и в этих случаях.

В соответствии с методом ПОИ для априорных вероятностей $p_{pi}, i = \overline{1, m}$, вводится функция, аналогичная функции (5),

$$P_p(p_{p1}, p_{p2}, \dots, p_{pm}; p_1, p_2, \dots, p_m) = C_p p_1^{N_p p_{p1}} p_2^{N_p p_{p2}} \dots p_m^{N_p p_{pm}}, \quad (7)$$

где $C_p = \text{const}$; $N_p = v^* N_o$.

Апостериорные оценки $p_{ai}, i = \overline{1, m}$, вероятностей технических состояний ИВТ определяются из условия максимума произведения функций (5) и (7) и в сумме должны быть равны единице, т. е.

$$\{p_{ai}, i = \overline{1, m}\} = \arg \max_{\sum_{i=1}^m p_i = 1} \left[P_o(p_{o1}, p_{o2}, \dots, p_{om}; p_1, p_2, \dots, p_m) P_p(p_{p1}, p_{p2}, \dots, p_{pm}; p_1, p_2, \dots, p_m) \right]$$

или

$$\begin{aligned} \{p_{ai}, i = \overline{1, m}\} &= \arg \max_{\sum_{i=1}^m p_i = 1} \left(C_o C_p p_1^{N_o p_{o1} + N_p p_{p1}} p_2^{N_o p_{o2} + N_p p_{p2}} \dots p_m^{N_o p_{om} + N_p p_{pm}} \right) = \\ &= \arg \max_{\sum_{i=1}^m p_i = 1} \ln \left(p_1^{N_o p_{o1} + N_p p_{p1}} p_2^{N_o p_{o2} + N_p p_{p2}} \dots p_m^{N_o p_{om} + N_p p_{pm}} \right). \end{aligned}$$

Решение этой задачи также можно получить методом неопределенных множителей Лагранжа. Функция Лагранжа в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned} J_a &= \ln \left(p_1^{N_o p_{o1} + N_p p_{p1}} p_2^{N_o p_{o2} + N_p p_{p2}} \dots p_m^{N_o p_{om} + N_p p_{pm}} \right) + \lambda \left(\sum_{i=1}^m p_i - 1 \right) = \\ &= \sum_{i=1}^m (N_o p_{oi} + N_p p_{pi}) \ln p_i + \lambda \left(\sum_{i=1}^m p_i - 1 \right) = \sum_{i=1}^m N_o (p_{oi} + v^* p_{pi}) \ln p_i + \lambda \left(\sum_{i=1}^m p_i - 1 \right), \end{aligned}$$

где λ – как и ранее, неопределенный множитель.

Используя необходимые условия максимума функции J_a , можно получить выражения для апостериорных оценок вероятностей технических состояний ИВТ:

$$p_{ai} = \frac{p_{oi} + v^* p_{pi}}{1 + v^*}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (8)$$

Апостериорные оценки определяются как линейные комбинации априорных и опытных оценок вероятностей, причем весовые коэффициенты зависят от близости априорных и опытных данных, которая характеризуется величиной отношения правдоподобия $0 \leq v^* \leq 1$. Чем больше отличается априорная информация от опытных данных, тем меньше ее вес в апостериорных оценках. Если в качестве показателей точности оценок использовать их дисперсии, то можно продемонстрировать, что дисперсии апостериорных оценок меньше дисперсий опытных оценок. Общий подход к сравнению оценок приведен в работе [11].

Из формулы (8) также следует, что если за период наблюдения T изделие не переходило в i -е состояние и опытная оценка вероятности $p_{oi} = 0$, то соответствующая апостериорная оценка не обнуляется, как при использовании метода Байеса (см. ниже), а уменьшается и принимает значение $p_{ai} = \frac{v^* p_{pi}}{1 + v^*}$. Если, наоборот, $x_i = N_o$ и, соответственно, $p_{oi} = 1$, то оцен-

ка вероятности i -го состояния $p_{ai} = \frac{1+v^* p_{pi}}{1+v^*}$ возрастает, а апостериорные оценки вероятностей остальных состояний ИВТ $p_{aj} = \frac{v^* p_{pj}}{1+v^*}$, $j = \overline{1, m}$, $j \neq i$, уменьшаются. Это позволяет корректировать полученные апостериорные оценки вероятностей состояний системы [в соответствии с формулой (8)] по мере поступления новых опытных данных на последующих этапах эксплуатации изделия.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПРИОРИТЕТА ОПЫТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается изделие военной техники. Известно, что в процессе эксплуатации оно может находиться в одном из трех технических состояний ($m = 3$). Расчетные оценки вероятностей этих состояний $p_{p1} = 0.10$, $p_{p2} = 0.37$ и $p_{p3} = 0.53$. При эксплуатации изделия в течение времени T было проведено 11 наблюдений ($N_o = 11$), которые показали, что в 1-м состоянии оно находилось 0 раз ($x_1 = 0$), во 2-м состоянии – 6 раз ($x_2 = 6$), а в 3-м – 5 раз ($x_3 = 5$). Необходимо оценить вероятности технических состояний изделия с учетом априорных и опытных данных.

Для решения задачи сначала по формуле (4) определяются опытные оценки вероятностей состояний изделия: $p_{o1} = 0$, $p_{o2} = 0.55$, $p_{o3} = 0.45$. Можно заметить, что они слабо согласуются с соответствующими расчетными оценками. Действительно, отношение правдоподобия, характеризующее близость априорной информации к опытным данным, $v^* = 0.21$, а соответствующие весовые коэффициенты в формуле (8) – $\frac{1}{1+v^*} \approx 0.83$, $\frac{v^*}{1+v^*} \approx 0.17$. Отсюда следует, что вследствие существенного отличия априорных оценок от опытных, полученных по результатам 11 наблюдений, последние должны иметь приоритет в апостериорных оценках вероятностей технических состояний изделия. Апостериорные оценки, полученные методом ПОИ по формуле (8), имеют вид: $p_{a1} = 0.02$, $p_{a2} = 0.51$, $p_{a3} = 0.47$.

Для сравнения приведем апостериорные оценки вероятностей состояний $p_{Б1} = 0$, $p_{Б2} = 0.46$, $p_{Б3} = 0.54$, полученные по формуле Байеса [3],

$$p_{Bi} = \frac{p_{pi} p_{oi}}{\sum_{i=1}^3 p_{pi} p_{oi}}, \quad i = \overline{1, 3}. \quad (9)$$

Здесь, как видим, принятие решения о вероятностях состояний изделия осуществляется без использования какой-либо меры отличия априорной информации от опытных данных. Решение принимается по величинам произведений оценок $p_{pi} p_{oi}$, $i = \overline{1, m}$, и априорная информация доминирует над фактической опытной информацией.

В процессе эксплуатации изделия вероятности технических состояний могут изменяться. Тогда по мере поступления новых данных наблюдений процедура коррекции оценок может быть реализована в соответствии с описанным выше методом, если в качестве априорных оценок использовать апостериорные оценки, полученные на предыдущем этапе.

Пусть по результатам достаточно большого числа $N_o = 28$ наблюдений за изделием на очередном этапе эксплуатации получена следующая опытная информация о его технических

состояниях: в 1-м состоянии изделие находилось 2 раза ($x_1 = 2$), во 2-м состоянии – 14 раз ($x_2 = 14$), в 3-м – 12 раз ($x_3 = 12$). Соответствующие опытные оценки $p_{o1} = 0.07$, $p_{o2} = 0.50$, $p_{o3} = 0.43$.

Возьмем сначала в качестве априорных оценок апостериорные оценки вероятностей состояний, полученные на предыдущем этапе методом ПОИ:

$$p_{p1} = p_{a1} = 0.02, \quad p_{p2} = p_{a2} = 0.51, \quad p_{p3} = p_{a3} = 0.47.$$

В этом случае отношение правдоподобия, характеризующее близость опытных оценок, полученных на рассматриваемом этапе эксплуатации изделия, к апостериорным оценкам вероятностей, полученным на предыдущем этапе, $v^* = 0.25$.

Апостериорные оценки вероятностей технических состояний изделия, учитывающие информацию за весь период эксплуатации изделия, в соответствии с формулой (8) имеют вид:

$$p_{a1} = 0.06, \quad p_{a2} = 0.50, \quad p_{a3} = 0.44.$$

Если теперь в качестве априорных оценок использовать байесовские апостериорные оценки, полученные на предыдущем этапе, т. е. $p_{p1} = p_{b1} = 0$, $p_{p2} = p_{b2} = 0.46$, $p_{p3} = p_{b3} = 0.54$, то в соответствии с формулой (9) будем иметь:

$$p_{b1} = 0, \quad p_{b2} = 0.49, \quad p_{b3} = 0.51.$$

Можно заметить, что в этих оценках игнорируется опытная информация о том, что изделие 2 раза находилось в 1-м техническом состоянии, и априорная информация фактически доминирует над достаточно представительными опытными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода приоритета опытной информации позволяет корректировать оценки вероятностей технических состояний ИВТ в процессе эксплуатации. При этом поступающие в достаточном объеме новые данные о состояниях изделия имеют приоритет над полученными на предыдущих этапах оценками вероятностей технических состояний. Коэффициенты, определяющие веса этих оценок, тем больше, чем они ближе к последним опытным данным.

В отличие от байесовского подхода метод ПОИ не позволяет априорной информации доминировать над представительными опытными данными и, как следствие, снижает риск принятия ошибочного решения. Его применение может оказаться полезным при разработке и реализации риск-ориентированного управления процессом эксплуатации изделий военной техники, при планировании необходимых объемов запасных частей, инструментов и принадлежностей, при определении и корректировке сроков проведения технического обслуживания и решении ряда других задач.

Список используемых источников

1. Справочник по эксплуатации космических средств / А.П. Поляков и др.; под ред. А.П. Полякова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. – 758 с.
2. Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика: учебник для вузов. – МО СССР, 1987. – 521 с.
3. Венцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для студ. вузов. – 9-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.
4. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Физматлит. 2002. – 496 с.

5. Пат. России №2015553. Статистический анализатор / Арсеньев В.Н. – Оpubл. 1994, Бюл. №12.
6. *Тулупьев А.Л.* Апостериорные оценки вероятностей в алгебраических байесовских сетях // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2012. – № 2. – С. 51–59.
7. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases / Daniel Kahneman et al. 21st. – Cambridge University Press, 2005. – 555 p.
8. 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.
9. *Арсеньев В. Н.* Оценивание характеристик систем управления по ограниченному числу натурных испытаний. – М.: Рестарт, 2013. – 126 с.
10. Справочник по вероятностным расчетам / Г.Г. Абезгауз, А.П. Тронь, Ю.Н. Копенкин, И.А. Коровина. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.
11. *Арсеньев В. Н.* Метод определения закона распределения оценок показателей качества системы // Известия вузов. Приборостроение. – 1991. – Т.34, № 12. – С. 10–15.

М.Ю. Булекбаева;
А.М. Денисов,
кандидат техн. наук, доцент;
М.В. Житный,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧКИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СИЛЫ

Предложена методика определения координат точки разгерметизации космического аппарата относительно связанной системы координат. Методика предназначена для анализа нештатных ситуаций, приводящих к изменению кинематических параметров движения космического аппарата, и определения точки приложения возмущающей реактивной силы, вызвавшей данное изменение.

Ключевые слова: разгерметизация, координаты точек, космический аппарат, возмущающая сила.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин нарушения штатного процесса функционирования космического аппарата (КА) является разгерметизация трубопроводов системы приборных отсеков, шар-баллонов и других элементов КА, вызванная как внешним воздействием малоразмерных твердых частиц естественного или искусственного происхождения, так и наличием производственного брака. Нахождение параметров разгерметизации элементов КА (координаты условных точек разгерметизации, расходы и направления истечения жидкостей и газов) является актуальной научно-практической задачей, имеющей большое значение для поиска причин нарушения нормального функционирования КА.

Один из признаков, позволяющих идентифицировать факт и характеристики разгерметизации, – это нештатное изменение как параметров движения центра масс КА, так и параметров его углового движения, что обусловлено возникновением возмущающей реактивной силы. В данной работе рассматривается методический подход к решению задачи нахождения координат точки разгерметизации в связанной системе координат (ССК).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА МЕТОДИКИ

При решении задачи определения координат точки разгерметизации КА используются следующие исходные данные:

- начальная масса КА (m_H);
- продолжительность процесса истечения газа (жидкости) из поврежденного элемента;
- объем и плотность истекшего газа (жидкости);
- осевые моменты инерции КА ($I_{x_1}, I_{y_1}, I_{z_1}$);
- координаты ($X_{АГЭСК}, Y_{АГЭСК}, Z_{АГЭСК}$) и вектор скорости центра масс КА $\vec{V}_{АГЭСК}$ в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК), определяемые бортовой навигационной аппаратурой потребителя (НАП) или средствами внешнетраекторных измерений;
- проекции вектора момента силы на оси связанной системы координат ($M_{x_1}, M_{y_1}, M_{z_1}$).

При решении задачи принимаются следующие ограничения и допущения:

– область разгерметизации имеет пренебрежимо малые размеры относительно размеров КА и может быть представлена точкой на его внешней поверхности, к которой приложена равнодействующая возмущающих сил, возникающих при истечении жидкости или газа из поврежденного элемента;

– известен закон, описывающий форму внешней поверхности КА в ССК (в данной статье приведен пример расчета для цилиндрической формы корпуса КА).

В общем упрощенном виде порядок решения указанной задачи представлен на рис. 1, в виде структурно-логической схемы.

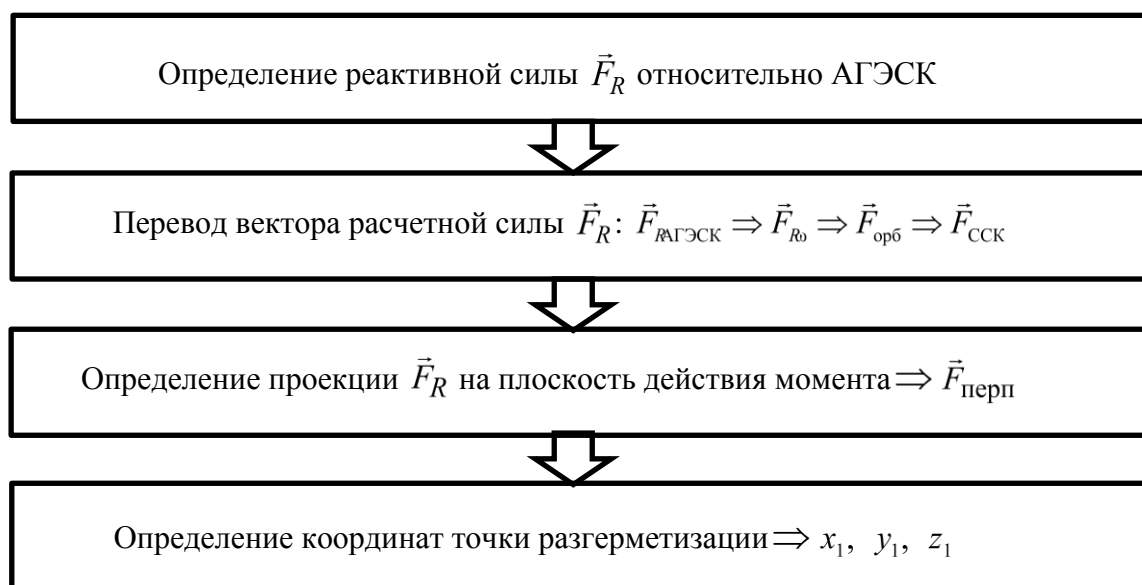


Рис. 1. Структурно-логическая схема методики

Далее в работе представлено подробное описание реализации приведенной структурно-логической схемы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ СИЛЫ

Силу, вызывающую изменение кинематических параметров КА, можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_{перп} + \vec{F}_{пар},$$

где $\vec{F}_{перп}$ – составляющая силы, перпендикулярная радиусу-вектору, определяющему положение точки разгерметизации в ССК;

$\vec{F}_{пар}$ – составляющая силы, направленная по радиусу-вектору точки разгерметизации.

Сила $\vec{F}_{перп}$ определяет возмущающий момент \vec{M} :

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}_{перп}.$$

Для определения силы \vec{F}_R , под действием которой КА изменил кинематические параметры, необходимо рассмотреть импульс КА в начале возникновения нештатной ситуации и через расчетное время:

$$\vec{p}_н = m_n \cdot \vec{V}_н;$$

$$\vec{p}_k = m_k \cdot \vec{V}_k,$$

где \vec{p}_n – начальный импульс (в момент возникновения нештатной ситуации) в АГЭСК;
 \vec{p}_k – конечный импульс;
 m_n – начальная масса КА;
 m_k – конечная масса КА;
 \vec{V}_n – начальная скорость центра масс в АГЭСК;
 \vec{V}_k – конечная скорость центра масс в АГЭСК.

Изменение импульса

$$\vec{p}_k = \vec{p}_n - \Delta\vec{p}_{жк} + \vec{F}_{внеш} \cdot (t_k - t_n),$$

где $\Delta\vec{p}_{жк}$ – импульс жидкости (газа);
 $\vec{F}_{внеш}$ – главный вектор внешних сил, действующих на КА.

Главный вектор равен сумме всех внешних сил, действующих на КА:

$$\vec{F}_{внеш} = \vec{F}_{прЗ} + \vec{F}_{прС} + \vec{F}_{прЛ} + \dots,$$

где $\vec{F}_{прЗ}$; $\vec{F}_{прС}$; $\vec{F}_{прЛ}$ – силы притяжения Земли, Солнца и Луны, которые определяются через координаты КА в АГЭСК.

Усредненная по времени скорость истечения жидкости (газа) составит

$$\langle \vec{V}_{абс ист} \rangle = \frac{\Delta\vec{p}_{жк}}{m_n - m_k}.$$

Относительная скорость истечения газов вычисляется по формуле

$$\vec{V}_{отн} = \vec{V}_{абс ист} - \vec{V}_n.$$

Реактивная сила определяется следующим выражением:

$$\vec{F}_R = \frac{m_n - m_k}{t_n - t_k} \vec{V}_{отн}.$$

Как упоминалось ранее, начальная (в момент возникновения нештатной ситуации) и конечная (через некоторый промежуток времени $\Delta t = t_k - t_n$) скорость центра масс может определяться бортовой НАП или средствами внешнетраекторных измерений:

$$\begin{aligned} &V_{n.xAGЭСК}, V_{n.yAGЭСК}, V_{n.zAGЭСК}; \\ &V_{k.xAGЭСК}, V_{k.yAGЭСК}, V_{k.zAGЭСК}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что уменьшение значения временного интервала Δt , используемого при проведении расчетов, приводит к повышению точности вычисления значения силы, действующей на КА. Частота регистрации скорости КА бортовой НАП и необходимой для расчета потери массы телеметрической информации (давление и температура среды) в большинстве случаев соответствует условиям решения этой задачи.

Из анализа телеметрической информации определяется разность возмущающего и управляющего моментов и находится расчетный момент в виде соответствующих проекций на связанную систему координат M_{x_1} , M_{y_1} , M_{z_1} .

Перевод вектора расчетной силы в ССК выполняется в три этапа.

1. Перевод вектора расчетной силы из АГЭСК в неподвижную орбитальную систему координат.

Схема перевода расчетной силы представлена на рис. 2. Переход осуществляется на основе выражений, приведенных в [1]. В результате перехода определяются проекции искомой силы на оси орбитальной неподвижной системы координат $(F_{x_\omega}, F_{y_\omega}, F_{z_\omega})$.

2. Перевод вектора расчетной силы из неподвижной орбитальной системы координат в подвижную орбитальную систему координат, который осуществляется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} F_{\text{орб}x} \\ F_{\text{орб}y} \\ F_{\text{орб}z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin u & \cos u & 0 \\ \cos u & \sin u & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{x_\omega} \\ F_{y_\omega} \\ F_{z_\omega} \end{bmatrix},$$

где $F_{\text{орб}x}, F_{\text{орб}y}, F_{\text{орб}z}$ – проекции искомой силы на оси подвижной орбитальной системы координат;

u – аргумент широты КА.

Аргумент широты u определяется в соответствии с системой уравнений (2.2.51) из работы [2]. Схематическое изображение второго перехода представлено на рис. 3.

3. Перевод вектора силы из подвижной орбитальной системы координат в ССК. Он выполняется в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} F_{R_{x_1}} \\ F_{R_{y_1}} \\ F_{R_{z_1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{\text{орб}x} \\ F_{\text{орб}y} \\ F_{\text{орб}z} \end{bmatrix},$$

где $F_{R_{x_1}}, F_{R_{y_1}}, F_{R_{z_1}}$ – проекции силы на оси связанной системы координат.

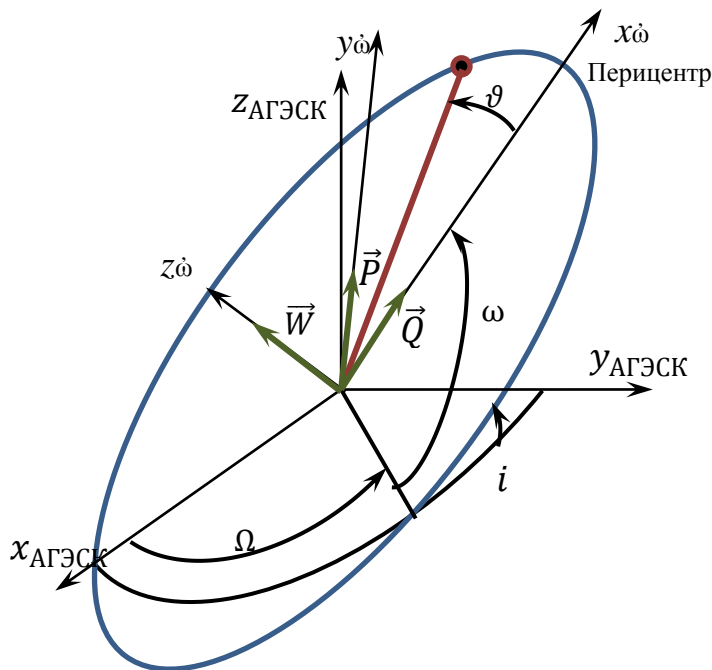


Рис. 2. Схема перевода вектора расчетной силы из АГЭСК в неподвижную орбитальную систему координат

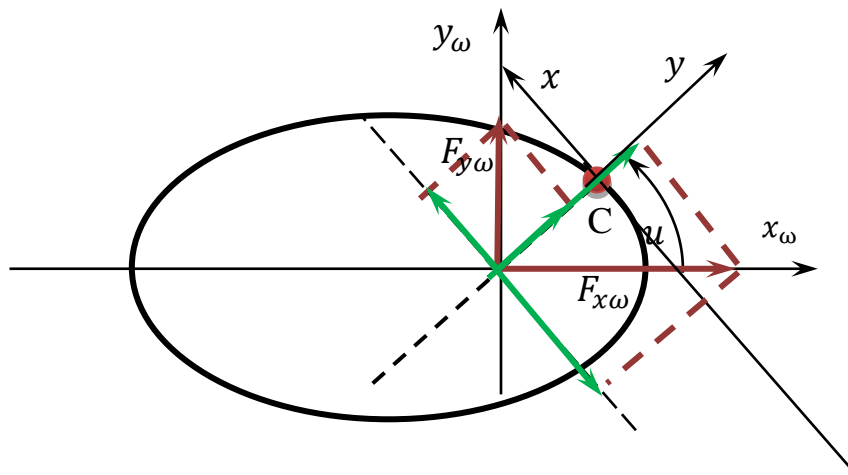


Рис. 3. Схема перевода вектора расчетной силы из неподвижной орбитальной системы координат в подвижную орбитальную систему координат

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧКИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ

Для определения $\vec{F}_{\text{перп}}$ необходимо \vec{F}_R спроецировать на плоскость действия момента, для чего составляется уравнение прямой –

$$\frac{F_{\text{перп}x_1} - F_{Rx_1}}{M_{x_1}} = \frac{F_{\text{перп}y_1} - F_{Ry_1}}{M_{y_1}} = \frac{F_{\text{перп}z_1} - F_{Rz_1}}{M_{z_1}} \quad (1)$$

и уравнение плоскости с вектором нормали $M_{x_1}, M_{y_1}, M_{z_1}$, проходящей через начало координат –

$$M_{x_1} \cdot F_{\text{перп}x_1} + M_{y_1} \cdot F_{\text{перп}y_1} + M_{z_1} \cdot F_{\text{перп}z_1} = 0. \quad (2)$$

Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет определить окончательную расчетную силу $\vec{F}_{\text{перп}}$.

Для определения координат точки разгерметизации используется уравнение моментов, выраженных через проекции силы и координаты ее точки приложения [3]:

$$\begin{cases} M_{x_1} = y_1 \cdot F_{\text{перп}z_1} - z_1 \cdot F_{\text{перп}y_1} \\ M_{y_1} = z_1 \cdot F_{\text{перп}x_1} - x_1 \cdot F_{\text{перп}z_1} \\ M_{z_1} = x_1 \cdot F_{\text{перп}y_1} - y_1 \cdot F_{\text{перп}x_1} \end{cases} \quad (3)$$

Поверхность цилиндрического корпуса КА описывается уравнением

$$z_1^2 + x_1^2 = r^2. \quad (4)$$

Совместное решение уравнений (3) и (4) позволяет определить координаты точки приложения силы (x_R, y_R, z_R) .

В качестве примера использования разработанной методики приведены результаты определения координат точки разгерметизации, находящейся на внешней поверхности КА и обу-

словленной нарушением герметичности корпуса КА вследствие повреждения. Основные исходные данные для моделирования указаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования (параметры движения КА)

№ п/п	Наименование	Значение	Размерность	
1	Координаты КА в начальный момент времени	x	1996689.685302	м
		y	-2010161.049182	
		z	-6707236.084377	
2	Начальная скорость центра масс \vec{V}_H	V_{xH}	4969, 647114	м/с
		V_{yH}	5477.496053	
		V_{zH}	-158.438531	
3	Конечная скорость центра масс \vec{V}_K	V_{xK}	4969, 666646	м/с
		V_{yK}	5477.496053	
		V_{zK}	-158.438538	

Таблица 2

Исходные данные для моделирования (массовые и силовые параметры КА)

№ п/п	Наименование	Значение	Размерность	
1	Масса КА m	5953,545	кг	
2	Плотность жидкости ρ	691.92	кг/м ³	
3	Объем резервуара $V_{рез}$ (объем истекшей во внешнее пространство жидкости)	$25 \cdot 10^{-3}$	м ³	
4	Время истечения Δt	10	сек	
5	Возмущающий момент \vec{M}	M_{x_1}	0.8363	Н·м
		M_{y_1}	-0.1289	
		M_{z_1}	0.3834	

Результаты расчетов значений реактивной силы и координаты точки разгерметизации относительно ССК приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов

№ п/п	Наименование	Значение	Размерность	
1	Координаты точки разгерметизации	x_1	0.748	м
		y_1	0.760	
		z_1	-0.285	
2	Реактивная сила \vec{F}	F_{Rx_1}	13.25	Н
		F_{Ry_1}	0.625	
		F_{Rz_1}	6.924	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика определения координат точек разгерметизации может быть использована в интересах определения причин нарушения нормального функционирования КА. Кроме того, она может быть применена для моделирования различных нештатных ситуаций, связанных с воздействием твердых частиц космического мусора, в целях формирования обоснованных требований к элементам защиты КА.

Список используемых источников

1. Эскобал П. Методы определения орбит. – М.: Мир, 1970. – 472 с.
2. Справочное пособие по небесной механике и астродинамике / под ред. Г.Н. Дубошина. – М.: Наука, 1976. – 864 с.
3. Бутенин Н.В., Луиц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. – СПб.: Лань, 2009. – 736 с.

В.В. Бурмистров,
кандидат техн. наук;
Н.А. Дорофеев;
Ю.А. Кузьмичев,
кандидат техн. наук, доцент;

СПОСОБ АКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗОНАНСНОГО ФИЛЬТРА В КОНТУРЕ СИСТЕМЫ УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Рассмотрены вопросы, связанные с применением методов подавления упругих колебаний элементов конструкции космического аппарата (КА). Предложен способ активного подавления упругих колебаний выносных элементов КА с целью повышения оперативности переориентации в одной плоскости. Проведено математическое моделирование системы угловой стабилизации КА с использованием резонансного фильтра для подавления упругих колебаний конструкции.

Ключевые слова: космический аппарат, крупногабаритная антенна, система угловой стабилизации, резонансный фильтр.

ВВЕДЕНИЕ

Упругие колебания элементов конструкции КА оказывают существенное влияние на качество процесса угловой стабилизации. КА, снабженный упругими элементами конструкции, в качестве которых понимаются панели солнечных батарей, антенны, различные выносные элементы (манипуляторы) и прочее, является системой со слабым внутренним рассеиванием энергии, что приводит к более длительным переходным процессам в системе угловой стабилизации КА. Это приводит к ограничению на время использования специальной аппаратуры. С увеличением габаритов выносных элементов конструкции КА (например, крупногабаритных антенн) актуальной становится задача, связанная с разработкой новых алгоритмов управления угловым движением, повышающих оперативность переориентации КА. В публикации рассматривается один из способов создания управляющих воздействий в системе управления угловым движением КА путем демпфирования упругих колебаний конструкции с использованием резонансных фильтров.

В настоящее время активно ведутся работы по созданию КА с крупногабаритной параболической антенной диаметром около 100 м. Необходимо рассмотреть и выявить достоинства и недостатки основных способов гашения упругих колебаний корпуса и предложить новый способ управления угловым движением КА. Основными способами управления КА с упругими элементами являются: конструктивно-компоновочные решения, повышающие жесткость конструкции КА; разработка алгоритмов управления, которые, управляя угловым движением КА, эффективно подавляют упругие колебания. Существующие способы подавления упругих колебаний применяются при существенном различии значений частоты упругих колебаний с частотой, характеризующей процесс стабилизации КА, принимаемого за абсолютно жесткое тело. С возрастанием габаритов выносных элементов частота первых тонов упругих колебаний становится соизмеримой с частотой колебаний углового движения КА. Следовательно, существующие методы подавления упругих колебаний могут привести к потере устойчивости в системе угловой стабилизации КА в целом.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА

В настоящее время применяется несколько методов подавления упругих колебаний, которые подразделяются на активные и пассивные.

К пассивным методам относится амплитудная стабилизация. Физический смысл метода состоит в том, что система размыкается на частотах упругих колебаний, благодаря чему они не оказывают влияния на работу системы угловой стабилизации и затухают сами по себе вследствие потерь энергии на деформацию корпуса КА. По этой причине данный метод относят к пассивным способам борьбы с упругими колебаниями. Недостатком метода является техническая сложность обеспечения резкого излома амплитудной характеристики системы угловой стабилизации [5]. Поэтому метод не применяется для подавления упругих колебаний I тона (их частоты близки к частотам собственного углового движения КА), но широко применяется для подавления II и более высоких тонов.

Поскольку пассивные методы плохо справляются с подавлением колебаний I тона, данную задачу успешно выполняют активные методы борьбы с упругими колебаниями корпуса КА. Реализация таких методов осуществляется путем введения в контур системы стабилизации фильтров низких частот. Сущностью данных методов является изменение «знака обратной связи» на частотах упругих колебаний. Этим достигаются такие фазовые соотношения в системе, при которых управляющие объекты будут отклоняться в сторону, обеспечивающую подавление упругих колебаний. Таким образом, метод фазовой стабилизации по его сути можно считать активным способом подавления упругих колебаний. Метод широко используется для борьбы с упругими колебаниями I тона и реализуется путем применения в составе преобразующего устройства резонансных фильтров [6].

Помимо вышеизложенных методов существует возможность борьбы с упругими колебаниями корпуса за счет использования в системе угловой стабилизации дополнительных измерительных устройств. Такой метод эффективен, но по сравнению с другими требует больших стоимостных и аппаратных затрат [5, 6].

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПОДАВЛЕНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Для исследования способа подавления упругих колебаний корпуса КА разработана математическая модель одного из каналов системы угловой стабилизации КА. Структурная схема канала тангажа с учетом упругих колебаний представлена на рис. 1.

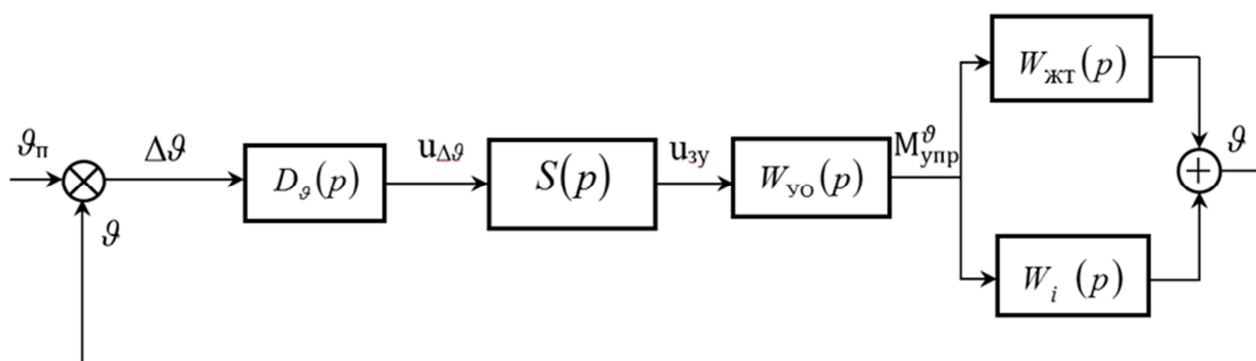


Рис. 1. Структурная схема канала тангажа с учетом упругих колебаний корпуса

На рис. 1 обозначены передаточные функции: $D_{\vartheta}(p)$ – измерительных устройств; $S(p)$ – алгоритма управления; $W_{\text{во}}(p)$ – управляющего органа; $W_{\text{жт}}(p)$ – объекта управления, принимаемого как жесткое тело; $W_i(p)$ – упругих тонов.

В соответствии со структурной схемой канала стабилизации математическая модель реализована с помощью программного комплекса *Matlab: Simulink* (рис. 2). Для формализованного описания упругих колебаний корпуса воспользуемся разложением в бесконечный ряд синусоидальных колебаний, характеризуемых значениями амплитуды и частоты, называемых тонами.

При проведении расчетов принимались следующие значения элементов: $k_{\text{жт}} = 0,5$, $k_{\text{рп}} = 1$, $T = 0,1$ с, $k_{i_1} = -0,3$, $k_{i_2} = 2$, $\xi_1 = 3,75$, $\xi_2 = 5$, $\omega_1^2 = 25$ град/с, $\omega_2^2 = 90$ град/с.

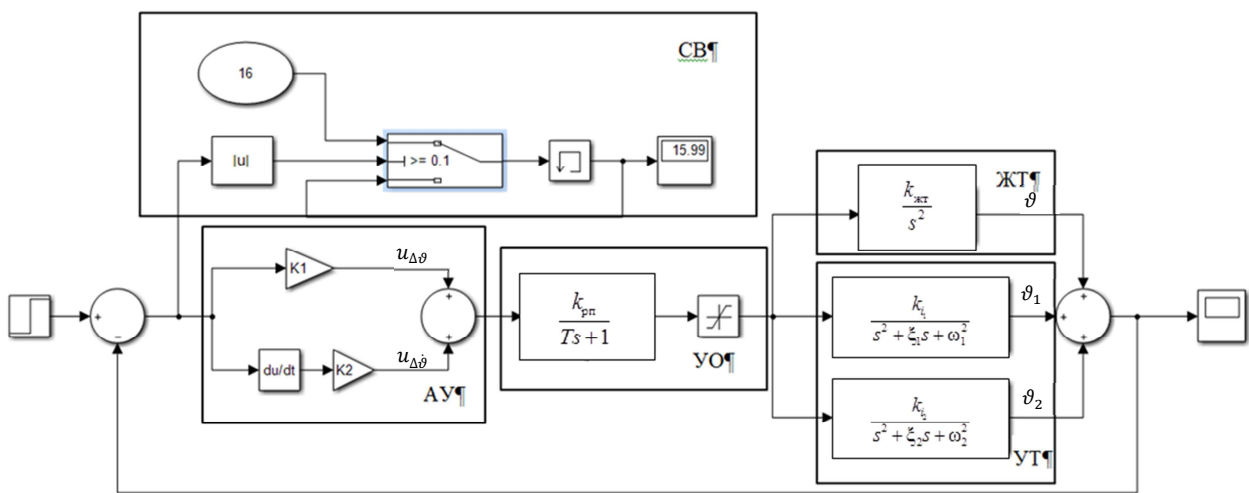


Рис. 2. Структурная схема для исследования системы стабилизации КА с пропорционально-дифференциальным алгоритмом управления

На рис. 2 введены следующие обозначения: АУ – алгоритм управления; СВ – счетчик времени; УО – управляющий орган; ЖТ – объект управления, принимаемый как жесткое тело; УТ – упругие тона, характеризующие колебания корпуса КА.

Объект управления представлен совокупностью жесткого тела с двумя осцилляторами, характеризующими два тона упругих колебаний. Значения частот этих тонов близки к значению частоты соответствующей системы стабилизации КА, принимаемого за абсолютно жесткое тело. Счетчик времени предназначен для определения времени окончания переходного процесса и представляет собой переключающее устройство с функцией памяти и дисплеем. Под алгоритмом управления будем понимать функциональную зависимость управляющих воздействий от регулируемых величин. В данном случае используется алгоритм управления – пропорционально-дифференциальный алгоритм управления. Он реализуется при помощи регулятора с передаточной функцией:

$$W_p(p) = k_1 + k_2 p.$$

На рис. 3 показан переходный процесс при переориентации КА по углу тангажа на 3° . Колебания входят в зону допустимых значений через 6,392 с. Для повышения оперативности решения задачи стабилизации в предложенную модель включен идеальный измеритель параметров колебаний упругого тона (рис. 4), обозначенный на рисунке Изм.К.

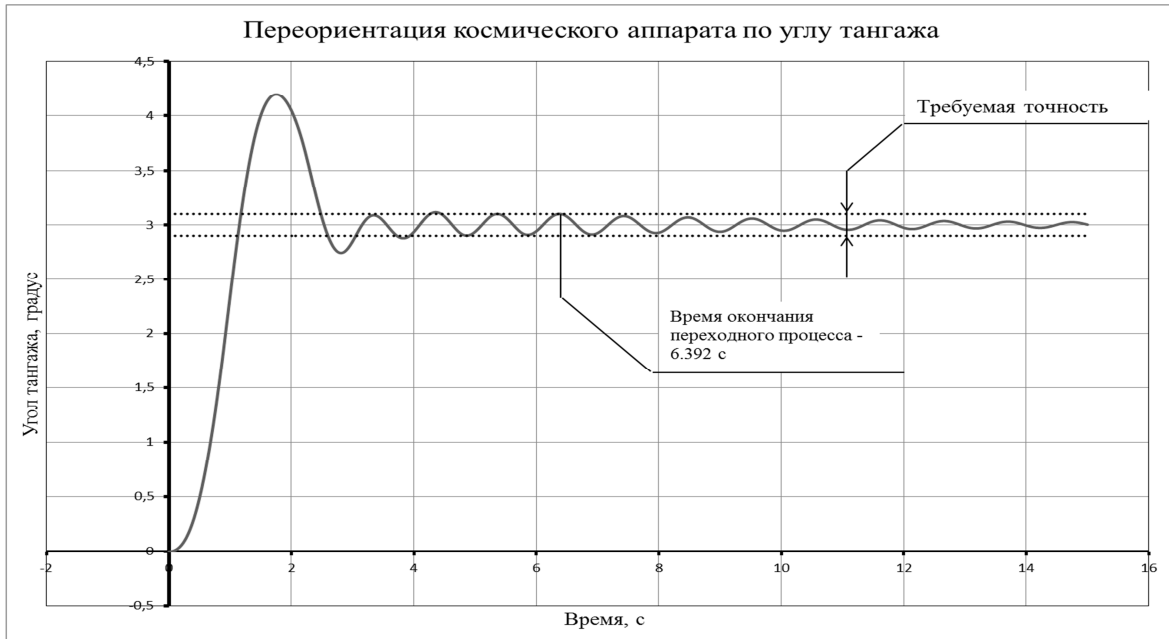


Рис. 3. Переходный процесс в системе стабилизации КА с пропорционально-дифференциальным алгоритмом управления

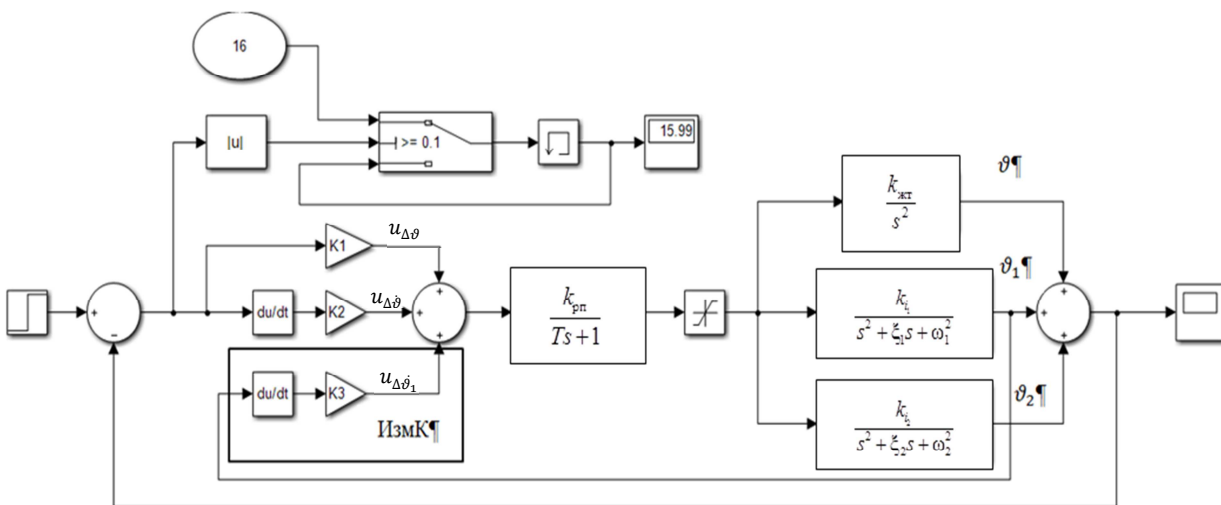


Рис. 4. Структурная схема системы стабилизации КА с идеальным измерителем колебаний упругого тона

С учетом измерителя колебаний заданного упругого тона время, необходимое на переориентацию космического аппарата, сократилось (рис. 5).

Поскольку таких измерителей в данный момент времени физически не существует, их использование возможно только при математическом моделировании, рассмотрим способ получения информации о параметрах упругих колебаний заданного тона с помощью включения в систему резонансного фильтра с параметрами: $k_{рф} = -0,3$, $\omega^2 = 25$ град/с. Такая модель представлена на рис. 6.

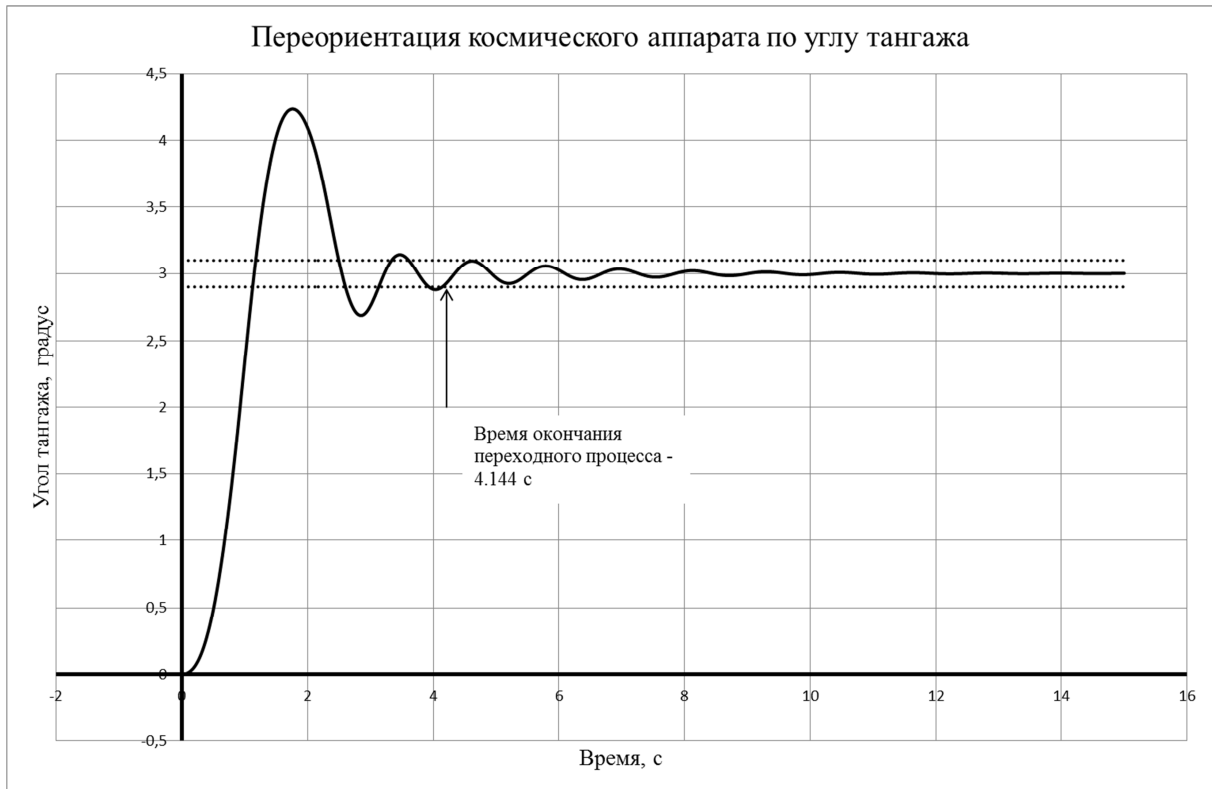


Рис. 5. Переходный процесс в системе стабилизации КА с идеальным измерителем колебаний упругого тона

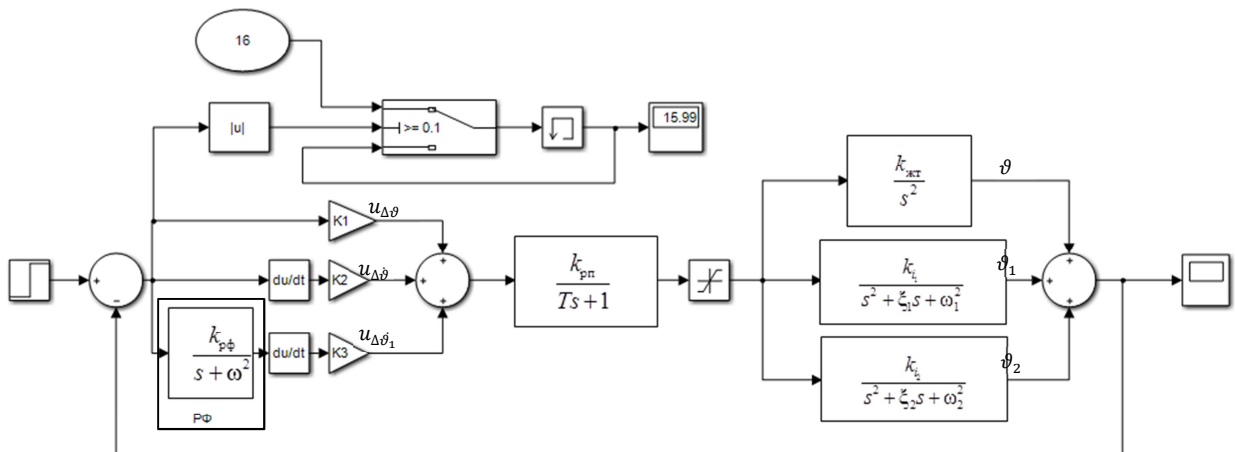


Рис. 6. Структурная схема системы стабилизации КА с низкочастотным резонансным фильтром

Введенное на рис. 6 сокращение РФ обозначает резонансный фильтр.

Резонансный фильтр имеет такое же значение частоты, как и частота выбранного тона. В связи с этим амплитуды сигналов, поступающих с измерительных устройств и несущих информацию об угловом движении КА и упругих колебаниях корпуса, после резонансного фильтра подвергнутся преобразованию. Амплитуда колебаний выбранного тона существенно увеличится, а амплитуды остальных тонов – уменьшатся, т.е. с помощью введенного устройства будет выделена информация о параметрах колебаний заданного тона. Таким образом, резонансный фильтр выполняет роль идеального измерителя параметров колебаний упругого

тона. Необходимым условием его применения является точное знание значения частоты заданного тона.

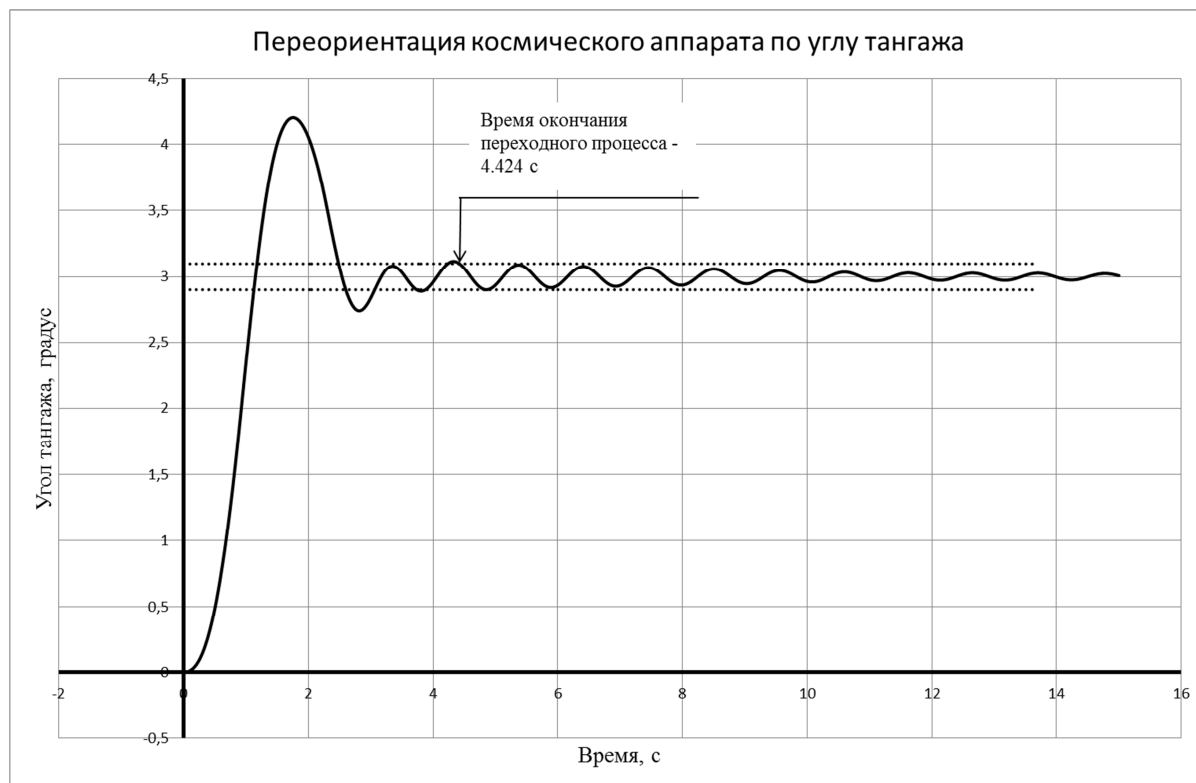


Рис. 7. Переходный процесс в системе стабилизации КА с низкочастотным резонансным фильтром

На рис. 7 представлены результаты расчетов, выполненных при использовании в модели системы угловой стабилизации КА резонансного фильтра, из которых видно: время окончания переходного процесса уменьшается на 2 с при заданных начальных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с увеличением габаритов КА становится актуальной задача разработки новых способов управления угловым положением КА с активным подавлением упругих колебаний корпуса.

Включение резонансного фильтра в контур системы стабилизации КА позволяет получить переходный процесс, близкий к процессу, полученному в результате использования идеального измерителя колебаний.

Рассмотренный способ актуален при построении систем угловой стабилизации КА, для которых использование существующих методов подавления упругих колебаний невозможно в силу близости частот колебаний корпуса и первого тона. В то же время применение резонансного фильтра в системе требует априорных данных о значении частоты подавляемого тона упругих колебаний и разработки алгоритмов автоподстройки частоты.

Необходимо продолжить исследования для получения зависимости погрешности значения частоты колебаний заданного тона на качество функционирования системы угловой стабилизации КА.

Список используемых источников

1. *Кузнецов В.П., Лукьянец С.В., Крупская М.А.* Теория автоматического управления: конспект лекций: учеб.-метод. пособие: в 2 ч. – Минск: БГУИР, 2007. – Ч. 1: Линейные непрерывные системы. – 132 с.
2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.
3. *Савин М.М., Елсуков В.С., Пятинина О.Н.* Теория автоматического управления: учеб. пособие / под ред. В.И. Лачина. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 469 с.
4. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра / М.А. Ватулин, С.Ю. Балугев, Ю.А. Кузьмичев и др. // Известия вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, №12. – С. 43–46.
5. *Латишин Ю.В.* Системы управления ракет-носителей и космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – 158 с.
6. *Аксенов А.В.* Исследование динамики космического аппарата с активным демпфером на основе материала с памятью формы: дисс. ...канд. техн. наук. – Самара.: 2000. – 243 с.

Д.С. Вавилов,
кандидат физико-математических наук;
Е.С. Грошиков;
Е.Л. Лебедев,
доктор техн. наук, профессор;
П.П. Рымкевич,
доктор техн. наук, доцент

МЕТОД НОРМАЛЬНОГО УСРЕДНЕНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ВИБРАЦИОННЫМ ПРОЦЕССАМ

В настоящей работе рассмотрен вопрос о проведении процедуры усреднения, играющей важную роль в различных физических и технических задачах. Усреднение уравнений движения приводит к изменению вида законов движения. Целью данной работы является определение дополнительных сил, возникающих в силу усреднения. Показано, что использование весовой функции, т.е. ядра усреднения в виде ядра Гаусса, позволяет существенно упростить задачу усреднения. В качестве примера предлагается применение метода к вибрационным процессам. Получено явное выражение для дополнительных сил, возникающих в результате усреднения.

Ключевые слова: вибрационные процессы, усреднение, уравнение теплопроводности, кольцо с единицей, распределение Гаусса.

ВВЕДЕНИЕ

Колебательные процессы присущи всей природе, как живой, так и неживой. Они занимают большое место во всех сферах жизни человека. Нельзя не сказать, что колебания – одно из основных свойств мироустройства. Нет ничего неподвижного. Всё движется, всё колеблется. Если движение есть форма существования материи, то колебания – важнейший вид движения. Колебания находят отражение в концепциях как классической, так и современной физики [1–4]. Сегодня нет однозначного ответа на вопрос о том, почему природа «выбирает» колебания.

Одним из видов колебательных процессов является вибрация. Ей присущи механические колебания с такими периодом и амплитудой, которые гораздо меньше соответственно интервала времени и размера рассматриваемой системы [5–8].

Вибрация используется как в медицинской практике и технике, так и в строительстве. С одной стороны, вибрационные эффекты – это работа высокоэффективных машин; с другой – причина аварий с катастрофическими разрушениями. К перечисленным выше эффектам приводят вибрационные силы [9]. Вибрационные колебания носят нелинейный характер. Несмотря на значительные успехи отечественных ученых в развитии теории нелинейных колебаний, она остается неисчерпаема.

МЕТОД НОРМАЛЬНОГО УСРЕДНЕНИЯ

В работах [11–14] усреднение физических величин по времени осуществляется при помощи равномерного распределения:

$$\langle x \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} x(t) dt \quad (1)$$

где τ – время усреднения.

Данный способ усреднения по своей сути – среднее арифметическое. Более целесообразно использовать некоторое симметричное нормированное гладкое ядро $\varphi(\theta)$, а именно:

$$\langle x \rangle_\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\theta) x(t-\theta) d\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t-\theta) x(\theta) d\theta = \varphi(t) * x(t). \quad (2)$$

Гладкое ядро позволяет получать почти всюду дифференцируемые функции времени. Определение среднего (1) – это простое прямоугольное распределение, которое имеет следующий вид:

$$\varphi(\theta) = \frac{1}{\tau} \begin{cases} 1 & \theta \in \left[-\frac{\tau}{2}; \frac{\tau}{2}\right] \\ 0 & \theta \notin \left[-\frac{\tau}{2}; \frac{\tau}{2}\right] \end{cases}. \quad (3)$$

В качестве основы авторы рекомендуют использовать «метод нормального распределения Гаусса»:

$$\langle x \rangle_\tau = \tilde{x}(t) \stackrel{def}{=} \frac{1}{\tau\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-\frac{(t-\theta)^2}{2\tau^2}} d\theta = \frac{1}{\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\tau^2}} * x(t) = u(t) * x(t), \quad (4)$$

где символ $*$ обозначает операторное исчисление Микусинского [10] на основе алгебры свертки функций; $u(t) = \frac{1}{\tau\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\tau^2}}$.

Все операционные исчисления [15] строятся на умножении в смысле свертки. Стоит заметить, что если $x(t)$ – это произвольная кусочно-непрерывная функция, то в силу свойств выражения (4) получена функция, имеющая непрерывную производную на всём множестве определения.

В данном преобразовании можно выделить несколько ценных свойств.

1. Свойство линейности:

$$u * [\lambda_1 x_1(t) + \lambda_2 x_2(t)] = \lambda_1 u * x_1 + \lambda_2 u * x_2. \quad (5)$$

2. Свойство «подчинения» уравнению теплопроводности:

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial s} = \frac{\partial^2 \tilde{x}}{\partial t^2}. \quad (6)$$

3. Поскольку, как известно из [16], нормальное распределение является фундаментальным решением уравнения теплопроводности с начальным условием $\tilde{x}(t, s)|_{s=0} = x(t)$, то следующее операторное представление будет иметь вид

$$\hat{u}(t) = e^{sD^2} = e^{\frac{\tau^2}{2} D^2}. \quad (7)$$

Здесь

$$D = \frac{\partial}{\partial t}; \quad s = \frac{\tau^2}{2}.$$

Функцию от оператора дифференцирования D следует понимать в смысле операторного метода В.П. Маслова [17].

4. Рассмотрим ассоциативное коммутативное кольцо R_0 , в котором с естественной операцией сложения определим умножение следующим образом:

$$\tilde{z}(t) = \tilde{x}(t) \circ \tilde{y}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tau^{2n}}{n!} \tilde{x}^{(n)}(t) \tilde{y}^{(n)}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tau^{2n}}{n!} \frac{\partial^n \tilde{x}(t)}{\partial t^n} \frac{\partial^n \tilde{y}(t)}{\partial t^n}. \quad (8)$$

Здесь τ – время усреднения.

Самым ценным свойством данного преобразования является мультипликативность:

$$u(t) * [x_1(t) \cdot x_2(t) \cdot x_3(t) \cdot \dots] = \tilde{x}_1(t) \circ \tilde{x}_2(t) \circ \tilde{x}_3(t) \circ \dots \quad (9)$$

Данное бинарная операция умножения – одно из возможных его представлений. Докажем утверждение (8).

Поскольку функции $\tilde{x}(t), \tilde{y}(t)$ подчиняются уравнению теплопроводности (6) с начальными условиями: $\tilde{x}(t, s)|_{s=0} = x(t)$, $\tilde{y}(t, s)|_{s=0} = y(t)$, покажем, что и $\tilde{z}(t, s) = u(t) * xy$ также подчиняется уравнению теплопроводности (6). Действительно,

$$\begin{aligned} \tilde{z}'_s(t, s) &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2s)^{n-1}}{(n-1)!} \tilde{x}^{(n)}(t, s) \tilde{y}^{(n)}(t, s) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2s)^n}{n!} \left[\tilde{x}_s^{(n)'}(t, s) \tilde{y}^{(n)}(t, s) + \tilde{x}^{(n)}(t, s) \tilde{y}_s^{(n)'}(t, s) \right] = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2s)^n}{n!} \left\{ \tilde{x}^{(n+2)}(t, s) \tilde{y}^{(n)}(t, s) + \tilde{x}^{(n)}(t, s) \tilde{y}^{(n+2)}(t, s) + 2\tilde{x}^{(n+1)}(t, s) \tilde{y}^{(n+1)}(t, s) \right\} = \\ &= D^2 [\tilde{x}(t, s) \circ \tilde{y}(t, s)] \end{aligned}$$

с заданными условиями $\tilde{z}(t, s)|_{s=0} = x(t) \cdot y(t)$.

На основе теоремы единственности для уравнения теплопроводности данное утверждение доказано.

Уравнение (8) также вытекает из следующего выражения:

$$\begin{aligned} \tilde{z}(t) &= e^{sD^2} (x(t) \cdot y(t)) = e^{s(D_1+D_2)^2} \cdot \left(x(t) \cdot y(t) \right) = e^{sD_1^2} \cdot e^{sD_2^2} \cdot e^{2sD_1D_2} x(t) y(t) = \\ &= e^{2sD_1D_2} \left(e^{sD_1^2} x(t) \right) \left(e^{sD_2^2} y(t) \right) = e^{2sD_1D_2} \tilde{x}(t, s) \tilde{y}(t, s) \stackrel{def}{=} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2s)^n}{n!} \tilde{x}^{(n)}(t, s) \cdot \tilde{y}^{(n)}(t, s). \quad (10) \end{aligned}$$

Номера над некоммутирующими величинами обозначают порядок их следования [17]. Здесь авторы воспользовались известным тождеством Лейбница:

$$D \cdot (u(t) \cdot v(t)) = (D_1 + D_2) u(t) \cdot v(t) = u'(t) v(t) + u(t) v'(t).$$

Представление (10) будем использовать ниже в силу его простоты.

Стоит отметить, что умножение в смысле (8) переходит в обычное умножение, если время усреднения устремится к нулю. Следовательно, кольцо C_f – кольцо функций с естественным умножением, $C_f \subset R_{\circ}$. Данное кольцо является кольцом с единицей: $e(t) \equiv 1$.

Значимость и полезность преобразования (4) заключается в том, что вышеперечисленные свойства позволяют сохранить инвариантность всех уравнений физики для усредненных величин с переходом к другой алгебре, определяемой соотношением (8). Этим и дается научное обоснование справедливости большинства физических законов, содержащих дифференциальные величины.

Далее можно сделать вывод: так как большая часть физических величин – это результат усреднения, то необходимо уходить от простого умножения к умножению в смысле « \circ ».

Представим несколько простых формул для коммутативного умножения « \circ »:

$$e^{\alpha t} \circ e^{\beta t} = e^{\alpha\beta\tau^2} e^{(\alpha+\beta)t}; \quad (11)$$

$$\cos(\omega_1 t) \circ \cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2} \left[e^{\omega_1\omega_2\tau^2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t] + e^{-\omega_1\omega_2\tau^2} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t] \right]. \quad (12)$$

Данное выражение необходимо рассмотреть повнимательнее, так как величина $e^{\omega_1\omega_2\tau^2}$ может иметь большие значения. Об этом следует не забывать при усреднении тригонометрических функций.

Умножение полиномов $P_n(t)$ и $P_m(t)$ любых степеней дает такой же результат, как и обычное произведение полиномов степени $k = n + m$.

Для примера рассмотрим следующую задачу.

Если $\tau = 0,5$; $P_1(t) = 2 - 5t^4$; $P_2(t) = 3t + 2t^2$, тогда

$$\begin{aligned} P_3(t) &= P_1(t) \circ P_2(t) = P_2(t) \circ P_1(t) = \\ &= (2 - 5t^4)(3t + 2t^2) + \frac{0,5^2}{1!} (-20t^3)(3 + 6t) + \frac{0,5^4}{2!} (-60t^2)6. \end{aligned} \quad (13)$$

Рассмотрим систему с N степенями свободы. Для описания этой системы необходимы N автономные уравнения движения

$$\ddot{q}_n = f_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}). \quad (14)$$

Здесь \vec{q} – вектор обобщенных координат, $\vec{q} = \{q_1(t) \dots q_N(t)\}$;

$\dot{\vec{q}}$ – вектор обобщенных скоростей, $\dot{\vec{q}} = \{\dot{q}_1(t) \dots \dot{q}_N(t)\}$;

f_n – силовая функция обобщенных координат и скоростей, $f_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}})$

Пусть в момент времени $t=0$ «включается» периодическое высокочастотное воздействие с быстрым временем $\theta = \omega t$ [1, 2] и силовой функцией $\Phi_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t)$. Положим также для определенности, что среднее в смысле (4) для $\Phi_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t)$ равно нулю.

Для анализа системы в медленном времени [1] воспользуемся методами нормального усреднения, а именно, усредним силовую функцию по быстрому времени с $\tau = 3T = \frac{6\pi}{\omega}$,

$s = \frac{\tau^2}{2}$ (правило трех сигм). С учетом инвариантности алгебры «0» получаем из выражения:

$$\ddot{\tilde{q}}_n = e^{sD^2} \ddot{q}_n = f_n^\circ(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \tilde{\Phi}_n^\circ(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t) = F_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, s, t). \quad (15)$$

Обратим внимание, что

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \tilde{q}_n(t, s) &= D^2 \tilde{q}_n(t, s) = F_n, \\ \frac{d}{ds} \dot{\tilde{q}}_n(t, s) &= D^3 \tilde{q}_n(t, s) = \frac{d}{dt} F_n, \quad D \equiv \frac{\partial}{\partial t} \end{aligned} \quad (16)$$

Определим $F_n(s + \lambda)$, где λ – малая величина:

$$\begin{aligned}
F_n(s+\lambda) &= e^{(s+\lambda)D^2} q_n = e^{\lambda D^2} F_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, s, t) = [1 + \lambda D^2] F_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, s, t) = \\
&= F_n + \lambda D \left\{ \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k} \dot{\vec{q}}_k + \frac{\partial F_n}{\partial \ddot{\vec{q}}_k} F_k \right] + \frac{\partial F_n}{\partial t} \right\} = \\
&= F_n + \lambda \left\{ \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial^2 F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \dot{\vec{q}}_m} \dot{\vec{q}}_k \dot{\vec{q}}_m + 2 \frac{\partial^2 F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \ddot{\vec{q}}_m} F_m \dot{\vec{q}}_k + \frac{\partial^2 F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \ddot{\vec{q}}_m} F_k F_m + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \frac{\partial F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k} \left[\frac{\partial F_k}{\partial \dot{\vec{q}}_m} \dot{\vec{q}}_m + \frac{\partial F_k}{\partial \ddot{\vec{q}}_m} F_m + \frac{\partial F_k}{\partial t} \right] \right] \right\} + \\
&\quad \left. \left\{ \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial F_n}{\partial \ddot{\vec{q}}_k} F_k + 2 \frac{\partial^2 F_n}{\partial t \partial \dot{\vec{q}}_k} \dot{\vec{q}}_k + \frac{\partial^2 F_n}{\partial t \partial \ddot{\vec{q}}_k} F_k \right] + \frac{\partial^2 F_n}{\partial t^2} \right\}. \quad (17)
\end{aligned}$$

Рассмотрим $F_n(s+\lambda)$ как функцию $s+\lambda$. Имеем:

$$\begin{aligned}
F_n(s+\lambda) &= F_n(\vec{q}(s+\lambda), \dot{\vec{q}}(s+\lambda), s+\lambda, t) = F_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, s, t) + \lambda \frac{\partial}{\partial s} F_n = \\
&= F_n + \lambda \left\{ \frac{\partial F_n}{\partial s} + \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k} \frac{\partial \dot{\vec{q}}_k}{\partial s} + \frac{\partial F_n}{\partial \ddot{\vec{q}}_k} \frac{\partial \ddot{\vec{q}}_k}{\partial s} \right] \right\} = \\
&= F_n + \lambda \left\{ \frac{\partial F_n}{\partial s} + \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k} F_k + \sum_{m=1}^N \frac{\partial F_n}{\partial \ddot{\vec{q}}_k} \left(\frac{\partial F_k}{\partial \dot{\vec{q}}_m} \dot{\vec{q}}_m + \frac{\partial F_k}{\partial \ddot{\vec{q}}_m} F_m + \frac{\partial F_k}{\partial t} \right) \right] \right\}. \quad (18)
\end{aligned}$$

Сравним правые части выражений (17) и (18). В результате будем иметь:

$$\frac{\partial F_n}{\partial s} = \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial^2 F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \dot{\vec{q}}_m} \dot{\vec{q}}_k \dot{\vec{q}}_m + 2 \frac{\partial^2 F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \ddot{\vec{q}}_m} F_m \dot{\vec{q}}_k + \frac{\partial^2 F_n}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \ddot{\vec{q}}_m} F_k F_m \right] + 2 \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial^2 F_n}{\partial t \partial \dot{\vec{q}}_k} \dot{\vec{q}}_k + \frac{\partial^2 F_n}{\partial t \partial \ddot{\vec{q}}_k} F_k \right] + \frac{\partial^2 F_n}{\partial t^2}. \quad (19)$$

Это уравнение будет нелинейным уравнением диффузии в $(N+1)$ -мерном пространстве с заданным условием $s=0$:

$$F_{ns=0} = f_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \Phi_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t). \quad (20)$$

Решение уравнения (19) будем искать в виде разложения в ряд по малому параметру $s = \frac{\tau^2}{2}$, а именно:

$$F_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, s, t) = F_{ns=0} + \frac{1}{1!} F'_s|_{s=0} s + \frac{1}{2!} F''_{ss}|_{s=0} s^2 + \dots \quad (21)$$

Таким образом, усреднение за любой конечный промежуток времени приводит для медленного усредненного времени к появлению новых сил.

В частности, из уравнения (19) вытекает следующее выражение:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_n}{\partial s} \Big|_{s=0} &= \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial^2}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \dot{\vec{q}}_m} \dot{\vec{q}}_k \dot{\vec{q}}_m + \dot{\vec{q}}_k \left(f_m(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \Phi_m(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t) \right) \frac{\partial^2}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \ddot{\vec{q}}_m} + \right. \\
&\quad \left. \left(f_m(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \Phi_m(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t) \right) \left(f_k(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t) + \Phi_k(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t) \right) \frac{\partial^2}{\partial \dot{\vec{q}}_k \partial \ddot{\vec{q}}_m} \right] \left(\begin{array}{l} f_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \\ \Phi_n(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t) \end{array} \right) + \\
&\quad + 2 \sum_{k=1}^N \left[\dot{\vec{q}}_k \frac{\partial^2 \Phi_n}{\partial t \partial \dot{\vec{q}}_k} + \left(f_k(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \Phi_k(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, t) \right) \frac{\partial^2 \Phi_n}{\partial t \partial \ddot{\vec{q}}_k} \right] + \frac{\partial^2 \Phi_n}{\partial t^2}. \quad (22)
\end{aligned}$$

Свойства скалярного произведения, рассматриваемые в работе [1], применимы к системе (19) и упрощают ее к следующему виду:

$$\frac{\partial F}{\partial s} = \frac{\partial^2 F}{\partial \tilde{q}^2} \dot{\tilde{q}}^2 + 2 \frac{\partial^2 F}{\partial \tilde{q} \partial \dot{\tilde{q}}} F \dot{\tilde{q}} + \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{\tilde{q}}^2} F^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \tilde{q} \partial \dot{\tilde{t}}} \dot{\tilde{q}} + \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{\tilde{q}} \partial \dot{\tilde{t}}} F \right) + \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{\tilde{t}}^2}. \quad (23)$$

Если же высокочастотное воздействие $\Phi(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, t)$ не зависит от координат и скоростей и может быть представлено в простом гармоническом виде, т.е.

$$\Phi(q, \dot{q}, t) = A \sin \Omega t, \quad (24)$$

при этом A обозначена амплитуда, Ω – частота вибрации, то выражение (22) имеет достаточно простой вид:

$$\left. \frac{\partial F}{\partial s} \right|_{s=0} = \frac{\partial^2 f(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}})}{\partial \tilde{q}^2} \dot{\tilde{q}}^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial \tilde{q} \partial \dot{\tilde{q}}} \dot{\tilde{q}} f + \frac{\partial^2 f}{\partial \dot{\tilde{q}}^2} (A^2 + f^2). \quad (25)$$

Второе слагаемое в разложении (21), пропорциональное τ^4 , можно получить, дифференцируя выражение по s , имеем:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 F}{\partial s^2} \right|_{s=0} &= \left[\left(\dot{\tilde{q}}^2 \frac{\partial^2}{\partial \tilde{q}^2} + 2(f + \Phi) \dot{\tilde{q}} \frac{\partial^2}{\partial \tilde{q} \partial \dot{\tilde{q}}} + (f^2 + A^2) \frac{\partial^2}{\partial \dot{\tilde{q}}^2} \right) + 2 \dot{\tilde{q}} \frac{\partial^2 f}{\partial \tilde{q} \partial \dot{\tilde{q}}} + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial \dot{\tilde{q}}^2} f \right] F'_s \Big|_{s=0} = \\ &= \left[\left(\dot{\tilde{q}}^2 \frac{\partial^2}{\partial \tilde{q}^2} + 2 f \dot{\tilde{q}} \frac{\partial^2}{\partial \tilde{q} \partial \dot{\tilde{q}}} + (f^2 + A^2) \frac{\partial^2}{\partial \dot{\tilde{q}}^2} \right) + 2 \dot{\tilde{q}} \frac{\partial^2 f}{\partial \tilde{q} \partial \dot{\tilde{q}}} + 2 f \frac{\partial^2 f}{\partial \dot{\tilde{q}}^2} \right] * \\ &* \left[\frac{\partial^2 f}{\partial \tilde{q}^2} \dot{\tilde{q}}^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial \tilde{q} \partial \dot{\tilde{q}}} f \dot{\tilde{q}} + (A^2 + f^2) \frac{\partial^2 f}{\partial \dot{\tilde{q}}^2} \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Подставляя выражение (25) и (26) в выражение (21), получаем с точностью до малой величины, пропорциональной τ^6 , выражение для вибрационной силы.

Отметим, что выражения (25) и (26) позволяют снять ограничения, имеющие место в работе [18], на получение явного вида вибрационных сил. Кроме того, выражения (25) и (26) существенно отличаются от результатов работ [19, 20]. Это отличие вызвано тем, что сам процесс усреднения меняет структуру сил.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен новый метод усреднения физических величин, обладающий рядом ценных свойств. Усреднение уравнений движения приводит к изменению вида законов движения. Авторами данной работы определены дополнительные силы, возникающих благодаря усреднению. В качестве примера рассмотрено применение метода к вибрационным процессам. Получено выражение для дополнительных сил, возникающих в результате усреднения.

Список используемых источников

1. *Блехман И.И.* Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. – СПб.: Издательский дом «Руда и материалы», 2013. – 640 с.
2. *Индейцев Д.А., Блехман И.И., Фрадков А.Л.* Медленное движение в системах с инерционным возбуждением колебаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 1. – С. 25–32.
3. *Пановко Я.Г.* Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1980. – 270 с.
4. *Бутенин Н.В., Луң Я.Л., Меркин Д.Р.* Курс теоретической механики: учебник. – 11-е издание. – СПб.: Лань, 2009. – 736 с.

5. *Блехман И.И., Индейцев Д.А.* Вибрационное управление реологическими свойствами твердых тел // Сб. трудов XV Симпозиума «Динамика виброударных (сильно нелинейных систем)». – М.-Звенигород: ИМАШ РАН, 2006. – С. 43–47.
6. *Быховский И.И.* Основы теории вибрационной техники. – М.: Машиностроение, 1969. – 363 с.
7. *Юдович В.И.* Вибродинамика и виброгеометрия механических систем со связями // Успехи механики. – 2006. – Т. 4, № 3. – С. 26–74.
8. *Волосов В.М., Моргунов Б.И.* Метод осреднения в теории нелинейных колебательных систем. – М.: МГУ, 1971. – 507 с.
9. *Капица П.Л.* Маятник с вибрирующим подвесом // УФН. – 1951. – Т. 44. – С. 7–20.
10. *Лившиц Е.М., Патаевский Л.П.* Статистическая физика. – М.: Наука, 1978. – Ч. 2. Теория конденсированного состояния. – 497 с.
11. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Статистическая физика. – М.: Наука, 1976. – Ч. 1. – 583 с.
12. *Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А.* Курс теоретической физики. – М.: Наука, Глав. ред. физ-мат. лит, 1971. – Т2. – 936 с.
13. *Кейз К., Извайфель П.* Линейная теория переноса. – М.: Мир, 1972.
14. *Микусинский Ян.* Операторные исчисления. – М.: ИЛ. 1956.
15. *Диткин В.А., Прудников А.П.* Операционное исчисление. – М.: Высшая школа, 1975.
16. *Арсенин В.Я.* Методы математической физики и специальные функции. – М.: Наука, Глав. ред. физ-мат. Лит, 1974. – 430 с.
17. *Маслов В.П.* Операторные методы. – М.: Наука, 1973.
18. *Blekhman I.I.* Vibrational mechanics. Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications. – Singapore et al: – World Scientific Publishing Co., 2000. – 509 p.
19. *Blekhman I.I., Indeitsev D.A., Vaisberg L.A.* Theoretical and Experimental Basis of Advanced Vibrational Technologies // Springer Proceedings in Physics 139. – 2011. – P. 133–137.
20. *Chelomei V.N.* Mechanical paradoxes caused by vibrations // Soviet Physics Doklady. – 1983. – 28. – P. 387–390.

С.А. Власов,
кандидат техн. наук, доцент;
И.Ю. Кубасов,
кандидат техн. наук

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ОСНАЩЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ КОМПЛЕКСОМ, ДЛЯ ОБЗОРА ВСЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Приводится обоснование и результаты расчета параметров орбит космических аппаратов, оснащенных радиолокационным комплексом для обзора всей поверхности Земли.

Ключевые слова: космический аппарат, система космических аппаратов, угол полураствора бортовой аппаратуры, полоса обзора, квазисинхронные орбиты, глобальный обзор.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в области синтеза систем космических аппаратов (КА) на сегодняшний день является создание систем космических аппаратов, оснащенных радиолокационным комплексом, которые обеспечивают обзор всей поверхности Земли (глобальный обзор).

Бортовая аппаратура радиолокационного комплекса ввиду особенностей функционирования при обзоре земной поверхности формирует одну или две полосы бокового обзора справа и слева от трассы полета по направлению движения. При этом для организации обзора всей поверхности Земли необходимо обеспечить её покрытие полосами обзора КА системы. Обзор земной поверхности такими системами КА происходит с разрывом в наблюдении.

На покрытие всей поверхности Земли полосами обзора влияют параметры орбиты КА, которые в совокупности с другими факторами оказывают влияние на результативность выполнения задачи обзора.

Анализ влияния параметров орбиты на результативность выполнения задачи обзора приведен, например, в работах [1, 2, 3], но для зоны обзора КА в виде сферического сегмента. К системам КА с такой зоной обзора относят системы КА, имеющие на борту радиотехнический комплекс или бортовую аппаратуру, которая гарантирует связь или навигацию.

ЗАДАЧА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ

Обеспечение глобальности обзора поверхности Земли выдвигает ряд требований к типу орбиты и ее параметрам. В ходе решения задачи синтеза структуры системы КА могут использоваться квазисинхронные орбиты, трассы которых замыкаются через определенный интервал времени [3]. Кроме того, при известных характеристиках бортовой аппаратуры необходимо выдержать требования по наклонению орбиты и ее радиусу.

В режиме работы радиолокационного комплекса, когда используются полоса обзора справа и слева от трассы, обеспечивается двусторонний обзор. Размер полос при двустороннем обзоре определяется размерами дуг φ_{31} , φ_{32} , расположенных на окружности большого круга, нормальной к вектору скорости КА (рис. 1), и зависит от углов полураствора бортовой аппаратуры γ_i , а также от радиуса орбиты [4]:

$$\varphi_{3_i} = \arcsin\left(\frac{r}{R} \sin\gamma_i\right) - \gamma_i,$$

где $i = 1, 2$;

- r – радиус круговой орбиты;
- R – радиус шарообразной Земли.

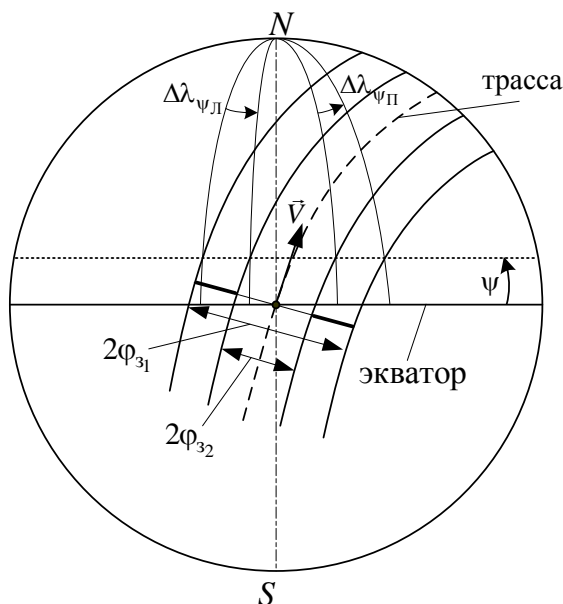


Рис. 1. Характеристики полос левостороннего и правостороннего обзора

Таким образом, при известных характеристиках бортовой аппаратуры (углов полураствора γ_1, γ_2) радиолокационного комплекса КА необходимо определить такие наклонение и радиус орбиты, при которых обеспечивается глобальный обзор земной поверхности.

Глобальность наблюдения подразумевает потенциальную возможность применения радиолокационного комплекса КА над любой точкой поверхности Земли.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ

Для обеспечения глобальности обзора наклонение орбиты должно находиться в следующем интервале:

$$i \in \begin{cases} \left[\frac{\pi}{2} - \varphi_{3_1}, \frac{\pi}{2} - \varphi_{3_2} \right], & \text{при } i < \frac{\pi}{2} \text{ (прямые орбиты);} \\ \left[\frac{\pi}{2} + \varphi_{3_2}, \frac{\pi}{2} + \varphi_{3_1} \right], & \text{при } i > \frac{\pi}{2} \text{ (обратные орбиты),} \end{cases} \quad (1)$$

т.е. орбиты при малых углах $\varphi_{3_1}, \varphi_{3_2}$ будут близки к полярным.

Другое ограничение накладывается на расстояние между одноименными узлами трассы полёта (восходящими либо нисходящими), которое на любой широте должно покрываться полосой обзора бортовой аппаратуры радиолокационного комплекса КА.

Для анализа покрытия полосой обзора расстояния между узлами необходимо знать степень покрытия ею каждой широты при движении КА по орбите с заданными параметрами.

Кроме того, радиус квазисинхронной орбиты влияет на цикл замыкания трассы полета, который для повышения частоты просмотра точек земной поверхности должен быть минимальным.

В работах [3, 5–7] предлагается решение задачи по расчету характеристик полосы обзора широты для случая зоны обзора КА в виде сферического сегмента.

Для случая зоны обзора бортовой аппаратуры КА с радиолокационным комплексом степень покрытия произвольной широты ψ полосой обзора будет определяться углами между крайними меридианами для полос обзора слева ($\Delta\lambda_{\psi_n}$) – левосторонний обзор и справа ($\Delta\lambda_{\psi_n}$) – правосторонний обзор от трассы полета по ходу движения КА по орбите (см. рис.1).

Пусть КА системы располагаются на прямых орбитах, т.е. выполняется условие по наклону $i < \frac{\pi}{2}$. Для расчета угла $\Delta\lambda_{\psi_n}$ можно использовать углы α_{π_1} , α_{π_2} , u_{π_1} , u_{π_2} (рис. 2).

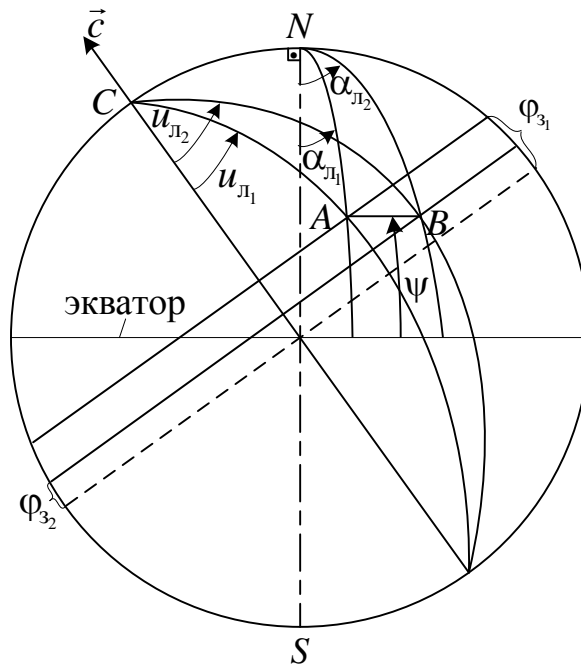


Рис. 2. К расчету характеристик полосы левостороннего обзора

С использованием рис. 2 можно определить углы α_{π_1} , α_{π_2} , u_{π_1} , u_{π_2} , которые находятся из следующих выражений:

$$\alpha_{\pi_1} = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\cos i \sin \psi - \sin \varphi_{31}}{\sin i \cos \psi}\right), & \text{если } |\psi| < i + \varphi_{31}, \\ 0, & \text{если } |\psi| \geq i + \varphi_{31}, \end{cases}$$

$$\alpha_{\pi_2} = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\cos i \sin \psi - \sin \varphi_{32}}{\sin i \cos \psi}\right), & \text{если } |\psi| < i + \varphi_{32}, \\ \pi/2, & \text{если } |\psi| \in [i + \varphi_{32}, i + \varphi_{31}] \end{cases}$$

$$u_{\pi_1} = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\sin \psi - \cos i \sin \varphi_{31}}{\sin i \cos \varphi_{31}}\right), & \text{если } |\psi| < i + \varphi_{31}, \\ 0, & \text{если } |\psi| \geq i + \varphi_{31}, \end{cases}$$

$$u_{л_2} = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\sin\psi - \cos i \sin\varphi_{3_2}}{\sin i \cos\varphi_{3_2}}\right), & \text{если } |\psi| < i + \varphi_{3_2}, \\ \pi/2, & \text{если } |\psi| \in [i + \varphi_{3_2}, i + \varphi_{3_1}]. \end{cases}$$

Тогда угол $\Delta\lambda_{\psi_л}$ для левостороннего обора будет определяться как

$$\Delta\lambda_{\psi_л} = \begin{cases} \alpha_{л_2} - \alpha_{л_1} - (u_{л_2} - u_{л_1})T_{\Omega}/T_{\text{эф}}, & \text{если } |\psi| < i + \varphi_{3_2}, \\ 2(\alpha_{л_2} - \alpha_{л_1} - (u_{л_2} - u_{л_1})T_{\Omega}/T_{\text{эф}}), & \text{если } |\psi| \in [i + \varphi_{3_2}, i + \varphi_{3_1}], \\ 0, & \text{если } |\psi| < \pi - i - \varphi_{3_1} \text{ и } |\psi| \geq i + \varphi_{3_1}, \\ 2\pi, & \text{если } |\psi| \geq \pi - i - \varphi_{3_1} \text{ и } |\psi| \geq i + \varphi_{3_2}. \end{cases} \quad (2)$$

где $T_{\text{эф}}$ – эффективные сутки, т.е. время полного оборота Земли относительно восходящего узла орбиты;

T_{Ω} – драконический период обращения КА.

В формулах (2) слагаемое $(u_{л_2} - u_{л_1})T_{\Omega}/T_{\text{эф}}$ учитывает снос полосы обзора за счет вращения Земли.

Для расчета угла $\Delta\lambda_{\psi_п}$ при правостороннем обзоре можно использовать углы $\alpha_{п_1}$, $\alpha_{п_2}$, $u_{п_1}$, $u_{п_2}$ (рис. 3).

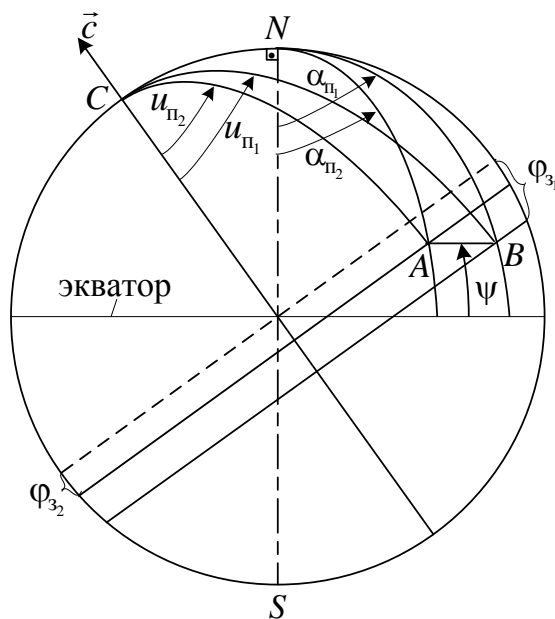


Рис. 3. К расчету характеристик полосы правостороннего обзора

С помощью рис. 3 можно определить углы $\alpha_{п_1}$, $\alpha_{п_2}$, $u_{п_1}$, $u_{п_2}$, которые вычисляются из следующих выражений:

$$\alpha_{п_1} = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\cos i \sin\psi + \sin\varphi_{3_1}}{\sin i \cos\psi}\right), & \text{если } |\psi| < i - \varphi_{3_1}, \\ \pi/2, & \text{если } |\psi| \in [i - \varphi_{3_1}, i - \varphi_{3_2}], \\ 0, & \text{если } |\psi| \geq i - \varphi_{3_2}, \end{cases}$$

$$\alpha_{n_2} = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\cos i \sin \psi + \sin \varphi_{3_2}}{\sin i \cos \psi}\right), & \text{если } |\psi| < i - \varphi_{3_2}, \\ 0, & \text{если } |\psi| \in [i - \varphi_{3_1}, i - \varphi_{3_2}], \end{cases}$$

$$u_{n_1} = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\sin \psi + \cos i \sin \varphi_{3_1}}{\sin i \cos \varphi_{3_1}}\right), & \text{если } |\psi| < i - \varphi_{3_1}, \\ \pi/2, & \text{если } |\psi| \in [i - \varphi_{3_1}, i - \varphi_{3_2}], \\ 0, & \text{если } |\psi| \geq i - \varphi_{3_2}, \end{cases}$$

$$u_{n_2} = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\sin \psi + \cos i \sin \varphi_{3_2}}{\sin i \cos \varphi_{3_2}}\right), & \text{если } |\psi| < i - \varphi_{3_2}, \\ 0, & \text{если } |\psi| \in [i - \varphi_{3_1}, i - \varphi_{3_2}], \end{cases}$$

Тогда угол $\Delta\lambda_{\psi_n}$ для правостороннего обзора можно определить как

$$\Delta\lambda_{\psi_n} = \begin{cases} \alpha_{n_1} - \alpha_{n_2} - (u_{n_1} - u_{n_2})T_{\Omega}/T_{\text{эф}}, & \text{если } |\psi| < i - \varphi_{3_1}, \\ 2(\alpha_{n_1} - \alpha_{n_2} - (u_{n_1} - u_{n_2})T_{\Omega}/T_{\text{эф}}), & \text{если } |\psi| \in [i - \varphi_{3_1}, i - \varphi_{3_2}], \\ 0, & \text{если } |\psi| \geq i - \varphi_{3_2}. \end{cases} \quad (3)$$

В формулах (3) слагаемое $(u_{n_1} - u_{n_2})T_{\Omega}/T_{\text{эф}}$ также учитывает снос полосы обзора за счет вращения Земли.

В частном случае на экваторе углы $\Delta\lambda_{\psi_n}$ и $\Delta\lambda_{\psi_n}$ одинаковы и, как следует из формул (2) и (3), вычисляются по формуле

$$\Delta\lambda_{\psi} = \arcsin\left(\frac{\sin \varphi_{3_1}}{\sin i}\right) - \arcsin\left(\frac{\sin \varphi_{3_2}}{\sin i}\right) - \left(\arcsin\left(\frac{\text{tg} \varphi_{3_1}}{\text{tgi}}\right) - \arcsin\left(\frac{\text{tg} \varphi_{3_2}}{\text{tgi}}\right)\right) T_{\Omega}/T_{\text{эф}}. \quad (4)$$

Для обратных орбит, когда выполняется условие $i > \frac{\pi}{2}$, в формулах (2)–(4) вместо наклона орбиты i необходимо подставить выражение $\pi - i$. А отношение $T_{\Omega}/T_{\text{эф}}$ необходимо подставить со знаком минус.

На рис. 4 и 5 показан пример расчета углов $\Delta\lambda_{\psi_n}$, $\Delta\lambda_{\psi_n}$ для орбиты КА с параметрами $T_{\text{эф}}/T_{\Omega} = 91/6$ и наклоном $i = 83.6^\circ$ для углов полураствора бортовой аппаратуры $\gamma_1 = 60^\circ$, $\gamma_2 = 40^\circ$.

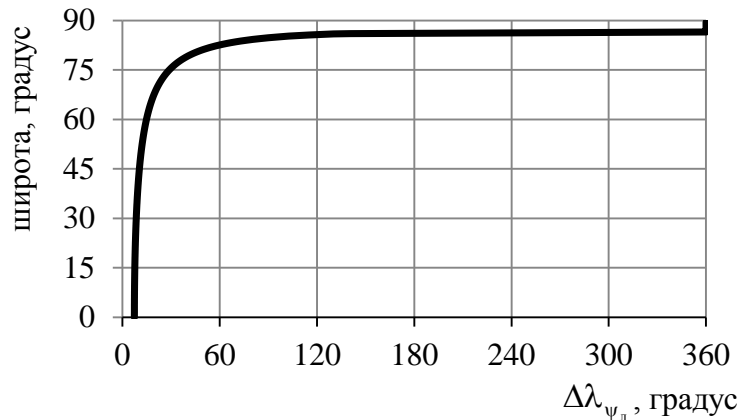
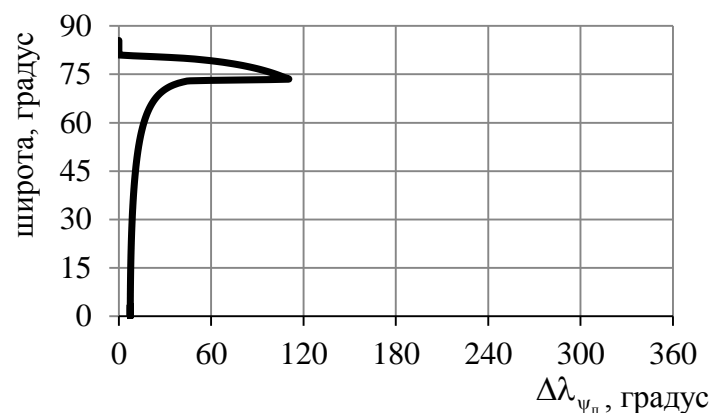
Анализ рисунков показывает, что наихудшее покрытие полосами обзора параллели наблюдается на экваторе, где углы $\Delta\lambda_{\psi_n} = \Delta\lambda_{\psi_n} = \Delta\lambda_{\psi}$ принимают минимальное значение.

Для выбора параметров квазисинхронной орбиты, обеспечивающей минимальный цикл замыкания трассы полета КА, при обзоре радиолокационной аппаратурой КА всей поверхности Земли необходимо учесть особенности квазисинхронных орбит.

Квазисинхронной орбитой принято считать орбиту, для которой выполняется условие [3]

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{p}{q},$$

где числа p и q – взаимно простые целые числа.

Рис. 4. График зависимости $\Delta\lambda_{\psi_n}(\psi)$ Рис. 5. График зависимости $\Delta\lambda_{\psi_n}(\psi)$

Минимальное расстояние между одноименными узлами квазисинхронной орбиты определяется как

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi}{p} = \frac{\Delta\lambda_{\text{мв}}}{q},$$

где $\Delta\lambda_{\text{мв}}$ – межвитковый сдвиг трассы полета.

Для выбора параметров квазисинхронной орбиты необходимо рассмотреть зависимости углов $\Delta\lambda_3$ левостороннего и правостороннего обзора на экваторе и минимального расстояния между одноименными узлами орбиты $\Delta\lambda$ в функции числа оборотов в сутки.

На рис. 6 приведены графики для углов $\Delta\lambda$ при $q = 1, 2, 3, 4, 5$ и $\Delta\lambda_3$, рассчитанных при следующих параметрах: $\gamma_1 = 60^\circ$, $\gamma_2 = 40^\circ$, $i = 83.6^\circ$.

Как следует из рисунка, ближайшими квазисинхронными орбитами, для которых выполняется условие $\Delta\lambda_3 > \Delta\lambda$, являются орбиты, для которых соотношение $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}}$ равно $\frac{43}{3}$, $\frac{59}{4}$, $\frac{76}{5}$ (табл. 1).

Выбор параметров квазисинхронных орбит с учетом превышения ширины полосы на экваторе над минимальным расстоянием между одноименными узлами осуществлялся исходя из равенства числа q при определении величины $\Delta\lambda$ и соотношения $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}}$ в знаменателе.

Если величина $\Delta\lambda_3$ равна минимальному расстоянию между одноименными узлами орбиты $\Delta\lambda$, то при выполнении условия (1) в случае, когда используется только одна полоса обзора (правая или левая), наибольшее время разрыва в наблюдении всей поверхности Земли в одноименных узлах орбиты будет наблюдаться на экваторе и будет определяться из выражения

$$\Delta t = pT_\Omega = qT_{\text{эф}}.$$

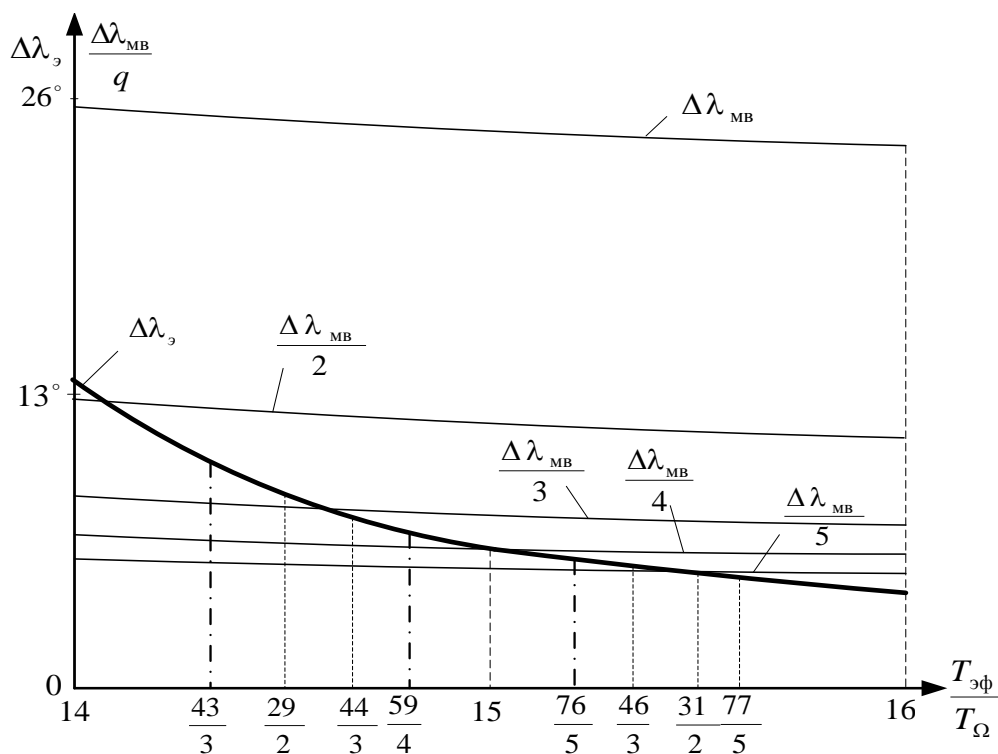


Рис. 6. Графики зависимостей углов $\Delta\lambda_3\left(\frac{T_{\text{эф}}}{T_\Omega}\right)$ и $\Delta\lambda\left(\frac{T_{\text{эф}}}{T_\Omega}\right)$

Таблица 1

Параметры квазисинхронных орбит

$T_{\text{эф}}/T_\Omega$	43/3	59/4	76/5
H , км	579	596	557
$\Delta\lambda_3$, градус	10.3	7.1	5.9
$\Delta\lambda$, градус	8.5	6.5	5.1

При таком виде обзора любая точка на экваторе одним КА будет наблюдаться минимальное число раз, равное четырем за цикл замыкания трассы полета (любая точка экватора будет попадать в левую или правую полосу обзора бортовой аппаратуры в восходящем и нисходящем узле) и наибольшее число раз около полюсов – один раз на каждом витке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при проектировании структуры системы КА необходимо осуществлять выбор параметров орбит во взаимосвязи с параметрами, влияющими на результативность

обзора земной поверхности, в частности с учетом величины угла полураствора бортовой аппаратуры КА.

Для обеспечения обзора всей поверхности Земли, в случае использования на КА радиолокационного комплекса при двустороннем обзоре, необходимо выбирать наклонение орбиты, обеспечивающее покрытие одной из полос обзора полюсов Земли.

Анализ покрытия параллелей Земли полосами обзора показал, что наилучшее, с точки зрения наблюдения, покрытие происходит на экваторе. Поэтому для обеспечения обзора всей поверхности Земли необходимо соблюдать требования по превышению покрытия полосой обзора минимального расстояния между одноименными узлами трассы полета КА на интервале цикла замыкания трассы полета КА.

На ширину полосы обзора и характеристики трассы полета оказывает влияние радиус квазисинхронной орбиты, который должен выбираться с учетом минимума цикла замыкания трассы полета КА.

Список используемых источников

1. Концептуальные вопросы оптимизации орбитального построения перспективных спутниковых систем на основе класса диссимметричных баллистических структур / В.И. Горбулин, А.Ю. Коваленко, В.А. Поливанов и др. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: труды двадцать второй Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: НПО специальных материалов, 2019. – Т. 1: Вооружение, военная и специальная техника. – С. 290–295.

2. Кичигина О.К. Влияние параметров системы спутников на кратность непрерывного покрытия широтного пояса земли полосами обзора // Естественные и технические науки. – 2014. – № 11–12 (78). – С. 229–242.

3. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, А.В. Богачёв и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 302 с.

4. Власов С.А., Кубасов И.Ю. Расчёт структур орбитальных группировок космических аппаратов глобального непрерывного обзора поверхности Земли, оснащенных радиолокационными комплексами // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 235–242.

5. Использование орбитальных карт для разработки метода расчета показателей качества спутниковых систем при обзоре широтных поясов Земли / В.И. Горбулин, Л.П. Зозуля, В.В. Панченко и др. // Информация и космос. – 2009. – № 4. – С. 66–73.

6. Горбулин В.И., Зозуля Л.П., Чернявский В.А. Применение кватернионов для аналитического расчета интервалов наблюдения спутником заданного объекта // Информация и космос. – 2009. – № 3. – С. 62–66.

7. Саульский В.К. Использование «слеодограмм» для расчета периодичности землеобзора // Исследование Земли из космоса. – 1994. – № 2. – С. 65–74.

В.И. Гера,
кандидат техн. наук, доцент;
Е.В. Калмыков;
В.В. Пудиков,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА РАБОТ ПО ПОДДЕРЖАНИЮ В ГОТОВНОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК С УЧЕТОМ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В представленной публикации авторами решается задача формирования оптимального объема управляющих воздействий по поддержанию в готовности инженерно-технических систем (ТС). Для достижения требуемого результата проведен анализ ТС как объекта обслуживания. В результате анализа в отдельную группу отнесены элементы системы с уровнем надежности ниже требуемого, для которых в дальнейшем формируются режимы обслуживания с учетом их фактического состояния. А именно, решается, какие работы на данных элементах возможно выполнить и какие для этого потребуются силы и средства системы технического обеспечения. Для формирования перечня необходимых работ осуществляется анализ функциональной схемы, рассматриваемой ТС, в ходе которого определяются функциональные и деградационные признаки элементов системы, а также значимость (вес) каждого элемента в системе. Анализ функциональной схемы ТС производится с помощью функционально-топологического метода.

В конце проведенной работы полученные данные сведены в таблицу, которая в дальнейших исследованиях послужит инструментом для экспертов, участвующих в формировании оптимального объема работ с учетом фактического технического состояния ТС.

Ключевые слова: отказ, ремонт, управляющие воздействия, техническое обеспечение, технические системы, эксплуатация, граф, матрица, показатели надежности.

ВВЕДЕНИЕ

«Решая вопрос относительно распределения усилий по обеспечению надежности отдельных элементов в целях достижения заданной надежности системы, иногда необходимо знать, какой элемент наиболее значимый, какой – менее значимый. Иначе говоря, необходимо знать, какое влияние оказывает на общую надежность системы выход из строя того или иного элемента» [1].

Уровень эффективности использования изделий по назначению, в том числе затраты на их техническое обслуживание и ремонт, в значительной степени определяются выбранной стратегией поддержания в готовности, т.е. системой правил, по которым осуществляется управление их техническим состоянием, принимается решение о моменте начала и объеме операций обслуживания и ремонта всех видов. Цель данной работы – обобщение и систематизация результатов исследований авторов в области оптимизации стратегии поддержания в готовности ТС с учетом их фактического технического состояния.

АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ОБЪЕКТА ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА

Поскольку объектом анализа являются ТС, находящиеся в эксплуатации, то представляется логичным на первом шаге выполнить анализ их фактического технического состояния. Здесь в зависимости от имеющейся информации о состоянии объекта будем использовать

один из методов оценки надежности элементов ТС, построенных на основе статистической информации, экспертных оценок или физико-статистических данных.

По результатам данного анализа исследуемые элементы ТС будут разделены на две группы (рис. 1). Первая группа – элементы системы с уровнем надежности не ниже требуемого, т.е. элементы с подтвержденной «проектной» надежностью. Управляющие воздействия по поддержанию их в готовности будем проводить в соответствии с эксплуатационной и ремонтной документацией. Вторая группа – элементы с уровнем надежности ниже требуемого. Для данных элементов необходимо сформировать режимы обслуживания и/или ремонта с учетом полученного на первом шаге анализа, их технического состояния.

На втором шаге анализа необходимо ответить на два вопроса: какие работы по поддержанию в готовности возможно выполнить на данных элементах; какие силы и средства системы технического обеспечения необходимы для проведения данных работ.

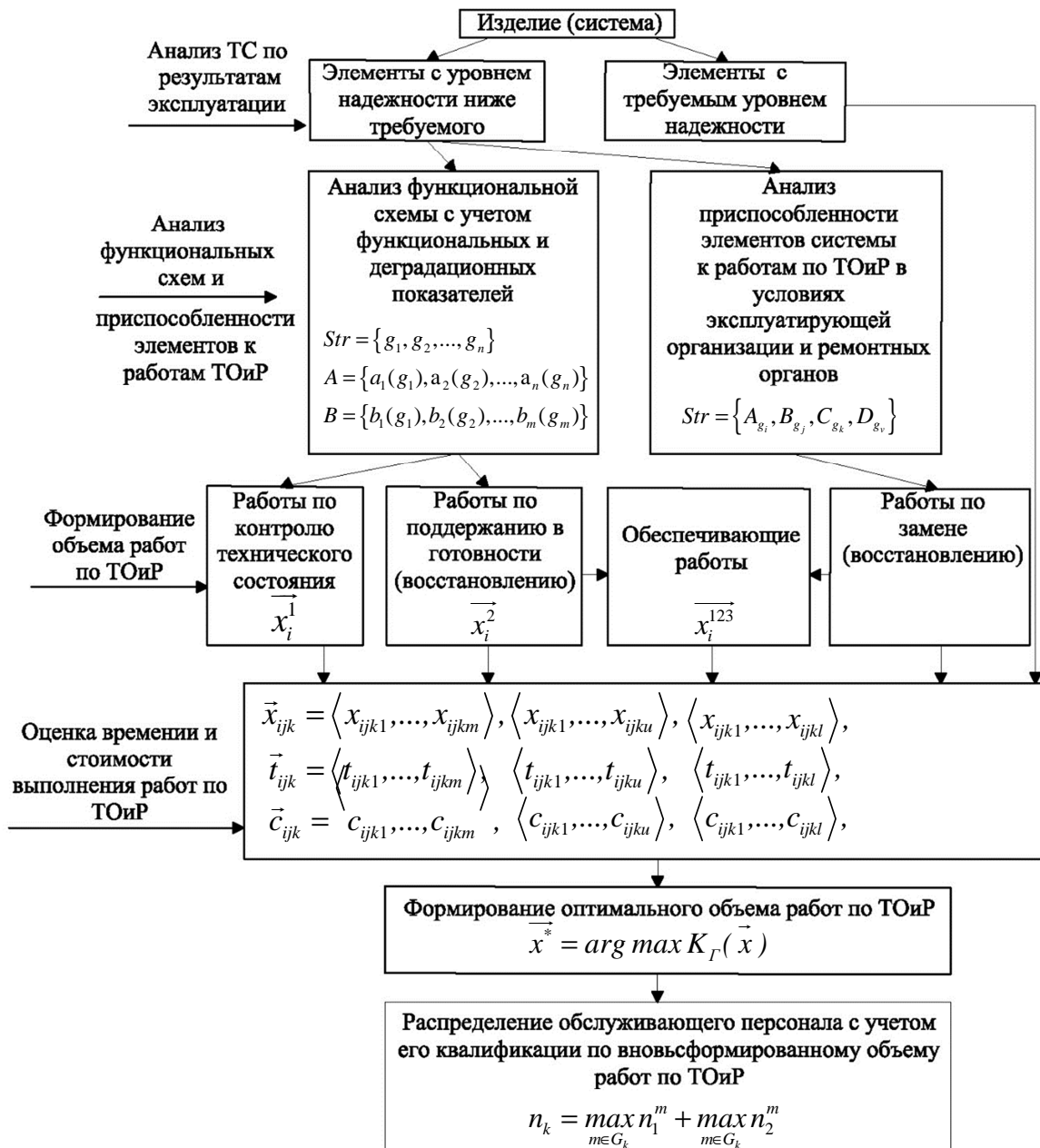


Рис. 1. Формирование работ по поддержанию в готовности ТС с учетом их фактического технического состояния

Для ответа на первый вопрос необходимо выполнить анализ функциональной схемы ТС с учетом функциональных и деградационных характеристик ее элементов, определить критичность (важность, значимость) элемента в системе. Определение показателей важности элементов позволит распределить очередность проведения работ с учетом ограничений на эксплуатационные затраты, связанные с поддержанием в готовности ТС.

Для анализа функциональной схемы ТС применим функционально-топологический метод, так как он, в отличие от структурно-топологического, основан на анализе функциональной схемы системы [1, 2], что позволит избежать получения в системе двух равнозначных элементов, расположенных параллельно.

При проведении анализа функциональной схемы ТС из множества элементов I , участвующих в процессе ее функционирования, выделим подмножество G , оказывающее влияние на надежность ТС, а вспомогательные элементы (манометры, заглушки и т.п.) исключим из анализа:

$$G \subset I, \quad (1)$$

где $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$.

Далее при применении функционально-топологического метода обратимся только к элементам подмножества G .

Рассмотрим в качестве примера функциональную схему условной системы оборотного водоснабжения (СОВ) станции термостатирования РКК (рис. 2).

Функциональными характеристиками элементов рассматриваемой системы являются функции назначения каждого из них, в качестве таких функций примем признак a_i , выражающийся в выполнении операций преобразования взаимозависимых параметров давления и расхода рабочего тела. Для элемента 1 (фильтр магнитный фланцевый, рис. 2) такая функция будет иметь вид

$$a_1(g_1) = Q_\phi = A \sqrt{\frac{\Delta P_\phi}{\gamma}}, \quad (2)$$

где Q_ϕ – расход рабочей жидкости через фильтрующий элемент;

A – постоянный коэффициент данного фильтра;

ΔP_ϕ – перепад давления;

γ – объемный вес жидкости.

Деградационными характеристиками элементов рассматриваемой системы являются функции деградационных процессов, в качестве таких функций примем признак b_i , выражающийся в постепенном ухудшении характеристик материалов элементов ТС относительно проектных значений. Для элемента 1 (фильтр магнитный фланцевый, рис. 2) в качестве фильтрующего элемента используется стальная сетка, следовательно, элемент подвержен такому деградационному процессу, как коррозия. Для него функция будет иметь вид

$$b_1(g_1) = \frac{d\delta}{dt} = \vartheta_o \cdot K_{ук}^{ст} \cdot K_{ук}^д \cdot K_{ук}^{деф}, \quad (3)$$

где ϑ_o – скорость коррозии при обычных условиях;

$K_{ук}^{ст}$ – коэффициент усиления коррозии за счет статических нагрузок;

$K_{ук}^д$ – коэффициент усиления коррозии за счет динамических нагрузок;

$K_{ук}^{деф}$ – коэффициент усиления коррозии за счет деформаций.

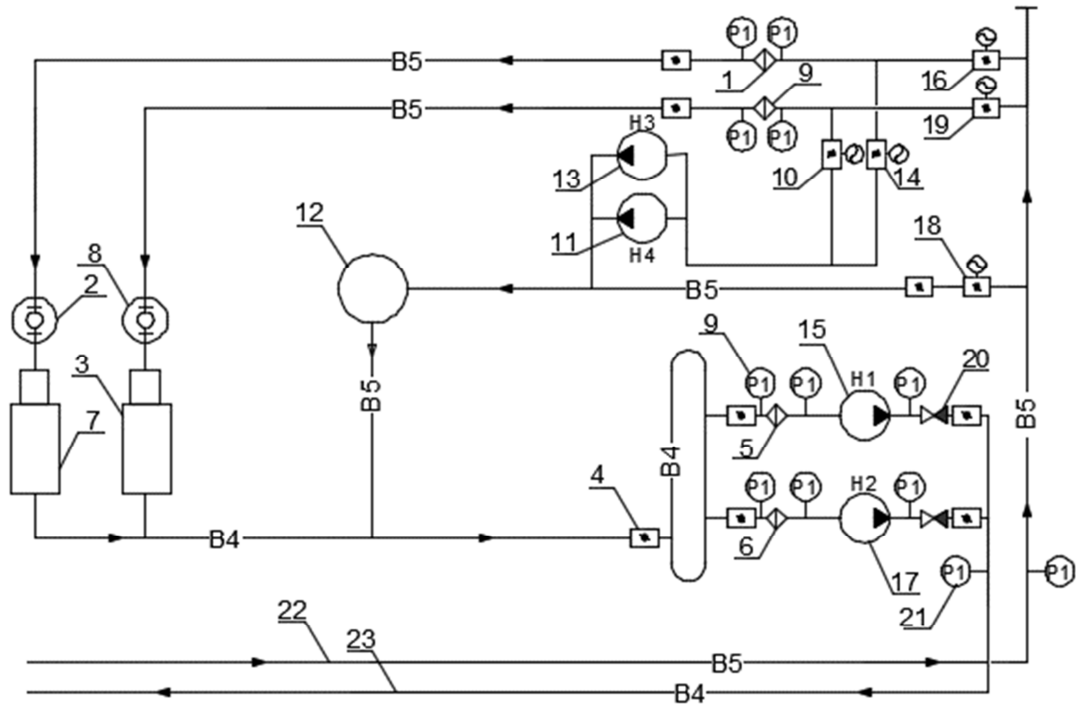


Рис. 2. Функциональная схема СОВ станции термостатирования РКК

На рис. 2 введены следующие обозначения: 3, 7 – градирни; 2, 8 – колодцы с вантузом; 4 – дисковый затвор; 12 – колодец гашения; 11, 13 – насосы дренажные; 15, 17 – насосы основные; 1, 5, 6, 9 – фильтры магнитные фланцевые; 10, 14, 16, 18, 19 – дисковый затвор с электроприводом; 20 – клапан обратный проходной; 21 – манометр; 22 – трубопровод отепленной воды; 23 – трубопровод охлажденной воды.

Переходя к процессу определения критичности элементов ТС, из представленной схемы получим описание функциональных связей и построим ориентированный граф функционирования СОВ (рис. 3).

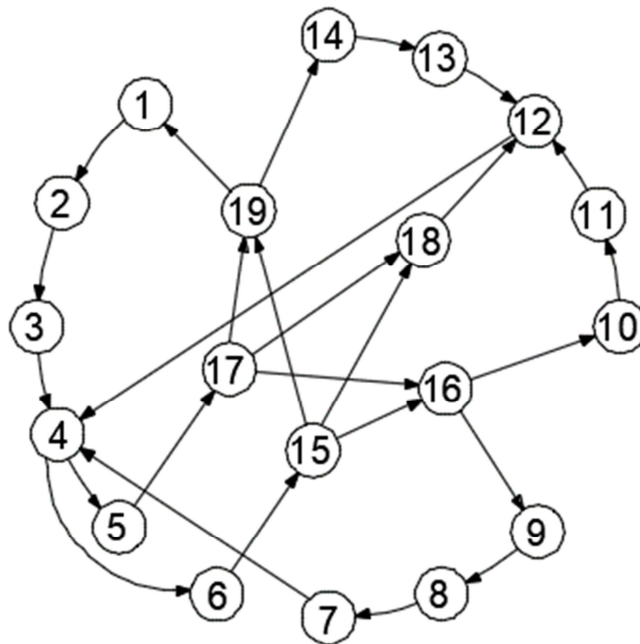


Рис. 3. Ориентированный граф функциональной схемы СОВ станции термостатирования РКК

На рис. 3 приняты следующие обозначения: (i) – вершины ориентированного графа, соответствующие рассматриваемой ТС; \rightarrow — ориентированные ребра графа, соответствующие функциональным связям между элементами.

Используя представленный выше граф, строим матрицу функциональных связей A , которая является основой для определения функциональной значимости элементов ТС:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \varphi_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{45} & \varphi_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{5,17} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{6,17} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_{74} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{87} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{98} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{10,11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{11,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_{12,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{13,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{14,13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{15,16} & 0 & \varphi_{15,18} & \varphi_{15,19} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{16,9} & \varphi_{16,10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{17,16} & 0 & \varphi_{17,18} & \varphi_{17,19} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{18,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_{19,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_{19,14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Строки и столбцы матрицы A нумеруются в соответствии с номерами вершин графа. При оценке значимости элементов ТС по функциональным связям на месте ij -го элемента матрицы ставится соответствующий коэффициент влияния (φ_{ij}), который указывает степень влияния i -го элемента ТС на j -й. Ноль означает отсутствие связи и, следовательно, отсутствие влияния одного элемента на другой. Таким образом, коэффициент влияния может принимать значения от нуля до единицы:

$$0 \leq \varphi_{ij} \leq 1. \quad (5)$$

На первом шаге исследования авторами были получены значения таких показателей надежности элементов ТС, как коэффициент готовности и интенсивность отказов, в качестве коэффициента влияния используем один из данных показателей надежности. Применение показателей надежности в качестве коэффициента влияния позволит применять функционально-топологический метод к любому сложному объекту, как в условиях ограничения исходных данных, так и при наличии достоверной статистической информации по надежности этого объекта [3].

Далее вычисления сводятся к определению количественной характеристики значимости элементов ТС – ранг элемента R_i . При сравнении рангов определяется значимость каждого

элемента в ТС, причем $\sum_{i=1}^N R_i = 1$, где N – число элементов в системе.

В соответствии с [1, 2] при использовании функционально-топологического метода ранги элементов ТС вычисляются с помощью характеристического уравнения матрицы функциональных связей A (4).

Характеристическое уравнение матрицы A вычисляется путем нахождения определителя:

$$|A - \omega E| = 0, \quad (6)$$

где ω – независимая переменная характеристического уравнения матрицы A ;
 E – единичная матрица.

Общий вид выражения (6) можно представить в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} \Phi_{11} - \omega & \Phi_{12} & \dots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} - \omega & \dots & \Phi_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Phi_{n1} & \Phi_{n2} & \dots & \Phi_{nn} - \omega \end{vmatrix} = 0. \quad (7)$$

Характеристическое уравнение матрицы функциональных связей A в развернутом виде соответствует следующему выражению:

$$f(A) = |A - \omega E| = (-\omega)^n + L_1(-\omega)^{n-1} + L_2(-\omega)^{n-2} + \dots + L_{k-1}(-\omega) = 0, \quad (8)$$

где n – порядок характеристического уравнения, соответствующий порядку матрицы A ;

L_k – коэффициент характеристического уравнения, определяемый через главные миноры матриц A , $k = \overline{1, n}$.

В выражении (8) L_k равен сумме главных миноров матрицы A .

Матрицы L_k являются числителями простейших дробей в разложении:

$$\frac{C(\omega)}{\Psi(\omega)} = \sum_{k=1}^s \left[\frac{L_1}{\omega_{max} - \omega_k} + \frac{1!L_2}{(\omega_{max} - \omega_k)^2} + \frac{(M_k - 1)!L_{kM_k}}{(\omega_{max} - \omega_k)^{M_k}} \right], \quad (9)$$

где $C(\omega)$ – приведенная присоединенная матрица для матрицы $\|\omega E - A\|$;

$\Psi(\omega)$ – минимальный многочлен для матрицы $\|\omega E - A\|$;

s – порядок минимального многочлена;

ω_{max} – максимальный по абсолютной величине корень характеристического уравнения;

ω_k – корень характеристического уравнения матрицы A ;

M_k – кратность характеристического числа.

Из характеристического уравнения матрицы функциональных связей (8) ранг i -го элемента ТС вычисляется по следующей формуле:

$$R_i = \frac{\sum_{k=1}^n \omega_k \sum_{j=1}^{n-1} L_{kij}}{\sum_{k=1}^n \omega_k \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} L_{kij}}, \quad \sum_{i=1}^N R_i = 1, \quad (10)$$

где $(n-1) \times (n-1)$ – размерность главного минора L_k ;

$n \times n$ – размерность матрицы A ;

- L_{kij} – элемент i -й строки j -го столбца матрицы L_k ;
- N – число элементов в ТС.

Так как в данной работе в качестве коэффициента влияния принят показатель надежности, то значимость элементов ТС стала зависеть не только от числа функциональных связей, но и от коэффициента готовности K_Γ :

$$R_i = f(\Phi C_i, K_\Gamma). \tag{11}$$

Полученные ранги элементов ТС, их функциональные и деградационные признаки сведем в табл. 1.

Таблица 1

Ранги элементов ТС, их функциональные и деградационные признаки

№ п/п	Наименование элемента ТС (g_i)	Ранг элемента $R_i(g_i)$	Функциональный признак элемента $a = a(g_i)$	Деградационный признак элемента $b = b(g_i)$
	1	2	3	4
1	Фильтр магнитный фланцевый (g_1)	0,11	$a_1(g_1) = Q_\Phi = A \sqrt{\frac{\Delta P_\Phi}{\gamma}}$	$b_1(g_1) = \frac{d\delta}{dt} = \vartheta_o \cdot K_{ук}^{ст} \cdot K_{ук}^д \cdot K_{ук}^{деф}$
...

Полученная численная значимость элементов, их деградационных и функциональных признаков позволяет перейти к формированию работ по контролю ТС и по поддержанию его в готовности, а из проведенного анализа приспособленности элементов к работам по ТОиР получим информацию о том, какие необходимо провести работы по замене (восстановлению) элементов ТС в войсковых условиях и на предприятиях промышленности.

Для формирования объема управляющих воздействий на основе проведенных анализов применим метод экспертных оценок, где экспертам предлагается определить объем возможных работ по контролю технического состояния (столбец 3 в табл. 1) и по восстановлению (столбец 4 в табл. 1).

Данное множество управляющих воздействий оценивается по стоимости выполнения и по времени проведения этих воздействий, после чего формируется их оптимальный объем с применением метода динамического программирования.

Дано: зависимости $K_{\Gamma ij}(c_{ij})$.

Найти: для $\forall i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K}, v = \overline{1, V}$ и $C_{ij} = c_{ij1}^{min}, c_{ij1}^{min} + \Delta c_{ij1}, c_{ij1}^{min} + \Delta c_{ij2}, \dots, c_{ij}^{max}$,

$$\overrightarrow{x_{ij}^*} = \underset{\overrightarrow{x_{ij}}}{\operatorname{argmax}} \sum_{i=1, j=1}^{I, J} \Delta K_{\Gamma ij} (x_{ij1} c_{ij1} + \dots + x_{ijk} c_{ijk}) \tag{12}$$

при условии, что

$$\sum_{i=1, j=1}^{I, J} (x_{ij1} c_{ij1} + \dots + x_{ijk} c_{ijk}) \leq C_{ij}, \tag{13}$$

где $\overrightarrow{x_{ij}^*} [< x_{ij1}^*, x_{ij2}^*, \dots, x_{ijk}^* >]^T$ – вектор, характеризующий оптимальный объем работ по достижению требуемого коэффициента готовности при реализации работ на k -м элементе j -й системы i -го вида.

Задача решена авторами в работах [4, 5].

После определения объема управляющих воздействий представляется необходимым перераспределить обслуживающий персонал по вновь сформированным работам с учетом его квалификации. Решение авторами данной задачи представлено в работе [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы была достигнута главная цель – разработана методика формирования стратегии поддержания в готовности ТС по ее фактическому техническому состоянию и определены исполнители этих работ. Данная методика позволит повысить коэффициент готовности отдельных элементов и системы в целом до требуемого (проектного) значения и в рамках исследования авторов перейти к дальнейшему рассмотрению вопроса разработки методики обоснования требований к структуре и характеристикам подсистемы обеспечения материальными средствами электромеханических подразделений КВ, позволяющей обеспечить подразделения требуемой для выполнения сформулированного оптимального объема работ номенклатурой и количеством материальных средств при ограничениях на эксплуатационные затраты.

Список используемых источников

1. *Нечипоренко В.И.* Структурный анализ и методы построения надежных систем. – М.: Сов. радио, 1968. – 256 с.
2. *Нечипоренко В.И.* Структурный анализ систем (эффективность и надежность). – М.: Сов. радио, 1977. – 216 с.
3. *Voronin A., Peshekhonov N., Rybakov V.* Method of Setting Reliability Requirements for a Power Supply System // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 3 – 4 Oct. 2018. Vladivostok, Russia, 2019. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602710/authors#authors> (дата обращения: 01.11.2019).
4. *Калмыков Е.В.* Подход к разработке модели подсистемы поддержания в готовности электромеханического оборудования объектов КВ // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 320–326.
5. *Калмыков Е.В.* Разработка методики построения системы поддержания в готовности инженерно-технических систем // Научный проект / Конкурс грантов 2019 года для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. – СПб.: Петроцентр, 2019. – С. 213–214.
6. *Гера В.И., Мосягин Р.А., Калмыков Е.В.* К вопросу о формировании оптимального состава расчетов поддержания в готовности энергомеханического оборудования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – С. 153–160.

В.И. Гнатюк*,

доктор техн. наук, профессор

С.А. Дорофеев*,

кандидат техн. наук

О.Р. Кивчун*,

кандидат техн. наук

*Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде, г. Калининград

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В публикации рассматривается математическая модель проблемной ситуации управления электропотреблением при эксплуатации объектов военной инфраструктуры. С помощью математического аппарата модели отображаются главные структурные взаимосвязи между основными элементами процесса управления электропотреблением объектов военной инфраструктуры и последовательностью формирования частных задач для реализации синтеза процедур рангового анализа. Отличительной особенностью модели является использование элементов векторного рангового анализа.

Ключевые слова: объект военной инфраструктуры, векторный ранговый анализ, управление электропотреблением, эксплуатация, С-индикатор, комплексный показатель системных свойств.

ВВЕДЕНИЕ

Надежное и гарантированное обеспечение электроэнергией объектов военной инфраструктуры (ОВИ) Министерства обороны России является одной из первостепенных задач, служащих для поддержания обороноспособности нашей страны. Её решение в основном осуществляется за счет эффективного управления электропотреблением при эксплуатации ОВИ [1].

Развитие науки и техники, усложнение военно-политической обстановки в мире, постоянное возрастание объемов информации предъявляют всё более высокие требования к повышению эффективности управления электропотреблением ОВИ. В последнее время серьезно расширились возможности различных методов управления. Новые научные подходы и программно-аппаратные средства позволяют в режиме реального времени принять решение для выбора наилучшей стратегии управления. Однако вопросам моделирования при управлении электропотреблением ОВИ уделено недостаточное внимание. В статье предлагаются научно-методологические основы решения данного вопроса на основе методики исследования больших технических систем – техноценозов [2–5].

МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ТЕХНОЦЕНОЗА

В [4] достаточно полно описана методика оптимального управления электропотреблением техноценозов (рис. 1). Стандартными процедурами методики стали интервальное оценивание, прогнозирование, нормирование и потенширование, которые с целью уточнения были дополнены тонкими процедурами дифлекс-анализа (на этапе интервального оценивания), GZ-анализа (на этапе прогнозирования), ASR-анализа (на этапе нормирования) и ZP-анализа (на этапе потенширования). Методика оптимального управления электропотреблением техноценозов позволяет довольно хорошо решать задачи управления электропотреблением на небольших горизонтах прогнозирования, однако обладает рядом недостатков. Основными из

них являются необходимость упрощения линейных операций для процедур рангового анализа, отсутствие математического аппарата комплексирования процедур рангового анализа, неразвитость критериальной системы оценки мониторинга их результатов и выбора комплексных алгоритмов для устранения ошибок, выявленных при мониторинге [2–5].

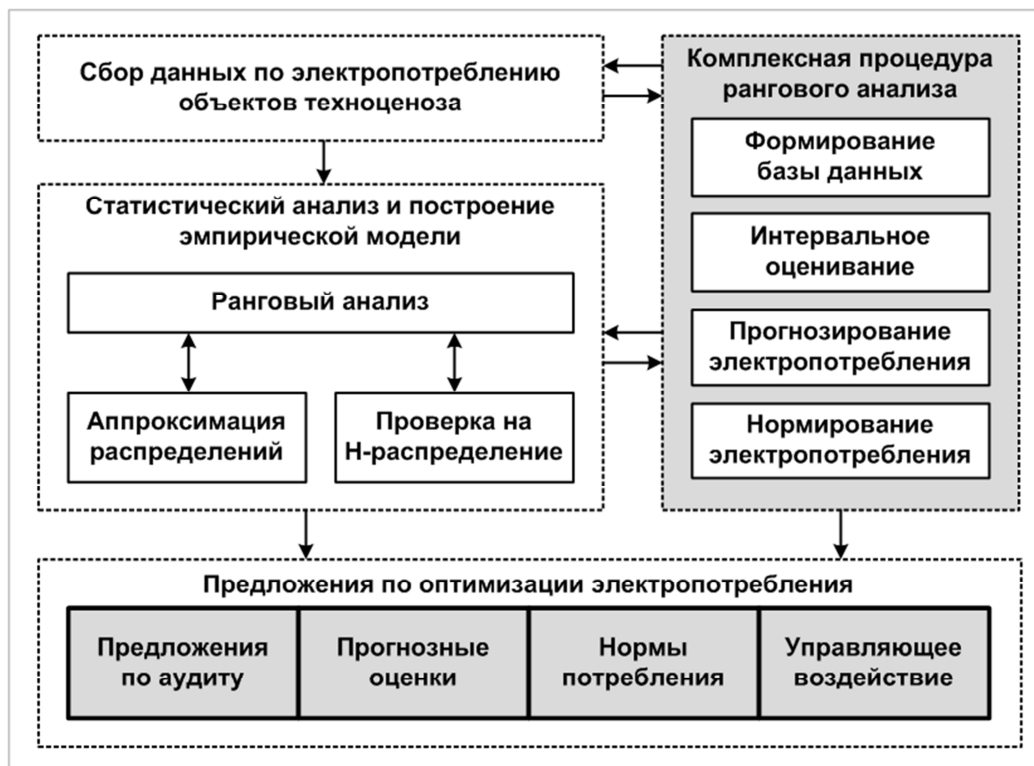


Рис. 1. Структура методики оптимального управления электропотреблением техноценоза

Для устранения данных недостатков разработана модель проблемной ситуации управления электропотреблением ОВИ (рис. 2).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

На первом этапе моделирования путем импорта из базы данных формируется множество входной информации $\Theta_{\{k\}}$. Для данной модели входная информация содержит три множества: значений дифлекс-параметра, прогнозных значений и норм электропотребления. На основе множества $\Theta_{\{k\}}$ формируется С-матрица, представляющая собой прямоугольную матрицу, векторы которой принадлежат векторному ранговому пространству и отражают результаты процедур функционального рангового анализа интервального оценивания, прогнозирования и нормирования [5].

Примем следующие обозначения: $\Theta_{\{k\}}$ – входная информация для моделирования; $U_{\{k\}}$ – множество стратегий ЛПР; $\Lambda_{\{k\}}$ – множество значений определенных и неопределенных факторов, формирующих управляющее воздействие; $I_{\{k\}}$ – множество индикаторных функций; $G_{\{k\}}$ – множество исходов результатов; $Y_{\{k\}}$ – множество результатов в операции; W – показатель эффективности; k – критерий эффективности.

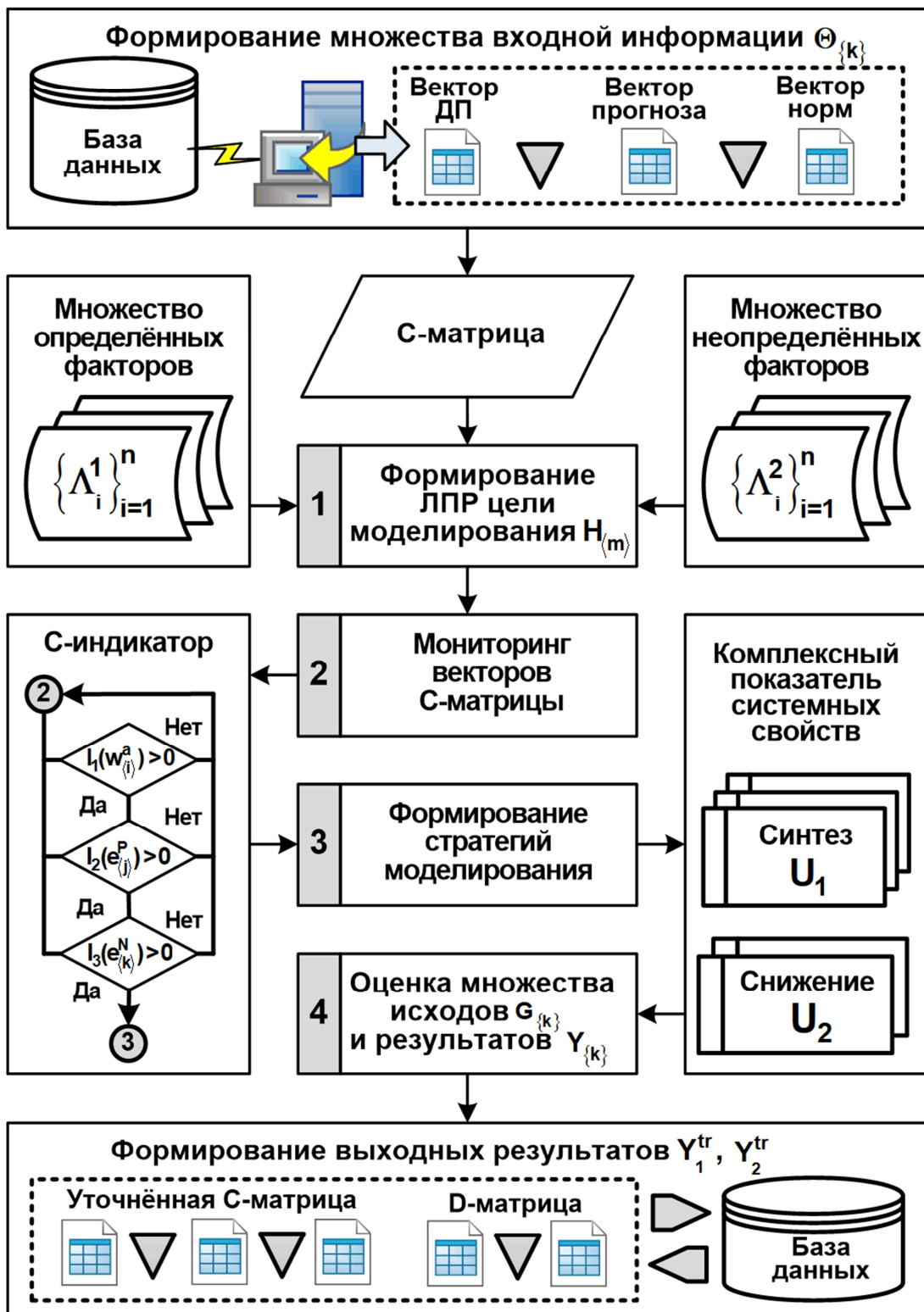


Рис. 2. Модель проблемной ситуации управления электропотреблением

Следующим этапом является определение ЛПР цели моделирования. При этом анализируются С-матрица и множества значений определенных Λ_1 и неопределенных факторов Λ_2 . Множество Λ_1 представляет собой совокупность внутренних факторов. Такие факторы заранее известны ЛПР и характеризуются полной и достоверной информацией о проблемной си-

туации, целях, ограничениях и последствиях принимаемых решений [6, 7]. Множество Λ_1 включает в себя следующие факторы: достоверность входных данных для формирования векторов С-матрицы, их формат и количество исследуемых временных интервалов (час, неделя, месяц, год и т.д.) [8].

Второе множество Λ_2 представляет собой совокупность неопределенных факторов организационного воздействия: распорядительное воздействие, расстановка кадровых ресурсов, нормирование и регламентирование электропотребления. В целом организационное воздействие сводится к некоторой нормированной цифре или предельному диапазону. Примером возникновения таких факторов может служить ситуация, когда получено устойчивое векторное ранговое параметрическое распределение, однако в рамках стратегического планирования руководящие органы приказывают снизить электропотребление на 3 % [8, 9].

На основе анализа С-матрицы, а также определенных и неопределенных факторов целевую функцию модели проблемной ситуации в общем виде можно представить следующей системой:

$$\mathbf{H} = \langle \Theta_{\{k\}}, \mathbf{U}_{\{k\}}, \Lambda_{\{k\}}, \mathbf{I}_{\{k\}}, \mathbf{G}_{\{k\}}, \mathbf{Y}_{\{k\}}, \mathbf{W}, k \rangle. \quad (1)$$

Получая информацию о цели управления, ЛПР последовательно формирует множество $\mathbf{U}_{\{k\}}$ на основе мониторинга С-матрицы на наличие ошибок и отклонений, опираясь на математический аппарат С-индикатора. Под С-индикатором понимается функционал $\mathbf{I}_{\{k\}}$, включающий в себя систему индикаторных функций, определенных на множестве значений векторов С-матрицы, полученных в результате процедур рангового анализа, которые определяют логику принятия решения. При значении вектора дифлекс-параметра $w_{(i)}^a > 0$ функционалом $\mathbf{I}_{\{k\}}$ осуществляется индикация о наличии объектов, аномально потребляющих электроэнергию. В случае, если средняя относительная ошибка вектора прогнозных значений $e_{(i)}^p$ больше 15 %, то С-индикатор фиксирует ошибку прогноза. Соответственно при отклонении значений вектора норм электропотребления $e_{(k)}^N$ от нижней допустимой границы ОДЗ больше чем на 15 % происходит индикация отклонения от нормы [5].

На основе информации о наличии ошибок и отклонений на следующем этапе модели формируется две стратегии: синтез процедур рангового анализа \mathbf{U}_1 и снижение электропотребления ОВИ на основе управляющего воздействия \mathbf{U}_2 . Необходимо отметить, что стратегия \mathbf{U}_2 реализуется после достижения требуемых результатов в первой стратегии или в случае воздействия неопределенных факторов множества Λ_2 . Кроме того, стратегия \mathbf{U}_1 решает задачу устойчивости векторного рангового распределения по электропотреблению, а вторая нацелена на получение его оптимальной формы.

При реализации данных стратегий в результате применения аппарата индикаторных функций и с учетом множества $\Lambda_{\{k\}}$ оценивается множество исходов реализации стратегий $\mathbf{G}_{\{k\}}$, а также устанавливается следующая система соответствий:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_1 : \mathbf{U}_1 \times \Lambda_1 \rightarrow \mathbf{Y}_1(G_1); \\ \mathbf{H}_2 : \mathbf{U}_2 \times \Lambda_2 \rightarrow \mathbf{Y}_2(G_2). \end{cases} \quad (2)$$

На основе (2) формируются величины требуемого результата \mathbf{Y}_1^{tr} и \mathbf{Y}_2^{tr} . Далее по информации $\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_1^{tr}$ и $\mathbf{Y}_2, \mathbf{Y}_2^{tr}$ с помощью аппарата индикаторных функций в комплексном показателе системных свойств для показателя эффективности \mathbf{W} устанавливаются возможные виды метрики $\rho_1(\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_1^{tr})$ и $\rho_2(\mathbf{Y}_2, \mathbf{Y}_2^{tr})$, на основе чего формируются модели Ψ_1, Ψ_2 «результат – пока-

затель». Одновременно формируются критерии $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ по информации $\Theta_{\{k\}}$ и $\mathbf{I}_{\{k\}}$, которая может использовать данный критерий в форме решающего правила. На основе суждения о степени достижения цели управления в блоке оценки множества исходов и результатов либо осуществляется выбор наилучшей альтернативы $U_1^* \in U_1$ и $U_2^* \in U_2$, либо осуществляется возврат и коррекция элементов модели проблемной ситуации. Символом U^* обозначается подмножество «наилучших» стратегий управления, из которых окончательно выбирают реализуемое решение [6, 7].

В общем виде задачи, соответствующие двум основным процессам принятия решений при исследовании эффективности, формируются на основе модели проблемной ситуации и имеют следующий вид [6, 7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_1 : \{Y_1 | H_1 \times \Lambda_1 \xrightarrow{\Theta_{\{k\}}} Y_1(G_1)\}; \\ \Psi_2 : \{Y_2 | H_2 \times \Lambda_2 \xrightarrow{\Theta_{\{k\}}} Y_2(G_2)\} \\ \mathbf{I}_{\{k\}} \xrightarrow{\Theta_{\{k\}}} k : U_1 \xrightarrow{w} U_1^*; \\ \mathbf{I}_{\{k\}} \xrightarrow{\Theta_{\{k\}}} k : U_2 \xrightarrow{w} U_2^*. \end{array} \right. \quad (3)$$

Первые два выражения системы (3) отражают процесс получения результатов, а вторые – процесс анализа результатов. При этом записи $Y_1 | H_1 \times \Lambda_1 \xrightarrow{\Theta_{\{k\}}} Y_1(G_1)$ и $Y_2 | H_2 \times \Lambda_2 \xrightarrow{\Theta_{\{k\}}} Y_2(G_2)$ означают множественность моделей, соответствующих системным уровням исследования. Исходя из концепции метациели информация $\Theta_{\{k\}}$ для низших уровней иерархии может быть либо получена с верхнего уровня, либо сформирована на основе информации ЛПР рассматриваемого системного уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, модель проблемной ситуации управления электропотреблением ОВИ на основе синтеза процедур рангового анализа отображает взаимосвязи между основными элементами процесса выработки управленческого решения и последовательностью формирования частных задач управления.

В модели реализуются две стратегии синтеза процедур рангового анализа: комплексирование процедур рангового анализа и снижение электропотребления ОВИ на основе управляющего воздействия. Первая стратегия решает задачу устойчивости, а вторая нацелена на получение оптимального решения при снижении электропотребления индивидуально для каждого ОВИ.

Список используемых источников

1. Военная инфраструктура // Министерство обороны Российской Федерации. – URL: <http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12803%40morphDictionary> (дата обращения: 03.01.2019).
2. Кудрин Б.И. Введение в технетику. – Томск: ТГУ, 1993. – 552 с.
3. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – URL: <http://gnatukvi.ru/ind.html> (дата обращения: 12.01.2019).

4. *Кивчун О.Р.* Реализация стратегии снижения электропотребления объектов припортового электро-технического комплекса на основе векторного рангового анализа // *Морские интеллектуальные технологии.* – 2019. – № 4 (46). – С. 139–145.
5. *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.
6. *Морозов Л.М., Петухов Г.Б., Сидоров В.Н.* Методологические основы теории эффективности. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1982. – 236 с.
7. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. – М.: Машиностроение, 1998. – Т. 3 / под ред. В.С. Авдеевского и др. – 328 с.
8. *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.
9. 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.

В.О. Головчинский*;

И.К. Миляев**;

А.Г. Тарасов*,

доктор техн. наук

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

** Войсковая часть 75117, г. Мирный

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ И СПОСОБОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, ЗАДЕЙСТВОВАННЫХ В РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Описаны характерные причины неисправностей в электрических кабельных системах подготовки и пуска ракет космического назначения. Представлены недостатки применяемых для контроля состояния электрических кабельных систем подготовки и пуска ракет космического назначения приборов, и изложены методики диагностирования электрических кабельных систем с использованием различных алгоритмов коммутации электрических цепей. Предложен способ усовершенствования устройств диагностирования электрических кабельных систем.

Ключевые слова: электрические кабельные системы, коммутация, целостность цепи, сопротивление разобщения.

ВВЕДЕНИЕ

Проверка исправности любой системы обязательно включает проверку исправности линий связи, как внутренних, так и внешних. Проблема контроля электрического сопротивления между множеством электрических цепей достаточно актуальна в связи с постоянной необходимостью проводить операции с помощью различных приборов и средств измерения для контроля целостности электрических цепей и разобщения между ними в кабельной продукции с различной электрической схемой внутренних соединений.

В любых системах подготовки и пуска ракет космического назначения (РКН) присутствуют электрические связи между аппаратурой, приборами и исполнительными органами. В основном линии связи представляют собой разветвленную кабельную систему, главным критерием исправности которой является соответствие состояния ее электрической схемы эксплуатационной документации [1].

Целью данной публикации являются анализ недостатков приборов, применяемых для контроля состояния электрических кабельных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, и методик диагностирования электрических кабельных систем с использованием различных алгоритмов коммутации электрических цепей, а также выбор способа усовершенствования устройств диагностирования на основе проведенных расчетов.

В статье под электрической кабельной системой (ЭКС) понимается совокупность физических каналов для передачи электрических сигналов и электрической энергии, включающая электрические кабели с электрическими цепями внутри них, соединительные разъемы, коммутационные элементы и устройства, имеющие определенную схему соединений внутренних электрических цепей [2, 3].

К ЭКС, задействованным в реализации технологических процессов подготовки и пуска РКН, относятся: электрическая сеть питания и управления оборудованием, электрическая сеть контрольно-проверочной аппаратуры, кабельная сеть наземного проверочно-пускового электрооборудования и т. п.

НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Неисправностью ЭКС считается событие, приводящее к нарушению определенной схемы соединений внутренних электрических цепей кабелей или разъемов либо к недопустимому изменению характеристик по активному сопротивлению электрических цепей [2].

Основными неисправностями в ЭКС, задействованных в процессах подготовки и пуска РКН, являются:

- 1) обрыв электрической цепи;
- 2) короткое замыкание между электрическими цепями;
- 3) снижение активного электрического сопротивления между электрическими цепями (сопротивление разобщения) или между электрической цепью и «корпусом» – общим контактом (сопротивление изоляции);
- 4) появление «паразитных» сопротивлений между электрическими цепями и/или корпусом («паразитные емкости», «паразитные индуктивности», «диодный эффект»).

Причинами неисправностей в ЭКС подготовки и пуска РКН являются:

- воздействие внешних факторов (огненная струя, компоненты ракетных топлив и т. п.);
- механические повреждения;
- воздействие внешней среды через незащищенные участки ЭКС;
- конструкторские и производственные нарушения;
- ошибки при сборке электрической схемы;
- биологические вредители.

В результате возникновения неисправностей в ЭКС подготовки и пуска РКН возможны следующие последствия:

- увеличение времени на подготовку и пуск ракет космического назначения либо перенос пуска;
- расход ресурсов наземного технологического оборудования с неисправной ЭКС, а также ЗИП;
- неоправданный расход ресурса смежного наземного технологического оборудования.

Для определения исправности ЭКС проводят следующие виды электрических измерений:

- замер активного электрического сопротивления между цепями ЭКС с целью проверки наличия между этими цепями связи или разобщения для контроля соответствия ЭКС эксплуатационной документации;
- замер активного электрического сопротивления каждой цепи ЭКС с целью проверки ее целостности для контроля соответствия ЭКС эксплуатационной документации;
- замер активного электрического сопротивления между цепями ЭКС и «корпусом» с целью проверки допустимого сопротивления изоляции.

Проведение таких проверок осложняется большим количеством цепей, их сложной топологией в ЭКС (сложной электрической схемой внутренних соединений) и расположением возможных мест для проведения операций по замеру.

АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В настоящее время для контроля состояния ЭКС применяется инструментальный контроль, проводимый с помощью различных приборов и средств измерений. Известные измерительные приборы, такие как мегаомметры и комбинированные измерительные приборы, позволяют проводить измерения в ручном режиме. Также существуют приборы с возможностью автоматизации проведения измерений [4]. К автоматизированным измерительным приборам относятся: комплект 11Н172 (разработчик и производитель ГНПП «Объединение

Коммунар», Украина, г. Харьков), прибор контроля цепей (ПКЦ) С-13262 (разработчик и производитель АО «Научно-производственное объединение автоматики имени Н.А. Семихатова», РФ, г. Екатеринбург), устройство контроля сопротивления изоляции (УКСИ) (разработчик и производитель СКБ «Орион», РФ, г. Санкт-Петербург).

Комплект 1Н172 обеспечивает проверку целостности и сопротивления изоляции кабелей, а также осуществляет автоматический поиск неисправности в кабеле с точностью до конкретного номера неисправной цепи и при необходимости позволяет производить измерение активных сопротивлений. Выбор программы проверки осуществляется путем подключения к проверяемому кабелю через специальные кабели-переходники проверочных заглушек.

ПКЦ С-13262 и УКСИ обеспечивают автоматический контроль целостности цепей и сопротивления изоляции разобращенных цепей. Приборы разработаны с использованием современных цифровых технологий, и выбор контролируемых цепей осуществляется по команде ПЭВМ верхнего уровня. УКСИ построено по блочной схеме и существует в двух вариантах (стационарное и переносное).

Данным приборам присущи следующие недостатки:

- одновременно может проверяться только одна электрическая цепь;
- низкая скорость приведения в необходимое состояние коммутации;
- отсутствие возможности коммутации цепей с заданной программой или алгоритмом;
- низкая мобильность устройств.

В автоматизированных измерительных приборах используются следующие проверки исправности кабелей:

- проверка разобщения проверочной цепи с корпусом (проверка сопротивления изоляции) – во всех устройствах;
- проверка значения активного электрического сопротивления между двумя любыми цепями («точка – точка») – в ПКЦ и УКСИ;
- проверка значения активного электрического сопротивления между одной любой цепью и объединенными в одну точку другими проверочными цепями («точка – группа») – в комплекте 1Н172;
- проверка целостности цепи в ЭКС (с использованием дополнительных испытательных заглушек, подключаемых к ЭКС) – во всех устройствах.

Измерительные модули большинства устройств для определения активного электрического сопротивления используют измеренное значение силы тока, протекающего между двумя проверяемыми точками. При известном стабилизированном напряжении, приложенном к этим точкам, сопротивление вычисляется по закону Ома. Поэтому если проверяемые цепи имеют большую протяженность или/и на них влияют внешние условия (влажность, температура, электромагнитные наводки и т.п.) – в проверяемых цепях могут проявляться реактивные электрические сопротивления, влияющие на результаты измерений. Для компенсации таких влияний активное электрическое сопротивление могут измерять с подключением поочередно к двум проверяемым точкам стабилизированного напряжения противоположной полярности (плюс – к 1-й точке, минус – ко 2-й точке, и затем наоборот: плюс – ко 2-й точке, минус – к 1-й точке) [5].

СПОСОБЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Проверка целостности цепи в ЭКС с использованием дополнительных испытательных заглушек, подключаемых к ЭКС, для всех устройств организована одинаково. На одном конце ЭКС устанавливается проверяющее устройство, а на другом – испытательная заглушка, внутри которой образованы электрические связи между входными цепями. В соответствии с программой проверяющее устройство проводит замер значения активного электрического

сопротивления между двумя цепями, которые должны быть объединены в испытательной заглушке. Если значение меньше допустимого (близко к нулю), это означает, что целостность этих двух проверяемых цепей не нарушена, но если значение больше допустимого (стремится к бесконечности), то это означает, что внутри ЭКС имеется нарушение целостности одной из двух или обеих проверяемых цепей.

Проверка разобщения проверяемой цепи с корпусом и проверка значения активного электрического сопротивления между цепями имеют схожую организацию, поэтому в дальнейшем рассмотрим только способ проверки значения активного электрического сопротивления между цепями ЭКС. Целью данной проверки является определение электрических связей (активного электрического сопротивления) между цепями ЭКС. Как известно, внутри ЭКС могут находиться цепи, имеющие электрическую связь (короткозамкнутые цепи, цепи управления электромагнитными устройствами и т.п.), и цепи, не имеющие электрическую связь (разобщенные между собой или с корпусом).

Проверка цепей, имеющих электрическую связь, проводится аналогично проверке целостности, за исключением того, что для этого не нужны испытательные заглушки. Обычно количество таких цепей в ЭКС мало, поэтому большее время занимает проверка разобщенности электрических цепей.

В результате проверки разобщенности электрических цепей получается матрица сопротивлений, в которой в главной строчке и столбце обозначены номера цепей, а в ячейке на пересечении указывается сопротивление между цепями [6]. При контроле исправности кабелей не требуется определять точное значение активного электрического сопротивления между двумя цепями (сопротивление разобщения), для этого достаточно установить нахождение измеряемого параметра в диапазонах «Норма» («0» в матрице) или «Не норма» («1» в матрице).

Для кабеля с четырьмя проверяемыми на разобщение цепями матрица сопротивлений представлена в табл. 1. В таблице знаком «X» на главной диагонали обозначены несуществующие измерения. Матрицу можно разделить на две части: над и под главной диагональю. Каждая из этих частей как раз и соответствует набору измерений с разными полярностями подключаемого напряжения.

Таблица 1

Матрица сопротивлений

Контакты	Результаты измерений			
	1	2	3	4
1	X	0	0	0
2	1	X	0	0
3	0	0	X	0
4	0	0	0	X

Например, если в результате замера активного электрического сопротивления между 1-й и 2-й цепями, когда плюс измерителя подключен к 1-й цепи, а минус – ко 2-й, получено значение больше минимально допустимого, то в матрицу заносится значение «0», что соответствует характеристике «Норма». Если в результате замера активного электрического сопротивления между 1-й и 2-й цепями, когда плюс измерителя подключен ко 2-й цепи, а минус – к 1-й, получено значение меньше минимально допустимого, то в матрицу заносится значение «1», что соответствует характеристике «Не норма», то есть между цепями 1 и 2 существует электрическая связь. Данная ситуация встречается достаточно часто при возникновении неисправностей в электрических цепях. Отсутствие электрической связи между цепями при проверке по одной полярности и наличие электрической связи между этими же цепями при проверке по другой полярности свидетельствует о повреждении кабеля и появлении так называемого «диодного эффекта» вследствие попадания влаги в место повреждения кабеля.

Если пренебречь влиянием реактивного сопротивления на проводимые замеры (короткий кабель, эксплуатируемый в нормальных условиях), то для принятия решения об исправности кабеля возможно построить только одну часть матрицы сопротивлений (односторонние измерения), так как допускается, что обе части матрицы подобны. Для построения матрицы сопротивлений возможно использовать варианты методик электрической проверки, представленные в табл. 2, при условии, что проверяемая электрическая схема кабеля – с разобщенными цепями. В табл. 2 позицией **Р** обозначен «плюс» измерителя, а позицией **Н** – «минус».

Таблица 2

Количество измерений для различных методик

№ изм.	Двусторонние измерения				Односторонние измерения			
	«точка – точка»		«точка – группа»		«точка – точка»		«точка – группа»	
	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н
1	1	2	1	234	1	2	1	234
2	1	3	2	134	1	3	2	134
3	1	4	3	124	1	4	3	124
4	2	3	4	123	2	3	4	123
5	2	4	–	–	2	4	–	–
6	3	4	–	–	3	4	–	–
7	4	1	–	–	–	–	–	–
8	4	2	–	–	–	–	–	–
9	4	3	–	–	–	–	–	–
10	3	2	–	–	–	–	–	–
11	3	1	–	–	–	–	–	–
12	2	1	–	–	–	–	–	–

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что применение методики «точка – группа» позволяет уменьшить количество измерений в три раза по сравнению с методикой «точка – точка».

Используя методы комбинаторики [6] для определения предельного количества двусторонних и односторонних измерений ЭКС, имеющей n проверяемых на разобшение цепей, можно получить следующие зависимости для методики «точка – точка»:

– количество измерений, выполненных для двусторонних измерений:

$$A_n = A_{n_{\min}} = A_{n_{\max}} = n(n - 1);$$

– количество измерений, выполненных для односторонних измерений:

$$A_n = A_{n_{\min}} = A_{n_{\max}} = \frac{n(n-1)}{2}.$$

Двусторонние и односторонние измерения для методики «точка – группа» не различимы из-за организации порядка проверки (табл. 2), в связи с чем можно установить следующие зависимости для определения предельного количества измерений ЭКС, имеющей n проверяемых на разобшение цепей:

– минимальное количество измерений для двусторонних и односторонних измерений:

$$B_{n_{\min}} = n;$$

– максимальное количество измерений для двусторонних и односторонних измерений:

$$B_{n_{\max}} = 2n.$$

Минимальное и максимальное количество измерений для методики «точка – группа» обусловлено тем, что в случае установления факта исправности ЭКС достаточно провести минимальное количество измерений $V_{n_{\min}}$, а если необходимо определить в неисправной ЭКС конкретные связанные электрические цепи, то максимально потребуется провести $V_{n_{\max}}$ измерений.

Выбор использования односторонних или двусторонних измерений обусловлен состоянием ЭКС и условиями ее эксплуатации. Если известно, что ЭКС имеет простую структуру и эксплуатируется в неэкстремальных условиях, то вероятность возникновения «диодного эффекта» мала. В связи с этим отсутствует необходимость проводить измерения по двум полярностям.

Для часто используемых кабелей с 50 электрическими цепями, проверяемыми на разоб- щение, результаты расчета предельных количеств измерений приведены в табл. 3, где **I** – результаты для односторонних измерений, **II** – результаты для двусторонних измерений.

Таблица 3

Результаты расчета предельных количеств измерений для 50 электрических цепей

«Точка – точка»		«Точка – группа»	
II	I	II	I
A_n		$V_{n_{\min}}$	
		50	50
2450	1225	$V_{n_{\max}}$	
		100	100

Время диагностирования ЭКС напрямую зависит от количества выполненных измерений. Время, затрачиваемое на измерение, включает в себя время, которое требуется на проведение коммутации цепей, и время работы измерителя. Полученные результаты расчета показывают, что использование устройств с объединением проверяемых цепей в различные группы дает возможность сократить количество коммутаций и проводимых проверок, а это, в свою очередь, позволяет сократить время диагностирования ЭКС, которое занимает до 37% от общего времени устранения неисправностей [7].

Способ усовершенствования устройств диагностирования электрических кабельных систем с целью сокращения времени проверок может заключаться в использовании адаптивной коммутации электрических цепей ЭКС, которая будет использовать методику объединения проверяемых цепей в группы.

При использовании устройств с объединением проверяемых цепей в группы суммарное активное электрическое сопротивление этих цепей по сути является параллельным соединением сопротивлений, поэтому при проведении проверок по методике «точка – группа» измеренное сопротивление между «точкой» и «группой» будет меньше реальных значений сопротивлений между «точкой» и другими цепями, входящими в «группу», или равно им. Соответственно, проверка ЭКС с использованием методики «точка – точка» проводится более качественно, чем с использованием методики «точка – группа», но за большее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время на космодроме Плесецк применяют автоматизированные устройства диагностирования ЭКС подготовки и пуска РКН, использующие методику проверки разоб- щенности электрических цепей по типу «точка – точка», основным недостатком которой является значительное время, затрачиваемое на проведение проверок. За счет применения

устройства контроля и коммутации цепей «ИРА» (измерительный релейный аппарат), обладающего возможностью объединения нескольких проверяемых цепей в группу, можно значительно сократить время диагностирования ЭКС [8]. Реализация в данных устройствах адаптивной коммутации электрических цепей позволит проводить коммутацию не только по программе, но и с учетом предыдущих измерений, что существенно сократит время, затрачиваемое на проверку разобщенности электрических цепей.

Список используемых источников

1. *Шимарев В.Ю.* Автоматика: учебник для СПО. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 284 с.
2. ГОСТ Р 56602-2015. Слаботочные системы. Кабельные системы. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
3. ГОСТ 24291-90. Электрическая часть электростанции и электрической сети. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2005. – 14 с.
4. *Игнатьев С.В., Тихонов В.Б., Беглецов А.А.* Средства автоматизации системы управления техническим диагностированием радиоэлектронной аппаратуры // Программные продукты и системы. – 2013. – № 1. – С. 103–108. – URL: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=3393> (дата обращения: 23.09.2019).
5. *Покотило Н.Н.* Измерение электрического сопротивления жил контрольных кабелей с помощью мостов постоянного тока // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2213> (дата обращения: 23.09.2019).
6. *Баврин И.И., Матросов В.Л.* Краткий курс теории вероятностей и математическая статистика. – М.: Прометей, 1989. – 135 с.
7. *Железняков А.Б.* Тайны ракетных катастроф. Плата за прорыв в космос. – М.: Яуза, 2011. – 31 с.
8. Патент на изобретение №2693884. Устройство контроля и коммутации цепей «ИРА» (измерительный релейный аппарат) / Миляев И.К., Малаев М.А. – Государственный реестр изобретений РФ; выдан 05.07.2019.

В.И. Горбулин,
доктор техн. наук, профессор;
 Н.В. Радионов,
доктор экономических наук, доцент;
 А.И. Ратушняк,
кандидат техн. наук, доцент;
 Г.Б. Стеганов,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассмотрены математические аспекты обоснования рациональной структуры системы генерирования электроэнергии (СГЭЭ) космического аппарата (КА) по условию обеспечения максимальной выработки электроэнергии в условиях неполной и неравномерной освещенности панелей непланарной солнечной батареи КА. В результате разработана методика обоснования структуры СГЭЭ с возможностью оптимизации числа точек суммирования мощностей элементарных генераторов и, соответственно, числа экстремальных регуляторов в составе СГЭЭ.

Ключевые слова: космический аппарат, система генерирования электрической энергии, солнечная батарея, экстремальный регулятор мощности, математическая постановка задачи, методика обоснования структуры.

Система генерирования электрической энергии (СГЭЭ) КА представляет собой совокупность источников и преобразователей электрической энергии (ЭЭ), устройств стабилизации их напряжений и частот, устройств параллельной работы, защиты, управления и контроля, обеспечивающих производство электрической энергии и поддержание ее характеристик в заданных пределах в точках регулирования во всех режимах работы системы.

Первичным источником ЭЭ в составе СГЭЭ КА является солнечная батарея (СБ), которая из конструктивных соображений и для обеспечения требуемых электрических и электромагнитных характеристик разделяется на ряд конструктивных блоков (КБ). Тепловые и электрические характеристики даже однотипных КБ при их большом числе могут существенно различаться, что снижает их суммарную располагаемую мощность. Задача выбора рациональных структур таких СГЭЭ, снабженных экстремальными регуляторами мощности для обеспечения их максимальных энергетических возможностей, таким образом, является актуальной.

Под структурой СГЭЭ (в части производства электроэнергии), обозначаемой далее $S_{СГЭЭ}$, понимается совокупность КБ, объединяющих в своем составе ряд элементарных генераторов (ЭГ) одной или нескольких створок и панелей СБ, связанных между собой кабельной сетью в точках суммирования и регулирования мощностей на входе одного из экстремальных регуляторов мощности (ЭРМ, РМ). Примеры конструктивных блоков СБ и их элементов представлены на рис. 1.

Солнечная батарея состоит из $M_{\text{панел}}$ 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 солнечных элементов (СЭ). При этом общее количество N СЭ в батарее будет определяться произведением: $N = M_{\text{панел}} \cdot \tilde{K} \cdot R \cdot n_s$, а количество $G_{\tilde{k}}$ элементарных генера-

торов 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 $G_{СБ}$ определяется как произведение количества створок на количество $G_{\tilde{k}}$ элементарных генераторов в каждой створке:

$$G_{СБ} = M_{\text{панел}} \cdot \tilde{K} \cdot G_{\tilde{k}} = K_{\text{створок}} \cdot G_{\tilde{k}}.$$

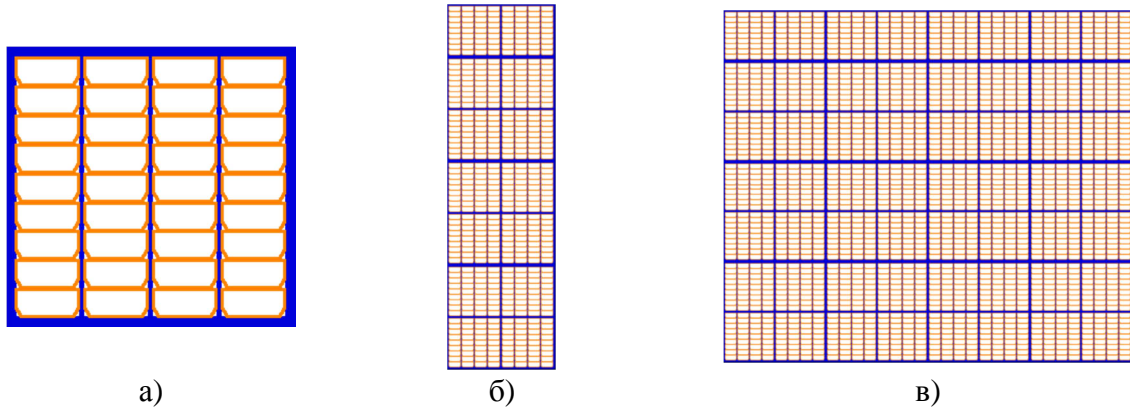


Рис. 1. Элементы типичных КБ СБ: модуль – сборка ФЭП (а), створка (б), панель (в)

В соответствии с конструкцией и электрической схемой солнечной батареи множество $M_{N\text{СЭ}} = \overline{1, \dots, N}$ номеров солнечных элементов разбито на $G_{СБ}$ непересекающихся подмножеств $M_{g\text{СЭ}}$:

$$\bigcup_{g=1}^{G_{СБ}} M_{g\text{СЭ}} = M_{N\text{СЭ}},$$

и содержит номера СЭ, образующих g -й элементарный генератор.

Кроме того, множество $M_{G_{СБ}\text{ЭГ}} = \overline{1, \dots, G_{СБ}}$ номеров элементарных генераторов разбито на $K_{\text{створок}}$ непересекающихся подмножеств $M_{\tilde{k}\text{ЭГ}}$ по количеству створок:

$$\bigcup_{\tilde{k}=1}^{K_{\text{створок}}} M_{\tilde{k}\text{ЭГ}} = M_{G_{СБ}\text{ЭГ}}.$$

Для КА дистанционного зондирования Земли угол вращения – угол разворота корпуса КА вокруг оптической оси телескопа – не является критически важным при выполнении целевых задач или во время сеансов связи. Поэтому имеется возможность выбирать такие его значения, чтобы затененными оказывались одни и те же створки панелей солнечных батарей. Если принять порядок нумерации с первой из таких створок, то множество створок, которые могут быть разделены на освещенную и затененную части, можно представить в следующем виде:

$$M_{K_{\text{створ}}^{\text{тень}}} = \{1, 2, \dots, K_{\text{створ}}^{\text{тень}}\},$$

где $K_{\text{створ}}^{\text{тень}}$ – количество створок, попадающих в область затенения на достаточно продолжительном интервале времени.

Причем общее количество K конструктивных единиц в солнечной батарее и, соответственно, точек суммирования мощностей и экстремальных регуляторов мощности изменяется в пределах от 1 до $K_{\text{пред}} = 2 \cdot K_{\text{створ}}$, т. е.

$$K \in \Delta_K^{\text{доп}}, \Delta_K^{\text{доп}} = \overline{1, \dots, K_{\text{пред}}}, K_{\text{пред}} = 2 \cdot K_{\text{створ}}.$$

Формально структура СГЭЭ может быть представлена в виде множества разнотипных элементов (математической конструкции) следующего вида:

$$S_{\text{СГЭЭ}} = \{K, K_{\text{створ}}^{\text{тенев}}, \Theta\} = \left\{ \begin{array}{l} K, K_{\text{створ}}^{\text{тенев}}, M_{1 \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}, M_{2 \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}, \dots, M_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}, \\ M_{1 \text{ ЭГ}}^{\text{тенев}}, M_{2 \text{ ЭГ}}^{\text{тенев}}, \dots, M_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} \text{ ЭГ}}^{\text{тенев}}, \\ M_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} + 1 \text{ ЭГ}}, \dots, M_{K_{\text{створ}} \text{ ЭГ}} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где $M_{1 \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}, M_{2 \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}, \dots, M_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}$ – множества номеров ЭГ, расположенных на полностью освещенных створках.

Областью $\Delta_{S_{\text{СГЭЭ}}}^{\text{доп}}$ допустимых значений структуры $S_{\text{СГЭЭ}}$ является пересечение множеств $\Delta_K^{\text{доп}}$, $\Delta_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}}}^{\text{доп}}$ и $\Delta_M^{\text{доп}}$:

$$\Delta_{S_{\text{СГЭЭ}}}^{\text{доп}} = \Delta_K^{\text{доп}} \times \Delta_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}}}^{\text{доп}} \times \Delta_M^{\text{доп}}, \quad (2)$$

$$\Delta_K^{\text{доп}} = \overline{1, \dots, K_{\text{пред}}}, K_{\text{пред}} = 2 \cdot \tilde{K}, \quad \Delta_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}}}^{\text{доп}} = \overline{0, \dots, \tilde{K}} \quad (3)$$

$$\Delta_M^{\text{доп}} = \left\{ \begin{array}{l} M_{1 \text{ ЭГ}} \times M_{2 \text{ ЭГ}} \times \dots \times M_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} \text{ ЭГ}} \times \dots \times M_{K_{\text{створ}} \text{ ЭГ}}, \\ M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}} \subseteq M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}, M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{тенев}} \subseteq M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}, \\ M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}} \cup M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}^{\text{тенев}} = M_{\tilde{k} \text{ ЭГ}}, \tilde{k} = 1, \dots, K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} \text{ ЭГ} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где $\Delta_M^{\text{доп}}$ – допустимое множество вариантов Θ разбиений (распределений) множества элементарных генераторов по конструктивным блокам с учетом топологии электрических соединений и конструкторской схемы расположения элементов конструкции СБ:

$$\Theta = \left\{ \begin{array}{l} M_{1 \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}, M_{2 \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}, \dots, M_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} \text{ ЭГ}}^{\text{освещ}}, M_{1 \text{ ЭГ}}^{\text{тенев}}, M_{2 \text{ ЭГ}}^{\text{тенев}}, \dots, M_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} \text{ ЭГ}}^{\text{тенев}}, \\ M_{K_{\text{створ}}^{\text{тенев}} + 1 \text{ ЭГ}}, \dots, M_{K_{\text{створ}} \text{ ЭГ}} \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Поиск приемлемого решения на полном множестве альтернатив (2) с математической и с технической точки зрения представляется неоправданно трудоемкой задачей, поскольку значительная часть структур, удовлетворяющих условию (2), не может быть реализована конструктивно. Анализ особенностей конструктивно-компоновочной и электрической схем СБ позволил сократить число сравниваемых структур СГЭЭ до набора допустимых альтернатив (рис. 2), а именно:

1. Все элементарные генераторы СБ объединены в единую точку суммирования мощностей; СГЭЭ имеет в своем составе один экстремальный регулятор, т. е. в свете принятой тер-

минологии СГЭЭ включает в себя только один конструктивный блок генерирования электроэнергии, $K=1$. Следует подчеркнуть, что СГЭЭ многих современных КА имеют именно такую структуру (рис. 2,а).

2. Все элементарные генераторы панелей СБ объединены в одну из двух точек суммирования мощностей; СГЭЭ имеет в своем составе столько конструктивных блоков и экстремальных регуляторов, сколько в СБ имеется пар панелей, т. е. $K = \frac{1}{2} M_{\text{панел}}$ (рис. 2,б).

3. Элементарные генераторы каждой из панелей СБ объединены в одну точку суммирования мощностей; СГЭЭ имеет в своем составе столько конструктивных блоков и экстремальных регуляторов, сколько в СБ имеется панелей, т. е. $K = M_{\text{панел}}$ (рис. 2,в).

4. Элементарные генераторы каждой панели СБ объединены не более чем в две точки суммирования мощностей; СГЭЭ имеет в своем составе столько конструктивных блоков и экстремальных регуляторов, сколько в СБ имеется пар створок, т. е. $K = \frac{1}{2} M_{\text{панел}} \cdot \tilde{K}$ (рис. 2,г).

5. Элементарные генераторы каждой створки СБ объединены в единую точку суммирования мощностей; СГЭЭ имеет в своем составе столько конструктивных блоков и экстремальных регуляторов, сколько створок в СБ, т. е. $K = K_{\text{створок}} = M_{\text{панел}} \cdot \tilde{K}$ (рис. 2,д).

Особенностью формулируемой задачи является существующая в общем случае возможность частичного затенения поверхностей одной или нескольких панелей элементами конструкции КА. Например, при расположении панелей ниже среза приборно-агрегатного отсека, чем при $K=1$, обусловлен полимодальный характер вольт-ваттной характеристики СБ.

Множество $\Delta_{\text{СГЭЭ}}^{\text{доп}}$ допустимых структур во всех случаях формируется на основе структурного деления панелей СБ с учетом ограничений, обусловленных требованиями минимизации изменений электрических соединений в первичном источнике энергии.

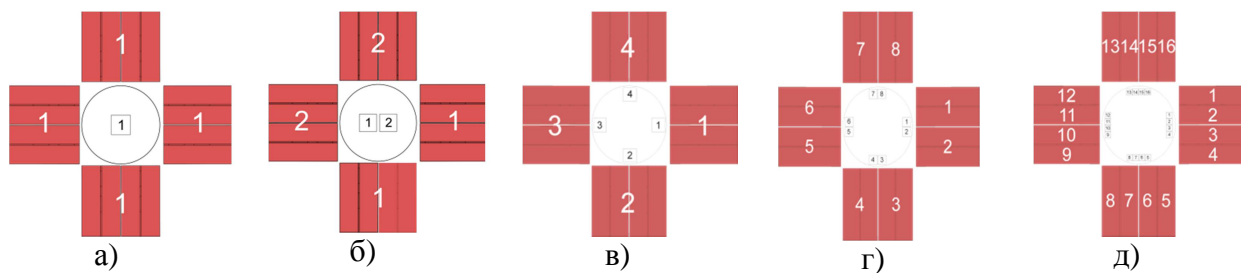


Рис. 2. Варианты разбиения СБ на конструктивные блоки для каждого ЭРМ при четырех панелях (вид сверху, числа на панелях показывают номер ЭРМ)

Содержательная постановка задачи оптимизации структуры СГЭЭ может быть представлена следующим образом. Для заданной конструкции и условий (в том числе и сценария) применения КА необходимо определить совокупность связей конструктивных блоков (КБ) солнечной батареи и входов экстремальных регуляторов мощности, обеспечивающую такое число K точек суммирования мощностей КБ на входах ЭРМ, при котором система генерирования производит в течение заданного времени наибольшее количество электроэнергии с учетом различий в теплофизических условиях работы КБ, реальной динамики их освещения и затенения, а также определяемых сценарием циклограмм электропотребления и КПД регуляторов.

Варианты сравниваемых структур показаны на рис. 3 и 4.

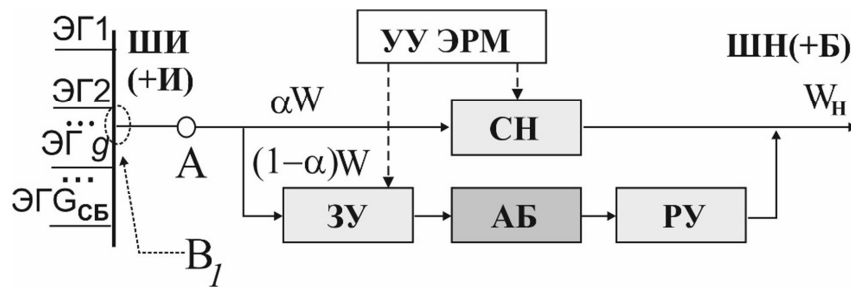


Рис. 3. Вариант структуры системы с одним ЭРМ ($K=1$) на основе ЗУ-СН

На рис. 3 представлен основной применяемый в настоящее время вариант построения системы. Зарядное и разрядное устройства (ЗУ, РУ), а также централизованный стабилизатор напряжения (СН) входят в комплекс автоматики и стабилизации (КАС). Исполнительными органами ЭРМ (РМ) служат силовые цепи ЗУ и СН. Суммирование потоков мощности от всех ЭГ осуществляется в одной точке B_1 ($K=1$). Точка А – электрический вход КАС. ШИ (+И), ШИ (+Б) – соответственно плюсовые шины СБ и аккумуляторной батареи.

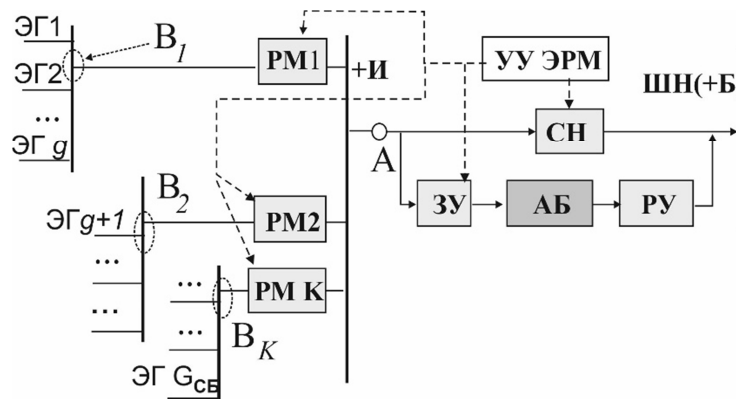


Рис. 4. Вариант структуры системы с выделенными РМ (ЭРМ) конструктивных блоков:
 B_k – точки суммирования мощности КБ, $k = 1, \dots, K$, где K – число точек

В отличие от структуры с общим ЭРМ вариант системы с $K > 1$, представленный на рис. 4, содержит для каждого КБ (группы ЭГ) выделенные индивидуальные ЭРМ (РМ), на входах которых суммируются мощности соответствующих ЭГ. Естественно, что все РМ и соединительные цепи СГЭЭ обладают некоторыми потерями передаваемой электроэнергии, учет которых обеспечивается уточненной формулой КПД РМ.

Пусть W суммарное количество электроэнергии, доставляемое в общем случае с потерями в точку А. На вход СН приходит часть сгенерированной энергии αW , а ее оставшаяся часть $(1-\alpha)W$ достигает шин нагрузки (ШН) по цепи ЗУ, АБ, РУ. Коэффициент α прямой передачи сгенерированной энергии зависит от смещения циклограмм генерирования и потребления ЭЭ и от особенностей сценария применения КА (например, работа целевых систем только от АБ). Все импульсные регулируемые преобразователи (ИРП) характеризуются некоторыми значениями КПД, определяющими в совокупности потери энергии при ее передаче на ШН СЭС. Для упрощения решаемой задачи транспортные потери электроэнергии в кабельных сетях, в токосборных и распределительных шинах СГЭЭ учитываются в уточненных значениях КПД соответствующих ИРП.

Физические обоснования существования оптимального числа K и, соответственно, оптимальной структуры СГЭЭ с экстремальным регулированием мощности заключаются в следующем:

- при увеличении K мощность и количество генерируемой электроэнергии растут вследствие суммирования максимальных мощностей КБ с различающимися напряжениями;
- одновременно с увеличением K неизбежно снижается расчетная мощность, а значит, и КПД силовой части регулятора мощности РМ каждого КБ, что при достаточно больших K может привести к уменьшению КПД СГЭЭ и ее суммарной выходной мощности.

Следовательно, для нахождения оптимальной структуры СГЭЭ необходимо располагать зависимостями суммарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) каждой из групп КБ, объединяемых на входе каждого РМ, и максимальной мощности СБ от числа K с учетом частичных затенений групп ФЭП в КБ. Кроме того, необходимо получить зависимость рабочего КПД η_i каждого импульсного преобразователя-регулятора РМ от его выходной мощности, числа K и текущей мощности нагрузки P_i (или коэффициента нагрузки $K_\beta = P_i / P_{i\text{НОМ}}$), т. е. получить функцию $\eta_i = f(P_{i\text{НОМ}}, K_\beta)$ и учесть при этом, что для РМ (ЭРМ) $P_{i\text{НОМ}} = P_{\text{СБ}} / K$.

Таким образом, целевая функция для оптимизации структуры СГЭЭ при V -й реализации программы Π_V этапов применения КА и энергопотребления бортовыми системами может быть представлена в следующем виде:

$$W_{\text{СГЭЭ}V}(S_{\text{СГЭЭ}}; \Pi_V) = W_{\text{СГЭЭ}V}(K, K_{\text{СВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}}, \Theta; \Pi_V) = \int_{T_{\text{ОУО}}} P_{\text{СГЭЭ}V}(t, K, K_{\text{СВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}}, \Theta; \Pi_V) dt, \quad (6)$$

$$P_{\text{СГЭЭ}}(t, K, K_{\text{СВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}}, \Theta; \Pi_V) = \begin{cases} P_{\text{МАКС ЭРМ1}}(t, K, K_{\text{СВОР}}^{\text{ТЕН}}, \Theta, \Pi_V), & K = 1; \\ \sum_{k=2}^K \eta_k(P_{k\text{НОМ}}, K_\beta) \cdot P_{\text{МАКС ЭРМ}k}(t, K, K_{\text{СВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}}, \Theta, \Pi_V), & K > 1. \end{cases} \quad (7)$$

Целью оптимизации структуры СГЭЭ на всём множестве M_Π реализаций программ Π_V этапов применения КА и энергопотребления бортовыми системами является нахождение максимума математического ожидания $\bar{W}_{\text{СГЭЭ}}$ количества генерируемой электроэнергии бортовой системой электроснабжения на освещенных участках орбиты:

$$\bar{W}_{\text{СГЭЭ}}(S_{\text{СГЭЭ}}) = \frac{\sum_{v=1}^{N_\Pi} W_{\text{СГЭЭ}v}(S_{\text{СГЭЭ}}; \Pi_V)}{N_\Pi} = \frac{\sum_{v=1}^{N_\Pi} \int_{T_{\text{ОУО}}(\Pi_V)} P_{\text{СГЭЭ}v}(t, S_{\text{СГЭЭ}}; \Pi_V) dt}{N_\Pi}. \quad (8)$$

На основе вышеизложенного материала сформулируем математическую постановку задачи оптимизации структуры системы генерирования электроэнергии, которая может быть представлена в следующем виде. Пусть заданы:

- 1) даты и моменты времени начала и окончания исследуемого временного интервала

$T_{\text{ИССЛЕД}} = [t_0, t_{K_{\text{ГРАН}}}]$, начальное положение X_0 КА в момент t_0 , $X_0 = X(t_0)$, а также известны вектор $M_{\text{СОЛН}} = [B_L, B_{\dot{\lambda}}, B_e, B_\Omega, B_\epsilon, B_\lambda]^T$ параметров модели видимого движения Солнца, где B_L – вектор коэффициента аппроксимирующего полинома для расчета средней долготы Солнца; $B_{\dot{\lambda}}$ – вектор коэффициента аппроксимирующего полинома для расчета средней долготы солнечного перигея как функции времени; B_e – вектор коэффициента аппроксими-

рующего полинома для расчета эксцентриситета орбиты Земли как функции времени; B_{Ω} – вектор коэффициента аппроксимирующего полинома для расчета средней долготы восходящего узла орбиты на эклиптике как функции времени; B_{ϵ} – вектор коэффициента аппроксимирующего полинома для расчета среднего наклона эклиптики к экватору Земли как функции времени; B_{λ} – вектор коэффициента аппроксимирующего полинома для расчета долготы Солнца как функции времени;

2) V -тая реализация ($v=1\dots N_{\Pi}, N_{\Pi}$ – количество реализаций) программы Π_v этапов применения КА и энергопотребления бортовыми системами, формализованно представленная как множество параметров в виде

$$\Pi_v = \{K_{\text{этап}}, G_{\text{этап}}, P_{\text{этап}}, P_{\text{эл.потр.БС}}, A, D, Gm, B, Tmp\}, \Pi_v \subset M_{\Pi}, \quad (9)$$

- где V – номер реализации программы этапов применения КА и энергопотребления бортовыми системами;
- M_{Π} – множество программ этапов применения КА и энергопотребления бортовыми системами;
- $K_{\text{этап}}$ – количество этапов применения КА на исследуемом интервале времени;
- $G_{\text{этап}}$ – вектор моментов смены этапов применения КА;
- $P_{\text{эл.потр.БП}}$ – матрица задействования и электропотребления бортовых систем: количество строк в матрице соответствует общему числу бортовых систем, а столбцов – количеству этапов; при этом каждая строка матрицы содержит текущее значение потребляемой мощности соответствующей бортовой системы на данном этапе применения КА;
- A, D, Gm – векторы размерности $H + 1$, содержащие значения углов ориентации $\alpha(t), \delta(t), \gamma(t)$ корпуса КА в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат в дискретные моменты времени на всём моделируемом периоде (H – количество промежутков времени прогнозирования);
- B – матрица размерности $[N \times H + 1]$, содержащая значения углов рассогласования $\beta(t)$ между направлением на Солнце и нормалью к поверхности каждого ФЭП в дискретные моменты времени, т. е.

$$T_{n0} = T_n(t_0), \quad T_{n0} = T(t_0 + \tau), \dots, T_{nH} = T(t_0 + H \cdot \tau) \quad \forall n = 1, \dots, N,$$

где n – номер ФЭП,

N – их количество;

- Tmp – матрица размерности $[N, H + 1]$, содержащая значения температуры каждого ФЭП в дискретные моменты времени;

3) оператор $\text{Oper1}(i, g)$, ставящий в соответствие геометрическое положение (или порядковый номер n) каждого ФЭП на КБ и его позицию (i, g) на электрической схеме створок СБ (рис. 5);

4) оператор $\text{Oper2}_{\text{ЭРМ}}$, ставящий в соответствие составу $M_{N_k \text{ КБ}}(S_{\text{СГЭЭ}})$ заданного конструктивного блока, набору $V_{\text{ВАХ}n}$ параметров вольт-амперных характеристик (ВАХ), угловым коэффициентам $q_{\text{лучэнл}}$ взаимного переизлучения лучистой энергии, текущим значениям

температуры $T_{\text{ФЭП}n}(t)$ каждого ФЭП, входящего в состав КБ, значение максимальной мощности $P_{\text{maxЭРМ}k}(t)$ [здесь n – номер ФЭП, $n = \text{Oper1}(i, g)$; $M_{N_k \text{ КБ}}$ – множество ФЭП, входящих в состав k -го конструктивного блока (k – номер КБ), $k = 1, \dots, K$; $S_{\text{СГЭЭ}}$ – структура СГЭЭ]:

$$P_{\text{maxЭРМ}k}(t) = \text{Oper2}_{\text{ЭРМ}}(M_{N_k \text{ КБ}}(S_{\text{СГЭЭ}}), T_{\text{СЭ}n}(t), V_{\text{ВАЗ}n}, q_{\text{лучЭП}n}); \quad (10)$$

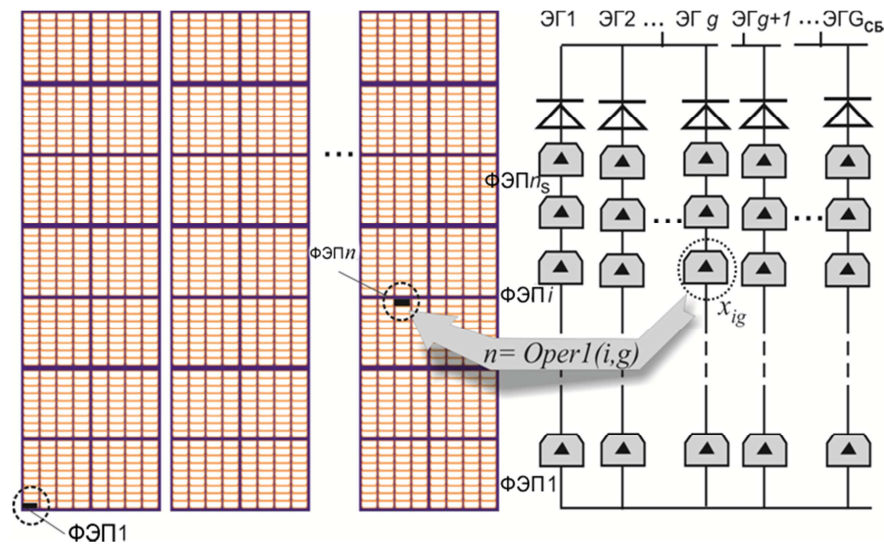


Рис. 5. Формирование расчетной электрической схемы СБ по конструктивной схеме с применением оператора **Oper1** для вычисления $W(K)$ с учетом геометрии частичной тени

5) модель функционирования ЭРМ, которая определена следующими параметрами и зависимостями: $P_{1НОМ}$ – паспортные значения номинальной (расчетной) мощности регулятора мощности; $\eta_{1НОМ}$ – паспортные значения номинального (расчетного) КПД регулятора мощности; $\alpha_{\text{ср}}$ – эквивалентный усредненный коэффициент теплоотдачи, зависящий от способа теплоотвода, но принимаемый одинаковым для всех ЭРМ в некотором ограниченном диапазоне их мощностей; $S_{1ОХЛ}$ – площадь поверхности, отводящей тепловой поток от регулятора;

6) структура $S_{\text{СГЭЭ}} = [K, K_{\text{створ}}^{\text{тень}}, \Theta]^T$ системы генерирования электроэнергии, которая формально задается количеством K конструктивных блоков и соответствующих РМ, количеством $K_{\text{створ}}^{\text{тень}}$ створок, попадающих в область затенения на достаточно продолжительном интервале времени, и вариантом Θ разбиений (распределений) множества элементарных генераторов по конструктивным блокам с учетом топологии электрических соединений и конструкторской схемы расположения элементов конструкции СБ, формализуемых оператором **Oper1**.

Используя приведенные выше данные, требуется определить оптимальную структуру $S_{\text{СГЭЭ}}^* = (K^*, K_{\text{створ}}^{\text{тень}*}, \Theta^*)$ СГЭЭ, обеспечивающую максимум математического ожидания $\bar{W}_{\text{СГЭЭ}}^*$ количества генерируемой электроэнергии бортовой СЭС на освещенных участках орбиты на всём множестве M_{Π} реализаций программ этапов применения КА и энергопотребления бортовыми системами:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{СГЭЭ}}^* &= (K^*, K_{\text{СТВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}*}, \Theta^*) = \arg \max_{S_{\text{СГЭЭ}} \in S_{\text{СГЭЭ}}^{\text{ДОП}}} \bar{W}_{\text{СГЭЭ}}(S_{\text{СГЭЭ}}) = \\
 &= \arg \max_{(K, K_{\text{СТВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}}, \Theta) \in \Delta_K^{\text{ДОП}} \times \Delta_{K_{\text{СТВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}}}^{\text{ДОП}} \times \Delta_{\Theta}^{\text{ДОП}}} \bar{W}_{\text{СГЭЭ}}(K, K_{\text{СТВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}}, \Theta), \quad (11)
 \end{aligned}$$

т. е. определить такое количество K^* конструктивных блоков, чтобы соответствующие ему вариант Θ распределения множества элементарных генераторов в системе генерирования электроэнергии и количество $K_{\text{СТВОР}}^{\text{ТЕНЕВ}}$ створок, попадающих в область затенения на продолжительном интервале времени, были оптимальными.

Воспользуемся методикой обоснования структуры системы генерирования электрической энергии. Для решения сформулированной в общем виде задачи необходимо получить зависимость рабочего КПД $\eta_{i\text{НОМ}}$ каждого ИРП (РМ, ЗУ, РУ, СН) от его номинальной выходной мощности $P_{i\text{НОМ}}$. Также следует установить математическую взаимосвязь текущего рабочего КПД ИРП, величины $\eta_{i\text{НОМ}}$ и коэффициента нагрузки $K_{\beta} = P_i / P_{i\text{НОМ}}$.

Примем ряд обоснованных в [2] допущений.

1. Пусть все импульсные регулируемые преобразователи (ИРП) – РМ, ЗУ, РУ, СН для СГЭЭ КА изготавливает одно и то же предприятие по унифицированным структурным электрическим схемам. Пусть все ЭРМ имеют одинаковые номинальные напряжения. В этих условиях логично предположить, что зависимости $\eta = f(K_{\beta})$ всех импульсных преобразователей из определенного ряда мощностей будут одинаковы по форме. Кроме того, все преобразователи спроектированы на одинаковую величину предельного перегрева τ [1] или на одинаковую расчетную температуру теплосъемных панелей (плит), что при одинаковой технологии производства практически одно и то же. Далее рассмотрим все соотношения для ИРП на примере РМ (ЭРМ).

2. РМ считаем однородным телом, внутри которого равномерно распределены источники тепловыделения. Формула для установившегося значения перегрева ЭРМ с известными параметрами номинального режима имеет следующий вид [1]:

$$\tau = \frac{P_{i\text{НОМ}}(1 - \eta_{i\text{НОМ}})}{\alpha S_{i\text{ОХЛ}}}, \quad (12)$$

где $P_{i\text{НОМ}}$ – паспортные значения номинальной (расчетной) мощности ЭРМ;

$\eta_{i\text{НОМ}}$ – паспортные значения номинального (расчетного) КПД ЭРМ;

α – эквивалентный усредненный коэффициент теплоотдачи, зависящий от способа теплоотвода, но принимаемый одинаковым для всех ЭРМ в некотором ограниченном диапазоне их мощностей [1];

$S_{i\text{ОХЛ}}$ – площадь поверхности ЭРМ, отводящей тепловой поток.

3. Пусть все РМ имеют форму куба со стороной a , причем теплоотвод осуществляется от одной из граней куба. Тогда для рассматриваемого ЭРМ ($a = a_1$) поверхность теплоотвода

$$S_{i\text{ОХЛ}} = a_1^2, \quad (13)$$

а его объем

$$V_1 = a_1^3. \quad (14)$$

Несмотря на то, что в общем случае математическая связь объема и выходной мощности РМ является нелинейной, для изделий различной мощности $P_{i\text{НОМ}}$ одного изготовителя, вы-

полненных по одинаковым электрическим структурным схемам, можно считать удельную мощность всех РМ $g_v = \text{const}$ в ограниченном диапазоне мощностей.

Тогда взаимосвязь номинальной мощности и объема РМ выражается линейной функцией:

$$P_{i\text{НОМ}} = g_v V_i. \quad (15)$$

Если примем, что для любого РМ в рассматриваемом диапазоне номинальных мощностей значение расчетного перегрева τ_i , определяемого соотношением (12), одинаково, то получим, используя (12)–(15), следующее соотношение:

$$\eta_{i\text{НОМ}} = 1 - \frac{a_1}{a_i} (1 - \eta_{i\text{НОМ}}) = 1 - \sqrt[3]{\frac{P_{i\text{НОМ}}}{P_{i\text{НОМ}}}} (1 - \eta_{i\text{НОМ}}). \quad (16)$$

Данное соотношение выражает зависимость номинального КПД от номинальной мощности ЭРМ в рассматриваемом диапазоне мощностей.

Зависимости $\eta_i = f(K_\beta)$ для ряда бортовых импульсных преобразователей [1] с достаточной точностью аппроксимируются полиномиальной функцией (рис. 6):

$$\eta_{\text{PM}i} = (b_1 U^2 + b_2 U - b_3) \times 0,01 K_\beta^2 + (b_4 U^2 - b_5 U + b_6) \times 0,1 K_\beta - b_7 U^2 + b_8 U + \eta_{i\text{НОМ}} - b_9, \quad (17)$$

где $b_1 = -0,000005773$ ($1/B^2$), $b_2 = 0,0003953$ ($1/B$), $b_3 = 0,0071456$, $b_4 = 0,00009302$ ($1/B^2$), $b_5 = -0,06456492$ ($1/B$), $b_6 = 0,1176649$, $b_7 = 0,00332625$ ($1/B^2$), $b_8 = 0,022742312$ ($1/B$), $b_9 = 0,41106654$.

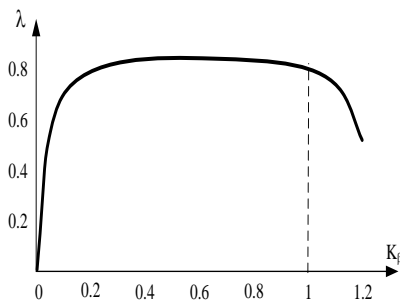


Рис. 6. График зависимости КПД РМ от K_β

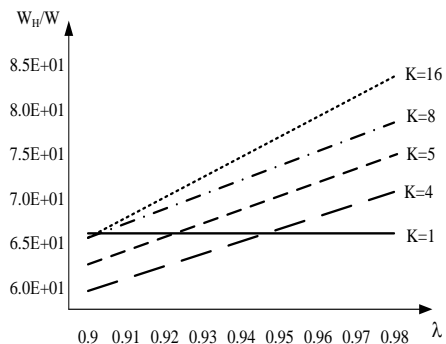


Рис. 7. Зависимости относительной энергии W_H/W от КПД РМ при $\alpha=0,3$

Выражения для КПД остальных ИРП (ЗУ, РУ, СН) отличаются от приведенного выше только значениями параметров – констант.

На основании анализа структур, согласно рис. 2–4, запишем в общем виде зависимость количества электроэнергии W_H , полученной потребителями на ШН за время T , от целочисленного параметра K :

$$W_H = W(K) \left[\alpha \eta_{\text{СН}}(K_{\beta\text{СН}}) + (1 - \alpha) \times \eta_{\text{ЗУ}}(K_{\beta\text{ЗУ}}) \times \eta_{\text{АБ}} \times \eta_{\text{РУ}}(K_{\beta\text{РУ}}) \right], \quad (18)$$

где $\eta_{\text{СН}}(K_{\beta\text{СН}})$ – КПД стабилизатора напряжения;

$\eta_{\text{ЗУ}}(K_{\beta\text{ЗУ}})$ – КПД зарядного устройства;

- $\eta_{\text{PY}}(K_{\beta_{3Y}})$ – КПД разрядного устройства;
 η_{AB} – коэффициент энергоотдачи АБ;
 $W(K)$ – количество электроэнергии, произведенное СГЭЭ и переданное в точку А с учетом КПД ИРП и структуры СГЭЭ (см. рис. 5).

Чтобы определить значение $W(K)$, представим правую часть выражения (18) в виде

$$P_{\text{max ЭРМ } k}(t) = \begin{cases} P_{Mk}(K, t) dt, & K = 1, \\ \sum_{k=1}^K P_{Mk}(K, t) \times \eta_{\text{PMk}}(P_{Mk}(K, t)), & K > 1, \end{cases} \quad (19)$$

где $P_{Mk}(K, t)$ – значение максимальной мощности КБ с номером k ;

$\eta_{\text{PMk}}(P_{Mk}(K, t))$ – значение КПД РМ с номером k .

Тогда с учетом (19) получим следующее выражение:

$$W(K) = \begin{cases} \int_0^T P_{Mk}(K, t) dt, & K = 1, \\ \int_0^T \sum_{k=1}^K P_{Mk}(K, t) \times \eta_{\text{PMk}}(P_{Mk}(K, t)) dt, & K > 1. \end{cases} \quad (20)$$

Последовательно вычисляя по (18) значения $W_H(K)$ для $K = 1, 4, 5, 8, 16$ и сравнивая результаты вычислений, можно для каждого набора исходных данных провести обоснованный выбор структуры СГЭЭ, обеспечивающей передачу потребителям наибольшего количества электроэнергии с учетом потерь. Примеры расчетов для типичного диапазона исходных данных представлены на рис. 7–9.

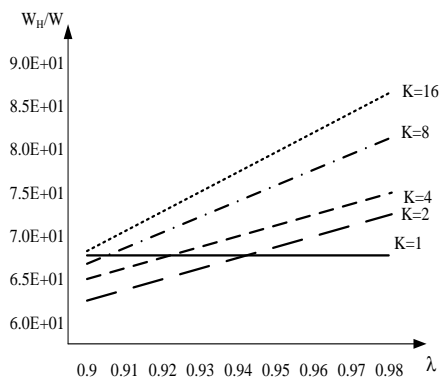


Рис. 8. Зависимости относительной энергии W_H/W от КПД РМ при $\alpha=0,6$

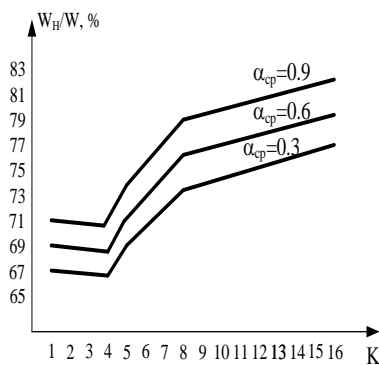


Рис. 9. Расчетные зависимости относительной энергии W_H/W от параметра K для реальных значений коэффициента α

При построении графиков в качестве базового значения относительной энергии, выраженного в процентах, принято максимальное для множества сценариев применения КА значение энергии W , получаемое при $K=16$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя полученные соотношения и данные расчетов, можно для любого рассматриваемого соотношения параметров регуляторов мощности ИРП СГЭЭ и параметра α , определяемого сценарием применения и циклограммой электропотребления, оценить выигрыш от увеличения числа регуляторов K . Он существенно возрастает при увеличении K от 4 до 8, а затем его рост замедляется и уже при значениях $K=16$ становится сравнимым с погрешностями разработанной математической модели.

Полученные результаты позволяют установить граничные значения КПД РМ, при которых система с числом регуляторов $K>1$ [пунктирные линии (см. рис. 7 и 8)] будет иметь преимущества перед традиционной, имеющей единственный регулятор (сплошные линии), и для каждого сценария применения КА можно количественно (в %) оценить эти преимущества.

Список используемых источников

1. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: справочник / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч.И. Хусаинов и др.; под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1985. – 576 с.
2. Математическое моделирование динамики температуры солнечных батарей в различных условиях орбитального полета КА / Н.Н. Астахов, Д.Л. Каргу, В.И. Горбулин и др. // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2016. – №6. – С. 4–21.

Л.К. Горшков,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Северенко;
И.А. Уртминцев,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧЕК ОТСЕКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены типовые задачи расчета усилий в тонких оболочках отсеков космических аппаратов (КА). Выполнен анализ возможности применения различных методов для решения этих задач. Показана мембранная методика определения усилий в куполовидных, сферических, конических и цилиндрических оболочках. Требуемый в ряде случаев учет поперечного изгибающего момента, а также поперечных и продольных сил выполнен для цилиндрической оболочки. Предложены методики приближенного расчета усилий в цилиндрических обечайках, а также в многослойных оболочках с сотовым наполнителем.

Ключевые слова: безмоментная методика, моментная методика, летательный аппарат, тонкая оболочка, меридиональные и тангенциальные сечения, меридиональные и широтные усилия, многослойная оболочка, сотовый наполнитель, нормальные и касательные усилия и напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивая тенденция сокращения массогабаритных характеристик КА различного назначения привела к изменению облика КА, одним из отличий которого явился переход к выбору соответствующей конструктивно-компоновочной схемы с негерметичным корпусом, что позволяет снизить массу КА. Сопутствующее усложнение конструктивно-силовых схем отсеков КА, как обособленных элементов конструкции, влечет за собой и усложнение прочностных расчетов несущих элементов. В складывающейся практике разработки конструкции КА инженеры всё чаще используют численные методы расчетов, заложенные в специализированные программы как для выполнения проектировочных расчетов, так и для виртуальных испытаний конструкции в различных случаях нагружения. В то же время для верификации численных моделей, а также выбора решений или обоснования требований к облику КА на ранних стадиях его создания необходимо использовать аналитические модели, построенные с использованием апробированных методик определения усилий в несущих элементах конструкции. Изменение конструкции отсеков современных КА оказывает значительное влияние на конструкцию и характер нагружения оболочек, продолжающих выполнять функции несущих элементов.

Среди методов аналитического расчета наибольшее развитие получили методы расчета усилий в оболочках герметичных отсеков. В этом случае корпус и другие элементы КА любого назначения представляют собой достаточно тонкие оболочки как тела вращения с различными радиусами кривизны. В таких оболочках, как правило, не возникают изгибающие и крутящие моменты, действуют только осесимметричные растягивающие или сжимающие усилия, вызываемые внутренним давлением, что особенно проявляется при функционировании КА в условиях отсутствия гравитации и атмосферного давления. Такого рода усилия носят название *мембранных* (отсюда и название методики) [1]. Но мембранная теория в то же время может быть заменена на моментную теорию при расчете цилиндрических оболочек, а также многослойных стенок с сотовым наполнителем, когда возможно появление внутренних моментов действующих сил.

БЕЗМОМЕНТНАЯ (МЕМБРАННАЯ) ТЕОРИЯ

В основу мембранной методики положен метод сечений оболочек в тангенциальных направлениях – меридиональном и по широтным линиям, где определяются искомые усилия и соответствующие им нормальные напряжения.

Рассмотрим общий случай применения мембранной методики с целью определения усилий в куполообразной оболочке вращения при осесимметричном нагружении внутренним давлением, что характерно, например, для днища герметичного отсека КА, топливного бака ракеты-носителя (РН), ее головного обтекателя. При этом примем за основные координатные оси некоторый меридиан ($\varphi = \text{const}$) и широтную линию ($\theta = \text{const}$), где θ – угол между продольной осью оболочки и нормалью n к ее поверхности (рис. 1).

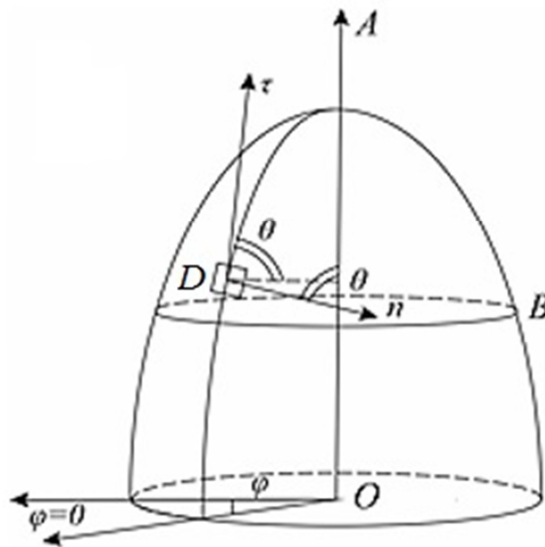


Рис. 1. Геометрия осесимметричной куполообразной оболочки

Выделим в теле оболочки бесконечно малый поверхностный элемент (площадка D на рис. 1) и с ней свяжем естественные оси: τ (касательную ось) и n (главную нормаль). По направлениям меридиональной и широтной линий действуют соответственно меридиональное N_θ и широтное N_φ усилия на единицу длины разрезов оболочки. Эти усилия являются единственными мембранными усилиями от действия активной нагрузки (внутреннего давления), представляемой в виде двух составляющих, прилагаемых изнутри на единицу поверхности оболочки: p_θ – в меридиональном направлении и p_n – перпендикулярно к поверхности. При этом за внутреннее давление здесь и далее будем принимать разность абсолютного внутреннего и внешнего давлений в случае вертикального движения аппарата в атмосфере Земли и при действии гравитации, при выходе в космическое пространство внешнее давление исчезает и остается только внутреннее давление в пространстве оболочки. За основу решения при этом принято обеспечение состояния равновесия как для всей оболочки в целом, так и для отдельных ее частей.

Так как мембранная (безмоментная) теория в настоящее время достаточно полно разработана (труды Л.И. Балабухи, С.В. Бояршинова, В.В. Новожилова, Н.К. Снитко и др.), то проведем только краткий обзор некоторых безмоментных решений для тонких оболочек вращения основных геометрических форм (куполообразной, сферической и конической).

Куполообразная оболочка. Для куполообразной оболочки имеем следующее решение:

$$\frac{N_\theta}{R_1} + \frac{N_\varphi}{R_2} = p_n, \quad (1)$$

где N_θ – усилие широтного направления;
 N_ψ – усилие меридионального направления;
 R_1, R_2 – радиусы кривизны оболочки соответственно в широтном и меридиональном направлениях;
 p_n – внутреннее давление.

Сферическая оболочка. Пусть на такую оболочку действует внутреннее давление p , составляющими которого являются нормальное $p_n = p \cos \psi$, а также тангенциальное (широтное) давление, равное $p_\theta = p \sin \psi$. Показанные ранее радиусы принимают при этом следующие значения: $R_1(\theta) = R_2 = a$, где a – внутренний радиус оболочки.

Для усилий в такой оболочке получены следующие расчетные зависимости:

– окружное (широтное) усилие:

$$N_\theta = -\left(-\frac{pa}{1+\cos\theta}\right) = \frac{pa}{2}, \quad (2)$$

– меридиональное усилие:

$$N_\psi = -\left[-pa\left(\cos\theta - \frac{1}{1+\cos\theta}\right)\right] = \frac{pa}{2}. \quad (3)$$

Таким образом, сферическая оболочка при постоянном внутреннем давлении, равном $p_n = -p = \text{const}$, подвергается действию одинаковых меридионального и окружного (широтного) растягивающих усилий: $N_\theta = N_\psi = \frac{pa}{2}$.

Коническая оболочка. В этом случае для всех широтных кругов угол θ одинаков. Обозначим через α угол между продольной осью конуса и его образующей, являющейся координатной осью x . Тогда можно записать:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha; \quad N_\theta = N_x, \\ p_\theta = p_\alpha = p_0 \cos \alpha,$$

где p_0 – давление на оболочку от собственного веса конуса.

В космическом пространстве собственный вес не проявляется, и тогда будем иметь: $p_n = -p$; $p_x = p_\theta = 0$, что дает основание записать следующее:

$$N_x = -\frac{1}{x} \int_0^x (-ptg\alpha) z dz; \quad N_\psi = pxtg\alpha.$$

Введем обозначение $z = x \cos \alpha$; тогда $dz = \cos \alpha dx$, после чего подставим их значения в первую формулу выше приведенной системы и окончательно получим:

$$N_x = \frac{px}{4} \sin 2\alpha, \\ N_\psi = pxtg\alpha \quad (4)$$

Из системы (4) следует, что в конической оболочке усилия от внутреннего постоянного давления будут растягивающими.

МОМЕНТНАЯ ТЕОРИЯ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

В некоторых случаях цилиндрическая оболочка может находиться в *моментном* напряженном состоянии, когда появляются немембранные усилия: изгибающие и крутящие моменты, а также значительные поперечные силы. Это наблюдается при учете краевых эффектов, когда при защемлении концов оболочки возникают дополнительные поперечные усилия и моменты, особенно часто имеющие место при горизонтальном полете в условиях

земного притяжения и переменного атмосферного давления. В космическом полете, при полной невесомости, эти эффекты практически не проявляются, за исключением случаев маневрирования для переходов с одной орбиты на другую и т. п. Такого рода случаи требуют специального изучения и в данной работе не рассматриваются.

Предметом нашего рассмотрения является цилиндрическая оболочка, находящаяся под действием постоянного внутреннего давления, нормального к поверхности оболочки. Это давление до выхода летательного аппарата в околоземное пространство равно разности внешнего и внутреннего давлений, при выходе за пределы земного тяготения будет иметь место только внутреннее давление в космическом аппарате.

Исходя из сказанного составим основное дифференциальное уравнение для определения радиального перемещения участков оболочки от действия внутреннего давления. Выделим бесконечно малый элемент оболочки, размеры которого имеют следующие значения: dz вдоль продольной вертикальной оси z и $a d\varphi$ – в окружном направлении, где a – радиус срединной поверхности оболочки (рис. 2). Напряженное состояние этого элемента оболочки определяется продольными усилиями $N_\theta = N_1$ и $N_\varphi = N_2$, поперечной силой Q и моментами M_1 и M_2 . Все указанные нагрузки принимаются действующими на единицу длины соответствующего участка оболочки.

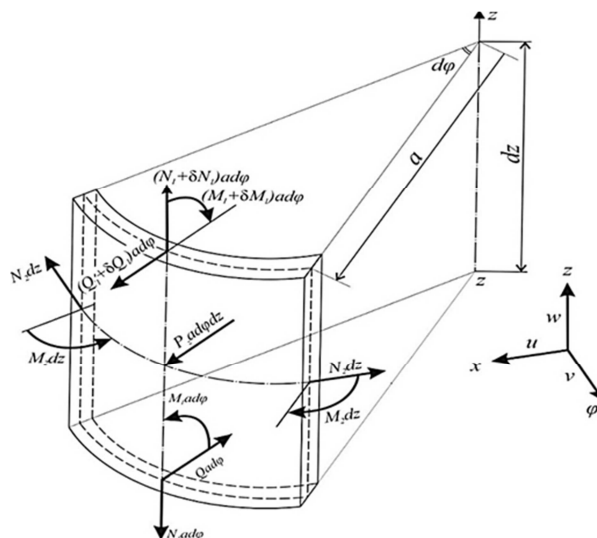


Рис. 2. Фрагмент цилиндрической оболочки

Задача является осесимметричной, поэтому мембранные усилия в сумме равны нулю, а продольные усилия N_2 будут постоянными вдоль всей окружности оболочки. При этом, тоже в силу симметрии, крутящие моменты $M_{z\varphi} = M_{\varphi z}$ по высоте рассматриваемого участка оболочки, как и поперечные силы на вертикальных площадках, будут также равны нулю, но изгибающие моменты $M_\varphi = M_2$ останутся постоянными для всей окружности оболочки. Таким образом, задача сводится к отысканию перерезывающих(поперечных) сил Q , моментов M_1 и M_2 , а также продольных усилий N_1 и окружных N_2 . С этой целью составим соответствующие уравнения равновесия, дополненные уравнениями связей, определяющих деформации оболочки в направлениях по нормали к ее поверхности (u) и вдоль вертикальной оси (w).

Составляющая перемещения вдоль окружности (v) по условию симметрии равна нулю. Влиянием собственного веса оболочки пренебрегаем, но напряжения от этой нагрузки по необходимости можно присоединить к уже полученному решению дополнительно путем простого сложения результатов.

Как уже отмечалось ранее, основной нагрузкой на цилиндрическую оболочку какого-либо элемента космического аппарата является внутреннее давление как функция координаты z . Приращения значений параметров N_1, Q, M_1 от изменения координаты z можно записать следующим образом:

$$\delta N_1 = \frac{dN_1}{dz} dz; \quad \delta Q = \frac{dQ}{dz} dz; \quad \delta M_1 = \frac{dM_1}{dz} dz,$$

где Q – перерезывающая (поперечная) сила.

Составим соответствующие уравнения равновесия ($\sum Z = 0$; $\sum X = 0$; $\sum M_\varphi = 0$), которые после раскрытия примут следующий вид:

$$\left(\frac{dN_1}{dz} dz\right) ad\varphi = 0; \quad (5)$$

$$\left(\frac{dQ}{dz} dz\right) ad\varphi + N_2 dzd\varphi - p_z dzd\varphi = 0; \quad (6)$$

$$\left(\frac{dM_1}{dz} dz\right) ad\varphi + Q adzd\varphi = 0, \quad (7)$$

где a – радиус осевой линии цилиндрической оболочки (см. рис. 2).

В уравнении (7) отсутствуют моменты M_2 , которые взаимно уравновешиваются и потому не учитываются. В систему трех уравнений (5)–(7) входят четыре неизвестные величины: Q, N_1, N_2, M_1 . Но из уравнения (5) следует, что $N_1 = \text{const}$. В дальнейшем примем во внимание, что влияние этого усилия на изгиб оболочки незначительно, особенно в космическом полете, и потому будем считать его нулевым.

Уравнения (6) и (7) после деления на произведение $adz d\varphi$ упростятся и примут следующий вид:

$$\frac{dQ}{dz} + \frac{N_2}{a} = -p_z; \quad \frac{dM_1}{dz} - Q = 0. \quad (8)$$

Теперь в уравнениях системы (8) стало три неизвестных величины. При этом примем во внимание, что согласно положениям теории изгиба [2]

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{d^2 M_1}{dz^2},$$

и тогда вместо выражения (8) можно записать следующее уравнение:

$$\frac{d^2 M_1}{dz^2} + \frac{N_2}{a} + p_z = 0. \quad (9)$$

Выражение (9) являет собой статически неопределимую задачу, так как предполагает вычисление двух неизвестных величин: момента M_1 и нормального усилия N_2 . Для определения усилия N_2 можно воспользоваться соотношениями между относительными деформациями ε_1 и ε_2 , а также между усилиями N_1 и N_2 , приняв во внимание известные из теории упругости зависимости [3, 6]:

$$\varepsilon_1 = \frac{dw}{dz}; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_\varphi = \frac{u}{a}.$$

Будем считать, что при положительном направлении перемещения w от оси Z к периферии окружное относительное удлинение будет также положительным. В этом случае для нормальных усилий N_1 и N_2 запишем следующие зависимости, полученные в соответствии с положениями строительной механики [4]:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\frac{dw}{dz} - \mu \frac{u}{a} \right) = 0; \\ N_2 &= \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\mu \frac{dw}{dz} - \frac{u}{a} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где μ – коэффициент Пуассона (коэффициент относительной поперечной деформации);
 h – толщина оболочки;
 E – модуль Юнга (модуль упругости материала оболочки при растяжении – сжатии).

Из первой формулы системы (10) имеем:

$$\frac{dw}{dz} = \mu \frac{u}{a},$$

и, внося это значение производной во вторую формулу указанной выше системы, получим

$$N_2 = Eh \frac{u}{a}. \quad (11)$$

Заметим, что усилие N_2 , соответствующее зависимости (11), справедливо только при $N_1 = 0$. Осталось найти зависимость для момента M_1 , входящего в формулу (9). Этот момент зависит от изменения кривизны оболочки в плоскостях zx и φx . Но предварительно определим зависимость для продольных перемещений в оболочке.

Из теории изгиба следует, что

$$M_1 = D \left(\frac{d^2 w}{dz^2} - \mu \frac{u}{a} \right), \quad (12)$$

где D – цилиндрическая жесткость оболочки, определяемая зависимостью

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Из-за относительной малости радиальных перемещений при эксплуатации цилиндрических оболочек больших радиусов кривизны можно пренебречь вторым членом в скобках формулы (12), и тогда упрощенное дифференциальное уравнение для продольных перемещений получит следующий вид:

$$w^{IV} + \frac{Eh}{Da^2} w - \frac{p_z}{D} = 0. \quad (13)$$

Уравнение в форме (13) по своей структуре и физической сущности аналогично дифференциальному уравнению оси изогнутой балки на сплошном основании [4]:

$$w^{IV} + 4\beta_{\text{пр}}^4 w - \frac{p_z}{D} = 0, \quad (14)$$

где $\beta_{\text{пр}}$ – коэффициент пропорциональности, то есть коэффициент линейной жесткости оболочки, определяемый из следующей зависимости:

$$\beta_{\text{пр}}^4 = \frac{Eh}{4Da^2} = 3 \frac{1-\mu^2}{a^2 h^2}. \quad (15)$$

Интегрируя уравнение (14) и определив с учетом выражения (15) перемещение w , подставим его в зависимость (12), откуда после необходимых преобразований получим для момента поперечного изгиба оболочки (момента M_1) следующее выражение:

$$M_1 = D\alpha = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \alpha, \quad (16)$$

где α – угол наклона искривленного участка цилиндрической поверхности оболочки к ее продольной образующей.

Заметим, что уравнением (14), как и зависимостью (16), можно пользоваться и для приближенных расчетов других тонких оболочек вращения.

МОМЕНТНАЯ ТЕОРИЯ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Некоторые расчетно-методические особенности выявляются при оценке и анализе напряженно-деформированного состояния тонких многослойных оболочек с сотовым наполнителем как разновидностью упругого пластика (рис. 3,а).

Такие наполнители помещаются между внешним и внутренним слоями оболочки на клеевой основе, иногда используется усиление крепежными элементами. Рассмотрим работу такого уплотнителя без крепежных элементов, только с учетом его приклейки к тонким слоям оболочки. Это позволит наглядно оценить свойства упругого сотового уплотнителя.

Как следует из рис. 3,а, на внешний слой оболочки действует атмосферное давление p_a совместно с температурными напряжениями, определяемыми формулой ($E\beta t^0$), где E – модуль Юнга, или модуль упругости материала оболочки при растяжении – сжатии; β – объемный температурный коэффициент; t^0 – температура.

На внутреннюю поверхность оболочки действует только постоянное внутреннее давление в отличие от переменного давления на наружный слой, чему способствует и действие переменной температуры извне. В результате создается внутренний изгибающий момент M_σ , которому противодействует приклеенный сотовый наполнитель оболочки, создавая свой момент M_τ из касательных усилий (напряжений) обратного направления (рис. 3,а). Эпюры возникающих при этом напряжений показаны на рис. 3,б, где σ – нормальные напряжения в слоях оболочки со своими знаками; τ – касательные напряжения на внешних поверхностях сотового наполнителя с максимумом (τ_{max}) в его срединной поверхности.

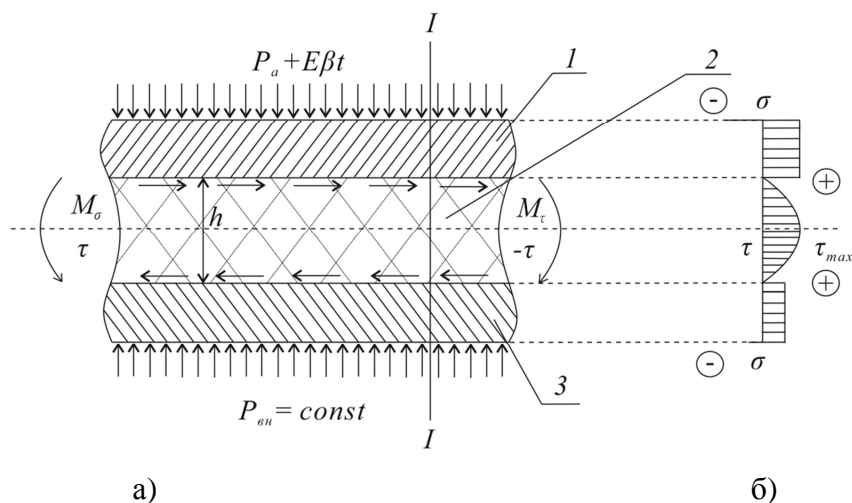


Рис. 3. Давление и моменты в многослойной оболочке:

1 – наружная поверхность; 2 – сотовый наполнитель; 3 – внутренняя обечайка;
а – схема нагружения; б – напряжения в сечении $I-I$; σ – нормальные,
 τ – касательные напряжения

Так как сотовый наполнитель работает на сдвиг (при качественной клейке), то для оценки его эффективности целесообразно принять третью теорию прочности, то есть теорию наибольших касательных напряжений [2]:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{[\sigma]}{2},$$

где σ_1 – наибольшее нормальное растягивающее напряжение;

σ_3 – такое же, но сжимающее напряжение;

$[\sigma]$ – допускаемое нормальное напряжение для сотового наполнителя.

Максимальный изгибающий момент определяется как момент разности нормальных усилий на внутреннем и внешнем слоях оболочки:

$$M_{\max} = Fl(p_a + E\beta t^0),$$

где F – площадь сечения, в котором действует нормальное усилие;

l – длина рассматриваемого участка оболочки;

β – объемный температурный коэффициент;

t^0 – перепад температур.

Противодействующий момент M_τ внутри оболочки создается касательным усилием T , образованным касательными напряжениями на контактах сотового наполнителя с внутренними поверхностями слоев оболочки, на плече, равном h – высоте слоя сотового наполнителя. Отсюда получим:

$$M_\tau = Th = \tau Fh.$$

Условие прочности для сотового наполнителя имеет следующий вид:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\max}}{Fh} \leq [\tau],$$

где $[\tau]$ – допускаемое касательное напряжение для материала сотового наполнителя.

При отсутствии внешнего давления (в случае выхода в околоземное пространство) сотовый наполнитель работает как упругий демпфер, сглаживающий мембранный эффект от внутреннего давления на оболочку за счет появления в массиве сотового наполнителя упругих напряжений $\sigma_{\text{упр}}$ (рис. 4) как проявления жесткости последнего.

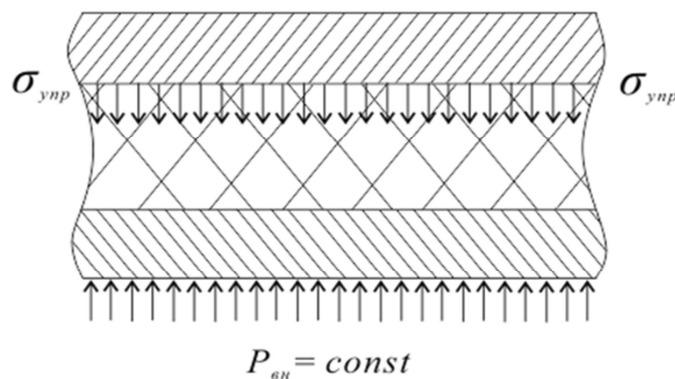


Рис. 4. Давление в многослойной оболочке с сотовым наполнителем при отсутствии внешнего давления: $\sigma_{\text{упр}}$ – упругие напряжения в сотовом наполнителе, противодействующие внутреннему давлению $P_{\text{вн}}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В табл. 1 приведены различные случаи применения рассмотренных инженерных методик для расчета напряженно-деформированного состояния герметичных элементов конструкции КА и РН в различных условиях нагружения.

Мембранная (безмоментная) методика позволяет определять усилия в тангенциальных сечениях тонких оболочек вращения общего (куполовидного) типа и, в частности, может быть использована для расчета усилий в сферических, конических и некоторых других видах оболочек, например цилиндрических, при действии только внутреннего давления.

Таблица 1

Области применения рассмотренных расчетных методов

Вид теории	Элементы герметичного отсека	Силовые факторы нагружения отсека
Безмоментная теория	Гладкие оболочки отсеков КА и РН сферической, конической, цилиндрической формы	Внутреннее избыточное давление
Моментная теория для цилиндрических оболочек	Гладкие оболочки отсеков КА и РН цилиндрической формы	Изгибающий момент, продольные и поперечные силы, внутреннее избыточное давление
Моментная теория для многослойных цилиндрических оболочек	Гладкие многослойные оболочки отсеков КА и РН цилиндрической формы	Изгибающий момент, внешнее атмосферное и внутреннее избыточное давление

В случаях действия на оболочку изгибающего момента, продольных и поперечных сил целесообразно использовать инженерные моментные теории, в том числе и для многослойных оболочек.

Полученные зависимости для продольных и поперечных усилий, а также упрощенную зависимость для определения момента поперечного изгиба тонких оболочек вращения элементов конструкции КА, в первую очередь цилиндрических, можно рекомендовать для практического использования. При этом следует отметить полезную роль сотового наполнителя многослойных оболочек как демпфера изгибных моментов и переменного внешнего давления, например в головных обтекателях РН, а также в других отсеках РН и КА.

Рассмотренные подходы охватывают достаточное количество наиболее часто встречающихся расчетных случаев, необходимых для определения соответствующих параметров в условиях проектирования и эксплуатации. Разумеется, полное описание расчетных случаев нагружения КА и РН на всех этапах их жизненного цикла выходит за рамки представленных инженерных методик и предполагает использование специализированных пакетов прикладных программ.

Список используемых источников

1. *Новожилов В.В.* Теория тонких оболочек. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 204 с.
2. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов. – М.: МГТУ, 2000. – 592 с.
3. *Горшков Л.К.* Основы теории упругости и пластичности в разведочном бурении. – СПб.: СПГИ, 1992. – 151 с.
4. *Горшков Л.К., Трушко В.Л., Гореликов В.Г.* Строительная механика. – СПб.: НМСУ «Горный», 2014. – 162 с.
5. *Снитко Н.К.* К точной теории расчета цилиндрических резервуаров // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1978. – № 11. – С. 41–49.
6. *Уртминцев И.А.* Строительная механика космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 267 с.

Ю.А. Гравченко,
кандидат техн. наук, доцент;
Б.К. Гранкин,
доктор техн. наук, профессор;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор

ЧАСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ СПЕЦИАЛИСТОМ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Обоснована актуальность решения задачи определения количественных значений показателей уровня освоения компетенции (компетенций) специалистами по эксплуатации ракетно-космической техники. Определен перечень частных показателей уровня освоения компетенции специалистом по эксплуатации ракетно-космической техники. Решена задача ранжирования частных показателей уровня освоения компетенции специалистом по эксплуатации ракетно-космической техники на основе экспертных оценок. Сформулирована задача агрегирования показателей уровня освоения компетенции специалистом по эксплуатации ракетно-космической техники.

Ключевые слова: модель, субъект эксплуатации, компетенция, эксплуатация, ранжирование, частный показатель уровня освоения компетенции, агрегированный (интегральный) показатель уровня освоения компетенции.

ВВЕДЕНИЕ

При решении научных задач по обоснованию и разработке требований к системе освоения личным составом объектов ракетно-космической техники (РКТ), обоснованию классификационных и квалифицированных требований к отбору, уровню подготовки специалистов и срокам их обучения, оценке и совершенствованию учебно-тренировочных средств и разработке методов их использования неизбежно встает вопрос о формировании моделей субъектов эксплуатации РКТ. В качестве таких субъектов могут выступать как отдельные специалисты, так и организации, эксплуатирующие РКТ. Необходимость разработки подобных моделей прежде всего обусловлена нарастающей сложностью систем РКТ, возрастающей мощностью информационных потоков в системе эксплуатации РКТ, сокращением времени, необходимого на разработку и постановку на вооружение новых образцов РКТ. Перечисленные тенденции в целом подразумевают всё более жесткие требования к уровню подготовки обслуживающего персонала (ОП), вовлеченного в процессы эксплуатации РКТ.

Другим важным направлением исследований в области эксплуатации объектов РКТ является управление агрегатами и системами этих объектов в нештатных состояниях. Это предполагает наличие у персонала компетенций по своевременному обнаружению нештатных состояний, прогнозированию их последствий и выработке решений на управление агрегатами и системами этих объектов. Нуждаются в детализации и уточнении требования к оперативности принятия решений для эксплуатационных процессов, которые критически важны для выполнения боевой задачи или безопасности обслуживающего персонала, агрегатов и систем объектов РКТ. Считается [1, 2], что достижения необходимых показателей оперативности принятия решений при переходе агрегатов и систем РКТ в нештатные состояния возможно добиться с помощью систем поддержки принятия решений (СППР). Для работы таких систем требуется не только значительный объем технических данных, но и виртуальные модели субъектов эксплуатации, вовлеченных в процессы принятия решений в условиях не-

штатного функционирования агрегатов и систем объектов РКТ или участвующих в их реализации.

При разработке моделей субъектов эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ) неизбежно возникает вопрос об определении количественных значений показателей уровня освоения компетенции (компетенций) специалистами по эксплуатации РКТ. Требования об учете уровня подготовки персонала при организации эксплуатации РКТ содержатся в руководящих документах по эксплуатации этой техники и организации производства, в частности в ГОСТ [3–5]. Перечень компетенций, необходимых для эксплуатации РКТ, приведен в федеральных государственных стандартах высшего образования (ФГОС ВО), в частности в ФГОС ВО 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» [6], квалификационных требованиях к военно-профессиональной подготовке выпускников (КТ). Однако как оценить степень их освоения в организации, эксплуатирующей РКТ, как выполнять мониторинг их состояния и какие для этого необходимы «механизмы», не уточняется.

Между тем современная нормативная база [3–5], формирующая основные направления внедрения систем менеджмента качества в различные отрасли экономики, определяет как основной ресурс организации ее персонал [3]: «Работники – важнейший ресурс организации. Результаты деятельности организации зависят от того, как люди ведут себя в рамках системы, в которой они работают». Это подразумевает необходимость измерения характеристик указанного ресурса. В качестве одной из характеристик такого ресурса в указанных ГОСТ [3–5] определяется «компетентность» [3]: «Система менеджмента качества наиболее результативна, когда все работники понимают и применяют на практике навыки, подготовку, образование и опыт, необходимые для выполнения их функций и обязанностей.

Предоставлять возможности работникам развивать необходимую компетентность является ответственностью высшего руководства».

Там же [3] отмечается, что для организации крайне важно, чтобы все работники были компетентными, были наделены полномочиями и вовлечены в создание ценности (в случае организации, эксплуатирующей РКТ, в качестве ценности могут выступать космический аппарат на заданной орбите, массивы научных и разведывательных данных, исправное, с проведенным техническим обслуживанием оборудование и т.д.). Компетентные, наделенные полномочиями и взаимодействующие работники на всех уровнях организации повышают ее способность создавать ценность.

В ГОСТ Р ИСО 9000-2015 [3] дается определение понятия компетентность (competence). Компетентность – это «способность применять знания и навыки для достижения намеченных результатов».

В другом ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [4] определяются средства обеспечения компетентности, в частности отмечается, что организация (эксплуатирующая РКТ) «должна:

- a) определять необходимую компетентность лиц(а), выполняющих(его) работу под ее управлением, которая оказывает влияние на результаты деятельности и результативность системы менеджмента качества;
- b) обеспечивать компетентность этих лиц на основе соответствующего образования, подготовки и (или) опыта;
- c) там, где это применимо, предпринимать действия, направленные на получение требуемой компетентности, и оценивать результативность предпринятых действий;
- d) регистрировать и сохранять соответствующую документированную информацию как свидетельство компетентности».

В ГОСТ Р ИСО 9004-2010 [5] намечаются пути обеспечения необходимой компетентности персонала. В частности, предлагается [5] устанавливать и обеспечивать выполнение плана повышения квалификации персонала и соответствующих процессов, способствующих выявлению, развитию и повышению уровня компетентности работников организации путем принятия следующих мер:

- определения уровня профессиональной и личной компетентности работников, которая может понадобиться организации в краткосрочной и долгосрочной перспективе согласно ее миссии, видению, стратегии, политике и целям;
- определения текущего уровня компетентности работников организации и расхождений между тем, что имеется и что требуется на настоящий момент и может потребоваться в будущем;
- осуществления действий, направленных на повышение и (или) достижение требуемого уровня компетентности работников с целью устранения расхождений;
- анализа и оценки результативности мер, принимаемых для достижения необходимого уровня компетентности работников;
- поддержания достигнутого уровня компетентности.

Исходя из изложенного можно сделать вывод о необходимости определения количественных значений показателей уровня профессиональной и личной компетентности специалистов по эксплуатации РКТ в процессе функционирования эксплуатирующей организации. Однако и сам перечень этих показателей, и их влияние на обобщенную оценку уровня компетентности специалиста до сих пор не определены. Нет и методик получения количественных значений этих показателей, учитывающих уровень образования, подготовки и (или) опыта [4]. В целях определения перечня показателей уровня профессиональной и личной компетентности специалиста, их ранжирования, выявления количественных значений этих показателей необходимо провести дополнительное исследование. Учитывая сложность решаемой задачи, ограниченность информационных ресурсов, пригодных для ее решения, а также определенные трудности при ее формализации, подобное исследование целесообразно проводить с привлечением экспертных процедур.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАНЖИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ СПЕЦИАЛИСТОМ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

При применении метода экспертных оценок [7] для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть вопросы подбора экспертов, проведения опроса и обработки его результатов.

В связи с образовательной направленностью решаемой задачи подбор количественного и качественного состава экспертов производился среди преподавателей Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, имеющих ученую степень (ученое звание), опыт эксплуатации РКТ, опыт преподавания учебных дисциплин не менее 5 лет. Исходя из целей проводимой экспертизы, сущности решаемой проблемы в качестве вида проводимого опроса выбрано анкетирование. Экспертам было предложено выполнить ранжирование показателей, перечисленных в анкете. Экспертам было разъяснено, что под алгоритмом в перечне понимается достаточно полное описание последовательности действий, направленных на решение эксплуатационной задачи. Общее количество показателей уровня освоения компетенции составило 10. В перечень вошли: уровень образования (*K1*), группа профессионального отбора (*K2*), время фактического исполнения обязанностей по должности (*K3*), наличие у исполнителя допуска к самостоятельной работе (*K4*), повышение квалификации (профессиональная переподготовка) (*K5*), количество повторений успешно завершенных алгоритмов иерархического взаимодействия (*K6*), количество повторений успешно завершенных алгоритмов участия в эксплуатационных процессах (ЭП) (*K7*), количество повторений успешно завершенных алгоритмов участия в повседневной деятельности (*K8*), количество алгоритмов, находящихся на одном уровне иерархии (*K9*), количество алгоритмов, находящихся на соседних уровнях иерархии (*K10*). Для установления степени полноты перечня показателей экспертам была дана возможность предложить свой показатель, который, по их мнению, также влияет на общий уровень освоения компетенции. Дополнить перечень пред-

ложили 14% экспертов. Всего было предложено 2 показателя: мотивация (9%) и способность к наставничеству (5%) (т.е. способность передавать свои знания коллегам). Часть экспертов (5%) посчитали задачу определения и ранжирования показателей уровня освоения компетенций неактуальной.

Опрос проводился индивидуально, о результатах опроса других экспертов анкетированному не сообщалось. Ранжировка каждого эксперта представлялась в виде матрицы парных сравнений [7], на основании которых была построена обобщенная матрица парных сравнений. Полученная матрица показана на рис. 1.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
K1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
K3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K4	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
K5	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
K6	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
K7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K8	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1
K9	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
K10	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1

Рис. 1. Обобщенная матрица парных сравнений

Обобщенная матрица парных сравнений формировалась по следующему правилу [8]:

$$y_{ik}^* = \begin{cases} 1, & \text{если } a_{ik} \geq \frac{m}{2}, \\ 0, & \text{если } a_{ik} < \frac{m}{2}, \end{cases}$$

где a_{ik} – количество голосов, поданных экспертами за предпочтение i -го объекта k -му,

$$a_{ik} = \sum_{j=1}^m y_{ik}^j;$$

m – число экспертов;

y_{ik}^* – элемент матрицы $\|y_{ik}^*\|$ (обобщенной матрицы парных сравнений).

В качестве числового представления [7] рангов использовался натуральный ряд чисел, обозначаемых буквой r . При этом наиболее предпочтительному объекту присваивался ранг 1, а по мере убывания предпочтения значение ранга возрастало. Эквивалентным объектам присваивались одинаковые ранги.

Количественная оценка степени компетентности экспертов не проводилась. Исходя из критериев отбора экспертов коэффициент компетентности каждого был принят равным 1.

Результаты ранжировки по числу предпочтений показателей представлены в виде вектора: $R = \{10, 1, 10, 7, 5, 8, 9, 7, 7, 5\}$. Здесь наибольшему значению предпочтения соответствует наибольшее значение ранга. Учитывая наличие связанных рангов, сделать однозначный вывод о значимости того или иного показателя для уровня освоения компетенции представляется затруднительным, дисперсионный коэффициент конкордации мнений экспертов составил 0,257. Это говорит о сравнительно невысокой согласованности мнений экспертов, что вполне объяснимо, учитывая сложность решаемой задачи и субъективизм мнений экспертов. Энтропийный коэффициент конкордации составил 0,499, что несколько больше полученного значения дисперсионного коэффициента конкордации. Это указывает на факт разделения мнений экспертов на противоположные группы [7]. Поэтому для определения ранга показателя уровня освоения компетенции специалистом по эксплуатации РКТ результаты расчетов были сведены в таблицу (табл. 1). В строках таблицы – показатели $K1, \dots, K10$, в столбцах – ранжи-

ровка показателей R , ранжировка показателей r , математическое ожидание \bar{r} , параметр $S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2$, d – размах оценочной шкалы ($d = r_{\max} - r_{\min}$) [8], погрешность коллективной экспертной оценки $\Delta Q = \frac{d}{\sqrt{m}}$, где m – число экспертов; оценка вероятности присвоения j -го ранга i -му объекту p_{ij} , энтропия H , дисперсия D .

Таблица 1

**Результаты ранжирования, характеризующие
показатели уровня освоения компетенции**

	R	r	\bar{r}	S	d	ΔQ	p_{ij}	H	D
$K1$	10	1	2,08	1,576	4	1,154	0,417	0,964	2,103
$K2$	1	10	7,50	5,083	7	2,021	0,333	1,528	6,777
$K3$	10	1	3,67	7,888	9	2,598	0,083	1,557	10,518
$K4$	7	4	4,75	10,354	9	2,598	0,083	1,528	13,805
$K5$	5	6	5,33	9,388	9	2,598	0	2,5	12,518
$K6$	8	3	4	5,833	9	2,598	0,083	2,028	7,777
$K7$	9	2	2,83	2,138	5	1,443	0,083	0,959	2,852
$K8$	7	4	4,91	6,243	8	2,309	0,167	2,5	8,324
$K9$	7	4	4,33	3,722	7	2,021	0	0,993	4,963
$K10$	5	6	5,08	3,076	5	1,443	0,25	2,085	4,102

Несмотря на невысокие значения коэффициентов конкордации, из полученных данных можно сделать следующие важные выводы.

1. Задача ранжирования показателей уровня освоения компетенции специалистом по эксплуатации РКТ является актуальной.

2. Предложенный перечень показателей уровня освоения компетенции специалистом по эксплуатации РКТ является достаточно полным.

3. Показателями с невысокими значениями рангов можно пренебречь.

4. Окончательное ранжирование показателей целесообразно выполнять после исключения показателей, определенных экспертами как незначимые.

Большинство экспертов поставили на последнее место группу профессионального отбора специалиста. Действительно, учитывая, что группа профессионального отбора определяется на самом начальном этапе деятельности специалиста – при приеме на военную службу, а при решении эксплуатационных задач ее влияние на конечный результат трудно различимо, ею можно пренебречь. Таким образом, показатель $K2$ – группа профессионального отбора исключается из конечного перечня. Достаточно высокий ранг ($r = 4$) у показателя $K4$ – наличие у исполнителя допуска к самостоятельной работе. Однако, учитывая порядок предоставления допуска к самостоятельной работе в эксплуатирующих организациях, бинарный характер оценивания самого показателя, можно сказать, что наличие у специалиста допуска к самостоятельной работе – необходимое условие участия специалиста в эксплуатационных процессах, но включение его в интегральный показатель уровня освоения компетенции специалистом нецелесообразно, так как этот показатель обобщает знания, необходимые специалисту в конкретной организации. Повышение квалификации (профессиональная переподготовка) ($K5$) характеризуется максимальным размахом оценочной шкалы d и высоким уровнем энтропии H , и хотя в целом повышение квалификации (профессиональная переподготовка) влияет на компетентность специалиста, эксперты оценивают этот показатель ниже показателей, основанных на опыте эксплуатации ($K3, K6, K7, K8$).

Таким образом, вектор показателей уровня освоения компетенции специалистом примет следующий вид: $K = \{K1, K3, K6, K7, K8, K9, K10\}$, а их ранжировка по числу предпочтений: $R' = \{10, 10, 8, 9, 7, 7, 5\}$. Наличие одинаковых рангов у показателей $K1, K3$ и $K8, K9$ можно

оставить без изменений. Однако, учитывая значения \bar{r} , d , ΔQ и H соответствующих показателей, можно сделать вывод, что $K1$ предпочтительнее $K3$, а $K9$ предпочтительнее $K8$.

Итоговая ранжировка вектора K – вектор $r' = \{1, 2, 4, 3, 6, 5, 7\}$.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АГРЕГИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ СПЕЦИАЛИСТОМ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Таким образом, итоговый перечень показателей уровня освоения компетенции сформирован. Каждый из этих показателей характеризует компетентность специалиста [3]. Ранжирование позволяет качественно судить о значимости вклада каждого показателя в интегральный показатель уровня освоения компетенции специалистом. При этом каждый из показателей имеет под собой объективные данные о результатах деятельности должностного лица, включая период его обучения. Проведя семантический анализ показателей, можно сделать вывод об их независимости. Действительно, выполняя их перебор, можно убедиться, что известное значение одного из них либо не дает информации о другом, либо дает настолько общую информацию, что можно говорить о том, что степень взаимного влияния показателей друг на друга пренебрежимо мала. Это подразумевает их агрегирование методом аддитивной свертки. Для этого необходимо записать каждый показатель в единой для всех метрике, получить для каждого конкретное числовое значение, назначить весовой коэффициент.

В ранее выполненных исследованиях [10] было введено понятие коэффициента профессиональной компетентности, который предлагалось измерять в процентах, учитывая результаты обучения в вузе и некоторые результаты профессиональной деятельности выпускника. При этом дифференциация специалистов выполнялась по следующим критериям: высококомпетентные (++) коэффициент профессиональной компетентности $88\% \leq K_{\text{пк}} \leq 100\%$, высококомпетентные (+) $75\% \leq K_{\text{пк}} < 88\%$, средне компетентные (+-) $67\% \leq K_{\text{пк}} < 75\%$, средне компетентные (-) $59\% \leq K_{\text{пк}} < 67\%$, малокомпетентные (--) $47\% \leq K_{\text{пк}} < 59\%$. В нашем случае речь ведется о конкретной компетенции, обозначенной в ФГОС и КТ [6], интегральный показатель которой формируется своим набором учебных дисциплин и объективными данными о результатах деятельности должностного лица эксплуатирующей организации, однако и этот показатель можно выражать в процентах или долях единицы. Для его использования в расчетах при исследовании модели субъекта эксплуатации РКТ удобнее пользоваться долями единицы, для оценки уровня компетентности конкретного специалиста – процентами.

Таким образом, каждый из показателей $K = \{K1, K3, K6, K7, K8, K9, K10\}$ возможно определить в диапазоне $0 \leq K \leq 1$ или $0 \leq K_{\%} \leq 100\%$. Учитывая необходимость использования аддитивной свертки при формировании агрегированного показателя уровня освоения компетенции, для каждого частного показателя необходимо назначить весовой коэффициент. При выборе весовых коэффициентов требуется учесть следующие ограничения, накладываемые на указанную задачу:

1. Значения весовых коэффициентов должны убывать в соответствии с порядком, определенным в векторе r' .

2. Вклад каждого частного показателя в интегральный должен быть различим для должностного лица, определяющего степень компетентности специалиста.

3. Сумма весовых коэффициентов частных показателей равна 1.

4. Закон, по которому убывают значения весовых коэффициентов частных показателей, должен обеспечивать выполнение критериев различимости заданным в соответствии с условием 2.

5. Начальное значение наибольшего весового коэффициента $k_1 > \frac{1}{7}$ (для случая, когда количество весовых коэффициентов равно n , $k_1 > \frac{1}{n}$).

6. Критерий различимости $K_r \leq k_n$, где k_n – наименьший весовой коэффициент.

По сути начальное значение наибольшего весового коэффициента (в нашем случае это k_1) и наименьший весовой коэффициент задают интервал поиска весовых коэффициентов частных показателей уровня освоения компетенции. Для определения их значений необходима разработка специализированного алгоритма, основанного на итерационных процедурах. Критерий различимости может быть задан числовым значением или функцией. Открытым остается вопрос о значении этого критерия. Нельзя исключать вариант определения критерия различимости в зависимости от задачи, стоящей перед субъектом эксплуатации.

В целом сформулированные ограничения и ранжировка показателей позволяют приступить к поиску весовых коэффициентов для определения агрегированного показателя уровня освоения компетенции, что составляет одно из направлений дальнейших исследований в области квалиметрии профессиональной компетентности личного состава организаций, эксплуатирующих РКТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интегральный показатель уровня освоения компетенции включает в свой состав частные показатели, определенные на основе экспертных процедур. В перечень частных показателей уровня освоения компетенции вошли: уровень образования ($K1$), время фактического исполнения обязанностей по должности ($K3$), количество повторений успешно завершенных алгоритмов иерархического взаимодействия ($K6$), количество повторений успешно завершенных алгоритмов участия в ЭП ($K7$), количество повторений успешно завершенных алгоритмов участия в повседневной деятельности ($K8$), количество алгоритмов, находящихся на одном уровне иерархии ($K9$), количество алгоритмов, находящихся на соседних уровнях иерархии ($K10$). Ранжирование по степени значимости показателей представлено вектором $r' = \{1, 2, 4, 3, 6, 5, 7\}$ для вектора $K = \{K1, K3, K6, K7, K8, K9, K10\}$. Аддитивная свертка указанных показателей составляет агрегированный (интегральный) показатель уровня освоения компетенции.

Показатели $K3$, $K6$, $K7$, $K8$ являются функцией времени. Это позволяет говорить о возможности определения динамики указанных и интегрального показателей уровня освоения компетенции. В качестве исходных данных для решения задач динамики показателей уровня освоения компетенции должны быть использованы результаты объективного мониторинга деятельности должностного лица. Наличие результатов такого исследования позволит обоснованно принимать кадровые решения и формировать компетентностные модели субъектов эксплуатации РКТ для выявления их возможностей по решению эксплуатационных задач.

Для определения интегрального показателя уровня освоения компетенции необходимо определение весовых коэффициентов для каждого частного показателя. Определение этих показателей возможно путем использования итерационных процедур.

Список используемых источников

1. Модели нештатного функционирования пневмогидравлических систем комплексов заправки ракет космического назначения / Е.В. Басотин, Ю.А. Гравченко, Б.К. Гранкин и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 655. – С. 140–149.

2. Математическая модель функционирования системы распределения и преобразования потоков / Ю.А. Гравченко, Б.К. Гранкин, И.О. Кукушкин и др. // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» 13–14 декабря 2018 г. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 168–173.
3. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – Введен впервые 28.09.2015. – М.: Стандартиформ, 2018. – 48 с.
4. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Введен впервые 28.09.2015. – М.: Стандартиформ, 2015. – 23 с.
5. ГОСТ Р ИСО 9004-2010. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества. – Введен впервые 23.11.2010. – М.: Стандартиформ, 2011. – 40 с.
6. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по специальности 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов (уровень специалитета). Утв. приказом Министерства образования и науки РФ 2016 г. № 1517. – URL: <http://fgosvo.ru/news/2/2130> (дата обращения: 08.04.2019).
7. Прохоров Ю.К., Фролов В.В. Управленческие решения: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 138 с.
8. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Методы обработки экспертной информации: учеб.-метод. пособие. – СПб.: ГУАП, 2005. – 42 с.
9. Шихов Ю.А., Шихова О.Ф. Экспертные методы в педагогических исследованиях. – URL: http://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/5089/1/ippo_2015_2_48.pdf (дата обращения: 17.12.2019).
10. Кунтурова Н.Б. Квалиметрия профессиональной компетентности в системе непрерывной подготовки и распределения офицерских кадров Космических войск: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 368 с.

Ю.А. Гравченко,
кандидат техн. наук, доцент;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор;
С.В. Чирва,
кандидат техн. наук

ЭРГАТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ИНФОРМАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Представлено формализованное описание организации, эксплуатирующей ракетно-космическую технику для использования в автоматизированных системах управления жизненным циклом объектов ракетно-космической техники. В целях формализации понятия «компетенция» («профессиональная компетенция») предложено считать компетенцию библиотекой алгоритмов, содержащей алгоритмы участия должностного лица в эксплуатационных процессах. Рассматривается вариант построения графа иерархического устройства эксплуатирующей организации. Рассмотрен комплекс математических моделей программного комплекса автоматизированной системы управления жизненным циклом объектов ракетно-космической техники.

Ключевые слова: жизненный цикл, управление жизненным циклом, компетенция, алгоритм, объекты ракетно-космической техники, эксплуатация.

ВВЕДЕНИЕ

Для участия в эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ) обслуживающему персоналу (ОП) необходима соответствующая квалификация. В федеральном законе от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» [1] термин «квалификация» определяется как уровень знаний, умений, навыков и компетенции, характеризующий подготовленность к выполнению определенного вида профессиональной деятельности. Однако действующие федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (ФГОС ВО), в частности ФГОС ВО 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» [2], не предъявляют требований к знаниям, умениям и навыкам выпускников указанной специальности, но определяют профессиональные компетенции, которыми должен обладать выпускник.

В различных источниках [3, 4] профессиональные компетенции определяются как способность работника выполнять работу в соответствии с требованиями должности. При этом, как правило, делается оговорка о том, что компетенции не являются простой совокупностью знаний умений и навыков, необходимых для исполнения должностных обязанностей, что позволяет говорить о том, что понятие «профессиональная компетенция» включает в себя и мотивацию должностного лица к выполнению соответствующего вида работ, и осознание социальной значимости своей деятельности, и способность адаптироваться к реальным условиям работы.

Требования ФГОС ВО 24.05.01 [2] определяют, что для участия в эксплуатации РКТ в качестве инженера должностное лицо должно обладать общекультурными, общепрофессиональными, профессиональными и профессионально-специализированными компетенциями, а в случае персонала космических войск (КВ) еще и компетенциями, установленными квалификационными требованиями к военно-профессиональной подготовке выпускников. Однако для участия в эксплуатации РКТ на конкретной должности в эксплуатирующей организации должностному лицу необходимо обладать набором компетенций, определяемых матрицей компетенций этой организации для соответствующей должности. Для обеспечения

взаимозаменяемости должностных лиц, а также возможности их должностного роста перечень компетенций, которыми должен обладать персонал, целесообразно устанавливать шире, чем определяется эксплуатирующей организацией (отраслью) для конкретной позиции.

Перечисленные аспекты в целом определяют квалификацию специалиста, необходимую для участия в эксплуатации РКТ. Хотя после назначения на должность информация о компетенциях должностного лица фактически не используется в работе организации, а вопросам действий специалиста в случае перехода эксплуатируемых агрегатов и систем в нештатные состояния не уделяется должного внимания ни в ФГОС ВО [2], ни в матрицах компетенций эксплуатирующих организаций. Требования ФГОС ВО в области рассмотрения нештатных состояний РКТ ограничиваются способностями сотрудников по поиску и устранению неисправностей, обеспечению надежности и безопасности эксплуатации соответствующего вида оборудования. Между тем требования к оперативности принятия решений на управление агрегатами и системами объектов РКТ в нештатных состояниях предполагают наличие у персонала компетенций по своевременному обнаружению нештатных состояний, прогнозированию их последствий и выработке решений на управление агрегатами и системами объектов РКТ. Требования к оперативности принятия решений, разумеется, выдвигаются только для тех эксплуатационных процессов, которые критически важны для выполнения боевой задачи или безопасности обслуживаемого персонала, агрегатов и систем объектов РКТ. Именно для таких случаев целесообразно применение автоматизированных систем управления жизненным циклом (ЖЦ) агрегатов и систем объектов РКТ в нештатных состояниях, а точнее, систем поддержки принятия решений (СППР) [5, 6]. Очевидно, что для эффективной работы СППР необходимы не только значительный объем технических данных, содержащихся в интегрированной единой информационной среде [7], предназначенной для сопровождения ЖЦ, но и виртуальные модели должностных лиц, обязанных принимать решения в условиях нештатного функционирования агрегатов и систем объектов РКТ или участвовать в их реализации.

Таким образом СППР целесообразно строить не только как совокупность алгоритмов обработки данных интегрированной единой информационной среды (ЕИС) [7] сопровождения ЖЦ агрегатов и систем объектов РКТ, но и как совокупность процедур и алгоритмов взаимодействия операторов и должностных лиц организации, эксплуатирующей РКТ с ЕИС, т.е. СППР должна являться программно-аппаратным комплексом, построенным на основе алгоритмически взаимосвязанных математических моделей элементов, структур, операций, алгоритмов функционирования агрегатов (систем) объектов РКТ и комплексе моделей субъектов эксплуатации, включающих компетентностную модель специалиста и библиотеки алгоритмов его участия в эксплуатационных процессах [5, 6].

При реализации указанного подхода к построению СППР важной задачей является математическое описание комплекса моделей субъектов эксплуатации [5, 6], т.е. формализация взаимосвязанных моделей персонала эксплуатирующих организаций, структуры этих организаций, алгоритмов выработки решений на управление функционированием объектов РКТ, алгоритмов контроля эксплуатационных процессов и действий персонала, алгоритмов обеспечения безопасности и алгоритмов взаимодействия с ЕИС.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ СУБЪЕКТОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В целях формализованного описания субъекта эксплуатации выделим множества переменных, характеризующих способность эксплуатирующей организации выполнять задачи по предназначению. Пусть D – множество должностей организации:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n\},$$

где d – лингвистическая переменная (наименование должности);
 i – порядковый номер должности;
 n – общее количество должностей организации

Тогда D' – множество занятых должностей организации, подмножество множества D :

$$D' \in D.$$

Пусть K – множество компетенций, необходимых организации для эксплуатации РКТ:

$$K = \{k_1, k_2, \dots, k_j, \dots, k_m\},$$

где k – компетенция, определенная эксплуатирующей организацией как необходимая для эксплуатации РКТ;
 j – порядковый номер компетенции;
 m – общее количество компетенций организации, необходимых для эксплуатации РКТ.

В целях формализации понятия «компетенция» («профессиональная компетенция») примем, что компетенция k_j является библиотекой алгоритмов, содержащей алгоритмы участия должностного лица в эксплуатационных процессах (ЭП). Это могут быть алгоритмы выработки решений на управление ЖЦ изделий, алгоритмы контроля и участия в ЭП, алгоритмы обеспечения безопасности, алгоритмы взаимодействия с ЕИС и др.:

$$k_j = \langle A_1, A_2, A_3, \dots, A_l, \dots, A_v \rangle,$$

где A – алгоритм участия в ЭП;
 v – общее число алгоритмов в данной компетенции.

Пусть MK – матрица компетенций эксплуатирующей организации размером $D \times K$, ставящая в соответствие множеству должностей организации D множество компетенций K , необходимых организации для эксплуатации РКТ.

Пусть MI матрица (граф) иерархического устройства организации. Размер матрицы – $D \times D$. Вершинами графа являются номера должностей, а связи характеризуют информационные потоки между должностными лицами внутри организации: информационные потоки управления подчиненными, контроля, обратной связи со звеньями управления, сбора и обобщения информации, информационного обмена между подразделениями. Для кодирования связей в графе иерархического устройства организации возможно использовать алфавит многозначной логики, где связи обозначаются числовыми кодами Гёделя [8], позволяющими учитывать разнородность возможных информационных потоков между должностными лицами организации. Коды Гёделя обладают свойством однозначно восстанавливать значение каждого параметра информационной связи между должностными лицами по коду обобщенного информационного потока [5, 6, 8]. Коды Гёделя вычисляются по формуле

$$r_\omega = 2^{\omega_1} \cdot 3^{\omega_2} \cdot 5^{\omega_3} \cdot 7^{\omega_4} \cdot 11^{\omega_5} \dots,$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ – булевы переменные, принимающие значения 0 или 1 в зависимости от наличия в информационном потоке составляющей, закодированной в основании степенной функции. Основание степени выбирается из ряда простых чисел. Пример матрицы MI эксплуатирующей организации представлен на рис. 1. Учитывая, что направление потока в матрице смежности (матрице иерархического устройства организации MI) определено слева направо, снизу вверх [9], обозначим кодом 2 информационный поток управления подчиненными, кодом 3 – поток обратной связи со звеном управления, кодом 5 – поток информационного обмена между равнозначными звеньями управления, кодом 7 – поток информационного обмена между звеньями управления с отношениями подчиненности от нижестоящего звена к

вышестоящему, кодом 11 – поток информационного обмена между звеньями управления с отношениями подчиненности от вышестоящего звена к нижестоящему. При необходимости расширения номенклатуры информационных потоков возможно назначение и других кодов.

	1	2	3	4	5	...	p	...	n
1		22	22	22	2		2		2
2	21		5	5	22		22		2
3	21	5		5	22		22		2
4	21	5	5		22		22		2
5	3	21	21	21			5		2
...									
p	3	21	21	21	5				2
...									
n	3	3	3	3	3		3		

Рис. 1. Матрица смежности MI иерархического устройства организации, номера строк и столбцов соответствуют номерам вершин графа:

1 – руководитель организации; 2, 3, 4, – заместители руководителя организации; 5– p – начальники отделов (департаментов, управлений); p – n – исполнители

По матрице MI можно построить диаграмму графа иерархического устройства эксплуатирующей организации. Очевидно, что она будет представлять собой ориентированный псевдограф с большим количеством связей между вершинами, в том числе включающим в свой состав кратные ребра. Поэтому построение диаграммы графа иерархического устройства эксплуатирующей организации с полным перечнем связей нельзя признать наглядным и целесообразным для использования операторами при эксплуатации РКТ. Для получения сведений об организации и ее иерархическом устройстве одним из вариантов является использование «фильтров» функциональных связей, например можно построить диаграмму графа информационного обмена или диаграмму отношений подчиненности внутри организации.

Перечисленные выше множества, соотношения, матрицы, библиотеки в целом достаточно полно характеризуют способность организации выполнять задачи по своему предназначению. Однако для решения задач информационного сопровождения жизненного цикла изделий РКТ указанных объектов недостаточно, необходима «техническая составляющая» информационного сопровождения жизненного цикла изделий РКТ. В соответствии с ГОСТ Р 56135–2014 [7] «информационные технологии поддержки ЖЦ (ИПИ-технологии) применяют для обеспечения информационной поддержки управления ЖЦ, процессов и технологий, используемых при разработке, производстве и эксплуатации продукции военного назначения (ПВН). В их числе – информационные модели типовой конструкции образцов ПВН и их составных частей (СЧ), модели системы их технической эксплуатации (ТЭ), а также аналогичные модели для конкретных экземпляров изделий. Указанные модели формируют и поддерживают в актуальном состоянии начиная с ранних этапов и стадий ЖЦ для использования на протяжении всего ЖЦ вплоть до утилизации всех экземпляров ПВН определенного типа». Технологии информационной поддержки ЖЦ ПВН в настоящее время активно развиваются в различных отраслях экономики. Вопросы поддержки принятия решений при управлении ЖЦ объектов РКТ были рассмотрены в ранее опубликованных работах [5, 6]. В некоторых из них предложен алгоритмический подход, в основе которого лежит алгоритмическая модель эксплуатируемого агрегата (агрегатов). Однако, учитывая эргатический аспект функционирования объектов РКТ, следует предположить, что алгоритмических моделей собственно агрегатов РКТ для полноценной поддержки принятия решений должностными

лицами эксплуатирующих организаций явно недостаточно. Описанные выше математические объекты должны быть связаны алгоритмами реализации целевого предназначения функционирования организации, эксплуатирующей РКТ. Для горизонта планирования длительностью 1 год одним из подобных алгоритмов может стать план эксплуатации вооружения космодрома, центра или части.

В ходе программной реализации алгоритма функционирования организации, эксплуатирующей РКТ, необходимо учитывать не только периоды задействования оборудования по прямому назначению, проведения технического обслуживания, проведения технического освидетельствования, ремонтные работы, модернизацию оборудования и т.д., но и вовлеченность должностных лиц в указанные процессы. Одним из вариантов программной реализации указанного алгоритма функционирования является автоматизированная система управления жизненным циклом объектов РКТ (АСУ ЖЦ), построенная как совокупность взаимосвязанных, иерархически организованных программных компонентов программного комплекса, в основу которых положены библиотеки алгоритмов управления эксплуатационными процессами агрегатов и систем объектов РКТ и алгоритмы действий должностных лиц при реализации указанных процессов.

В качестве математического обеспечения процесса алгоритмизации перечисленных программных компонентов используются математические объекты, описанные выше. Стоит отметить, что для корректного функционирования программного комплекса в целом необходимо учитывать целевое предназначение организации, эксплуатирующей РКТ. Для этого вводим понятие корневого алгоритма (KA) функционирования организации, который формируется на основе множества функций реализации целевого предназначения эксплуатирующей организации. Для упрощения задачи примем, что KA сам является множеством функций реализации целевого предназначения F_i :

$$KA = \{F_1(t), F_2(t), F_3(t), \dots, F_i(t), \dots, F_A(t)\}.$$

Здесь A – общее количество функций реализации целевого предназначения эксплуатирующей организации;

t – время.

Таким образом, используя в качестве основы корневой алгоритм, есть возможность связать математические объекты, описывающие деятельность эксплуатирующих организаций, для получения комплекса математических моделей программного комплекса АСУ ЖЦ объектов РКТ.

КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В качестве функций реализации целевого предназначения эксплуатирующей организации могут быть назначены сложные функции, содержащие переменные-литералы, определенные на основе задач эксплуатирующей организации, содержащихся в уставе этих организаций и (или) в должностных инструкциях их руководителей; функции, характеризующие продолжительность выполнения этих задач; библиотеки алгоритмов для выполнения указанных задач; функции ресурсного обеспечения. В этом случае указанные функции могут быть реализованы как самостоятельные объекты программного комплекса, логически связанные с корневым алгоритмом, а собственно корневой алгоритм может содержать лишь формальное описание функций реализации целевого предназначения (название, ссылку на объект и т.п.).

На рис. 2 представлен вариант блок-схемы АСУ ЖЦ объектов РКТ. Здесь отражено информационное взаимодействие виртуальных и реальных объектов эксплуатации с субъектом

эксплуатации – организацией, эксплуатирующей РКТ. Субъект эксплуатации характеризуется множеством D' , при этом каждый элемент множества d_i связан с множеством K'_i – множеством компетенций конкретного должностного лица, которое, в свою очередь, является подмножеством множества K , $K'_i \in K$.

Корневой алгоритм взаимодействует с субъектом, последовательно активируя в множестве компетенций соответствующие алгоритмы участия в ЭП, т.е. обращается к должностным лицам путем директив и указаний, сформированных на основе указанных алгоритмов.

Правом вмешательства в работу корневого алгоритма наделен руководитель организации. Он может корректировать задачи, стоящие перед этой организацией, удалять из корневого алгоритма задачи, утратившие актуальность, добавлять вновь возникающие задачи. Каждый из объектов АСУ ЖЦ имеет возможность осуществлять информационный обмен с ЕИС. Для обеспечения функционирования объектов РКТ в нештатных состояниях в составе ЕИС предусмотрена система поддержки принятия решений (СППР).

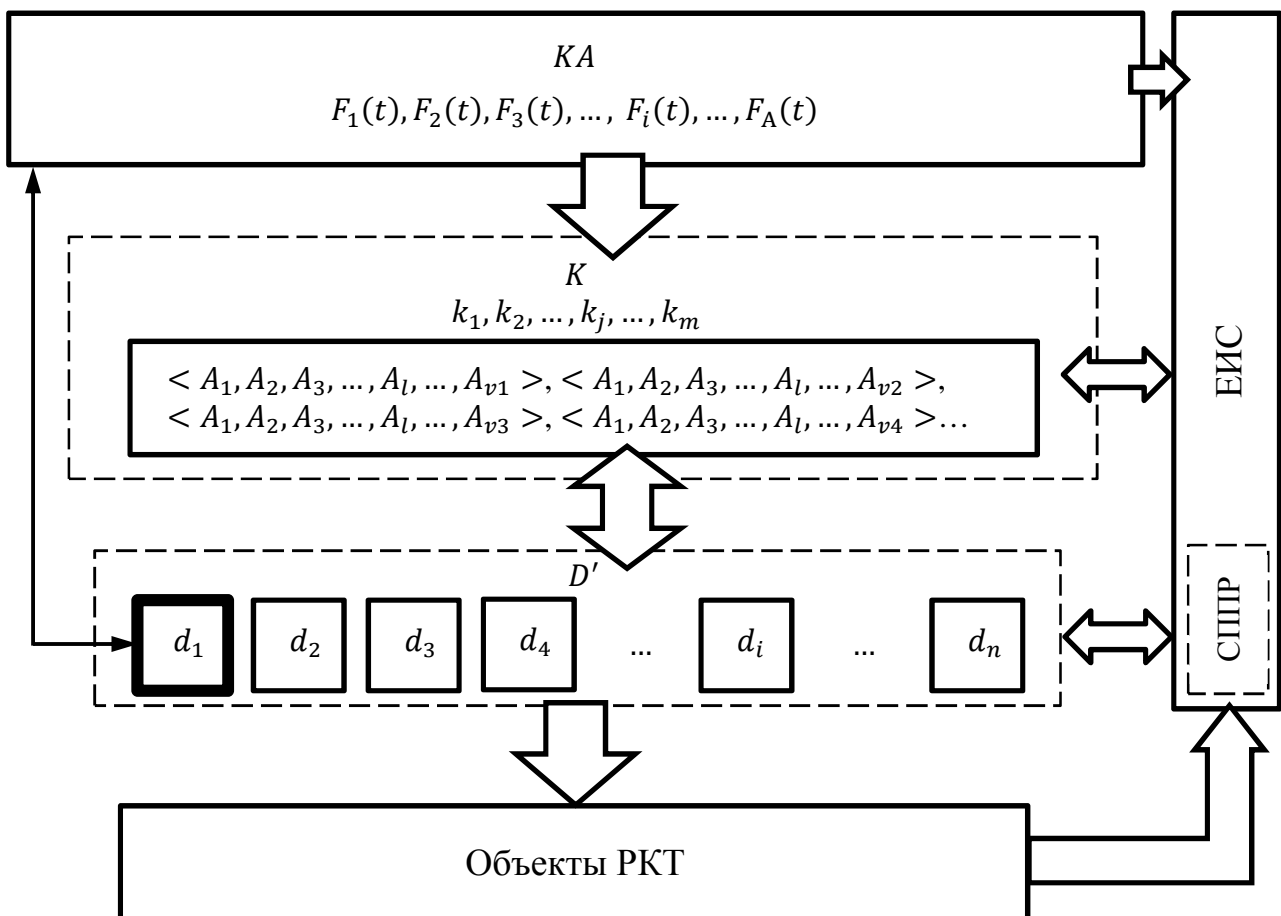


Рис. 2. Блок-схема автоматизированной системы управления жизненным циклом объектов РКТ. Стрелками обозначены направления потоков информационного обмена

Для разграничения доступа к ЕИС и библиотекам алгоритмов участия в ЭП можно использовать граф иерархического устройства эксплуатирующей организации. Для этого при кодировании информационных потоков между должностными лицами внутри организации в коды сложных функций информационного обмена добавляются коды прав доступа к ЕИС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатация РКТ при всей сложности и наукоемкости ее объектов до сих пор имеет низкий уровень автоматизации ЭП. Между тем возрастающие требования к обеспечению эффективности и безопасности ЭП предполагают постановку и решение оптимизационных задач в сфере управления ЖЦ объектов РКТ. Для решения таких задач необходимо учитывать возможности эксплуатирующих организаций в сфере обеспечения ЭП, включая и эргатический аспект функционирования системы эксплуатации объектов РКТ.

Внедрение АСУ ЖЦ в процессы управления ЖЦ, планирования ЭП позволит выполнить следующее:

- определить уровень компетентности должностных лиц эксплуатирующих организаций [за основу могут быть взяты оценки количества алгоритмов участия в ЭП конкретных должностных лиц и качества их выполнения (степень достижения цели выполнения алгоритма)];
- получить достоверно подтвержденные значения коэффициентов загруженности должностных лиц эксплуатирующих организаций (путем анализа фактического времени исполнения должностных обязанностей);
- исключить или свести к минимуму возможности злоупотреблений при проведении мероприятий организации и контроля ЭП (путем анализа и сопоставления данных, представленных руководством и АСУ ЖЦ);
- обеспечить рациональное расходование ресурсов организации (путем обеспечения электронного учета средствами ЕИС);
- сократить время поиска и устранения неисправностей систем и агрегатов РКТ (путем внедрения и использования СППР);
- определить степень достижения целей функционирования организаций, эксплуатирующих РКТ (путем выполнения сравнительного анализа процедур выполнения алгоритмов участия в ЭП, учтенных трудозатрат и формальной оценки результата выполнения того или иного алгоритма).

В связи с высокой мощностью информационных потоков в ЕИС, характеризующих ЭП, построение АСУ ЖЦ целесообразно выполнять с использованием технологий искусственного интеллекта.

Список используемых источников

1. Об образовании в Российской Федерации: федеральный закон от 29.12.2012 №273-ФЗ. Принят Государственной Думой 21 декабря 2012 г. Одобрен Советом Федерации 26 декабря 2012 г. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (дата обращения: 08.04.2019).
2. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по специальности 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов (уровень специалитета). Утв. приказом Министерства образования и науки РФ 2016 г. № 1517. – URL: <http://fgosvo.ru/news/2/2130> (дата обращения: 08.04.2019).
3. Мержуева Л.М. Профессиональная компетентность: понятие и признаки. – URL: <https://nauka21veka.ru/articles/pedagogicheskie-nauki/professionalnaja-kompetentnost-ponyatie-i-priznaki-1488569692/> (дата обращения: 08.04.2019).
4. Никонова С.В. Профессиональная компетенция: понятие и сущность. – URL: <https://nsportal.ru/vuz/pedagogicheskie-nauki/library/2015/05/02/professionalnaja-kompetentsiya-ponyatie-i-sushchnost> (дата обращения: 08.04.2019).
5. Модели нештатного функционирования пневмогидравлических систем комплексов запорки ракет космического назначения / Е.В. Басотин, Ю.А. Гравченко, Б.К. Гранкин и

др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 655. – С. 140–149.

6. Математическая модель функционирования системы распределения и преобразования потоков / Ю.А. Гравченко, Б.К. Гранкин, И.О. Кукушкин и др. // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» 13–14 декабря 2018 г. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 168–173.

7. ГОСТ Р 56135–2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения. – Введён впервые 19.09.2014. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

8. Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В. Синтез функциональной структуры систем потокораспределения в технологическом оборудовании ракетно-космической техники // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т.1. – С. 94–99.

9. Оре О. Теория графов. – 2-е изд. – М.: Наука, 1980. – 336 с.

А.Н. Дьяков,
кандидат техн. наук;
А.С. Кокарев,
кандидат техн. наук;
А.В. Пачин

МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОПОЛНЕНИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО КОМПЛЕКТА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ

В публикации представлена методика, которая в сочетании с моделью, представленной в [1], позволяет обосновать параметры оптимальной системы обеспечения многономенклатурного комплекта ЗЧ. Оптимальность достигается выбором мест размещения и состава комплектов ЗЧ, обеспечивающих требуемые показатели надежности при минимальной ресурсоемкости эксплуатационных процессов.

Новизна методики определяется применением алгоритма поиска недоминируемых альтернатив, который адаптирован к решению задачи обоснования оптимальной системы обеспечения запасными частями образца вооружения и обеспечивает оперативность решения оптимизационной задачи для модели с большим количеством переменных. В статье показаны результаты апробации методики для обоснования выбора оптимального варианта построения системы обеспечения запасными частями в части альтернатив мест размещения и состава комплектов ЗЧ по критическим номенклатурам.

Ключевые слова: система обеспечения запасов, запасные части, инструменты и принадлежности, формирование комплекта ЗИП, оптимальный комплект ЗИП, достаточность ЗИП, готовность ЗИП.

ВВЕДЕНИЕ

Уровень технологического развития современных образцов вооружения определил возросшие требования к качеству их эксплуатации. В то же время при промышленном производстве современных сложных технических систем наблюдается тенденция к снижению себестоимости изготовления, существенному увеличению затрат на ремонт и хранение и всё более широкому применению неремонтопригодных элементов. Существенное возрастание числа показателей надежности и номенклатур запасных частей, а также значительные различия надежности и оперативности доставки запасных частей различных номенклатур, обусловленные выбором их производителя, требуют их полного и раздельного учета. Указанные особенности должны быть приняты во внимание при формировании системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и адаптации «традиционной» системы обеспечения запасными частями (ЗЧ). В настоящее время применяется достаточно широкий арсенал методик формирования комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП). Наиболее часто при создании образцов вооружения используют методики, описанные в [2, 3, 4, 5]. Считать их универсальными, однако, нельзя ввиду ряда особенностей, которые не позволяют их применять для многономенклатурных образцов вооружения. В частности, задачи обоснования оптимальных параметров системы пополнения ЗЧ указанных образцов вооружения сводятся к поиску значений большого числа переменных, что существенно увеличивает вычислительную сложность и время решения таких задач. Более того, для отдельных образцов вооружения, укомплектованных многономенклатурными комплектами ЗЧ, размерность задачи в принципе не позволяет найти решение в приемлемые сроки.

Известные способы преодоления указанных недостатков далеко не всегда допустимы. Так, «загрубление» модели надежности образца повлечет за собой снижение ее адекватности, а использование приближенных методов расчета – снижение достоверности полученных результатов.

Одним из подходов к снижению размерности оптимизационных задач является использование методов динамического программирования и, в частности, метода Кеттеля [6, 7, 8].

В этом случае процесс решения сводится к последовательному расчету (и хранению для дальнейших вычислений) условно-оптимального значения только одной переменной.

Сложность практической реализации указанного метода заключается в его слабой формализации и необходимости «ручного» проведения расчетов лично оператором. Такой способ решения задач применяется значительно реже метода динамического программирования, реализующего алгоритм Беллмана [9], так как алгоритмизация поставленной задачи и, как следствие, решение задачи с помощью вычислительных средств требуют существенно больших затрат. Дополнительные временные затраты при составлении алгоритма решения задач обусловлены необходимостью в каждом цикле расчетов выполнять логические операции, направленные на сужение множества недоминируемых альтернатив. Несмотря на определенные трудности алгоритмизации метода Кеттеля, актуальность его выполнения обусловлена тем, что для ряда задач именно этот способ позволяет снизить трудоемкость и повысить оперативность получения результата за счет оптимизации после каждого шага расчетов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОПОЛНЕНИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО КОМПЛЕКТА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ

Пусть на стадии разработки образца вооружения проводятся мероприятия по планированию его системы технического обслуживания и ремонта и материально-технического обеспечения. Выполнение инженерного анализа, а также расчеты с применением модели поддержания готовности позволяют установить зависимость показателей готовности $p_i(X_i)$, длительности восстановления работоспособного состояния $t_i(X_i)$ и затрат на поддержание готовности образца вооружения $c_i(X_i)$ от параметров, характеризующих его систему эксплуатации, а именно: интенсивность отказов элементов, интенсивность восстановления работоспособного состояния, интенсивность отказов элементов ЗИП при хранении, математическое ожидание длительности диагностирования неисправности i -го вида, математическое ожидание длительности контроля технического состояния образца вооружения, количество элементов i -й номенклатуры в составе образца, средние удельные затраты на ТОиР, а также планируемый состав и место размещения одиночного и группового комплектов ЗИП (искомые параметры – $T_r, T_{3И}, m_1, m_2$). Состав параметров системы эксплуатации в рамках рассматриваемой статьи полагается известным и неизменным, обозначим его $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, x_{iJ}\}$ – вектор параметров пополнения запасов i -й группы однотипных элементов, $j = \overline{1, J}$. Также оставим за рамками статьи выбор и обоснование вида зависимостей $p_i(X_i)$, $c_i(X_i)$, $t_i(X_i)$, которые могут быть получены с помощью известных моделей, например описанных в [6, 10].

Для поддержания готовности образца вооружения планируется многономенклатурный комплект ЗИП, который позволит обеспечить функционирование вооружения с показателями, описываемыми кортежем $\langle P, C, T_b \rangle$ показателей готовности, ресурсоемкости поддержания готовности и длительности восстановления работоспособного состояния, при этом:

$$P = \prod_{i=1}^I p_i(X_i);$$

$$C = \sum_{i=1}^I c_i(X_i); \quad (1)$$

$$T_b = \max(t_1(X_1), t_2(X_2), \dots, t_i(X_i), \dots, t_I(X_I)),$$

где $p_i(X_i)$, $c_i(X_i)$, $t_i(X_i)$ – частные показатели готовности, ресурсоемкости и длительности восстановления соответственно i -й группы однотипных элементов, входящих в состав образца, $i = \overline{1, I}$.

В составе вектора $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, x_{iJ}\}$ имеются варьируемые параметры, к которым относятся первоначальные запасы элементов в одиночном и групповом ЗИП, стратегия и периодичность их пополнения, длительность доставки элементов из ЗИП и т.п., то есть $x_{ij} \in N_0$.

Обозначим D множество вариантов территориального размещения запасов многономенклатурного образца вооружения, т.е.

$$D = \{d^1, d^2, \dots, d^y, \dots, d^Y\};$$

$$d_i^y = \{X_1^y, X_2^y, \dots, X_i^y, \dots, X_I^y\}, i = \overline{1, I}.$$

Тогда задача выбора оптимального варианта построения системы обеспечения запасными частями многономенклатурного образца вооружения сводится к нахождению такой комбинации из J параметров пополнения запасов по каждой из I номенклатур, которая позволит обеспечить требования к готовности и длительности восстановления работоспособного состояния образца при наименьших затратах, т.е.

$$d^* \rightarrow \arg \min C(d),$$

$$\begin{aligned} d &\in D \\ P &\geq P^{\text{треб}} \\ T_{\text{в}} &\leq T_{\text{в}}^{\text{доп}} \end{aligned} \quad (2)$$

где $P^{\text{треб}}$, $T_{\text{в}}^{\text{доп}}$ – требуемые значения показателей готовности и длительности восстановления соответственно. Необходимо найти наиболее удобный способ оперативного решения подобных задач.

АЛГОРИТМ ПОИСКА НЕДОМИНИРУЕМЫХ АЛЬТЕРНАТИВ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ ОБРАЗЦА ВООРУЖЕНИЯ

Так как функциональные зависимости (1) являются сепарабельными функциями, то для их решения целесообразно применить метод динамического программирования.

Как и алгоритм Белмана, принятый «традиционным» в составе метода динамического программирования, алгоритм Кеттеля также предполагает поэтапное решение задачи. Но в данном случае под этапом понимается последовательный учет каждой последующей номенклатуры элементов в результирующих показателях готовности, длительности восстановления и ресурсоемкости по правилам (1).

Первым этапом следует считать расчет показателей эффективности образца при различных комбинациях параметров первых двух номенклатур элементов, т.е. для всех $y \in [1, Y]$ найти:

$$P_1^y = p_1(X_1^y) \cdot p_2(X_2^y); \quad (3)$$

$$T_{\text{в}1}^y = \max(t_{\text{в}1}(X_1^y), t_{\text{в}2}(X_2^y)); \quad (4)$$

$$C_1^y = c_1(X_1^y) + c_2(X_2^y). \quad (5)$$

На втором и последующих этапах осуществляется расчет показателей готовности, результативности и ресурсоемкости образца с учетом третьей и последующих номенклатур. Рекуррентные выражения для расчета показателей эффективности образца с учетом i групп однотипных элементов (не i -й группы) для всех $y \in [1, Y]$ примут вид:

$$P_i^y = P_{i-1}^y \cdot p_i(X_i^y);$$

$$T_{вi}^y = \max(T_{вi-1}^y, t_{вi}(X_i^y));$$

$$C_i^y = C_{i-1}^y + c_i(X_i^y).$$

По завершении каждого этапа необходимо отыскать и отбросить доминируемые (то есть заведомо худшие) решения, сужая множество альтернатив. Кроме того, первоначальное множество альтернатив D может содержать варианты, которые не удовлетворяют требованиям к готовности и длительности восстановления образца, т.е. $P_i^y < P^{\text{треб}}$ и $T_{вi}^y > T_{в}^{\text{доп}}$. Такие варианты следует исключать из сформированного множества.

Сепарабельность функций позволяет использовать для решения задачи выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей алгоритмизированный способ Кеттеля, представленный блок-схемой на рис 1.

На этапе формирования исходных данных (блоки 1–4) выполняется анализ технического состояния образца ВВТ и системы его эксплуатации, проводится идентификация вариантов размещения и состава комплектов запасных частей по всем критическим номенклатурам.



Рис. 1. Блок-схема методики выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей (начало)

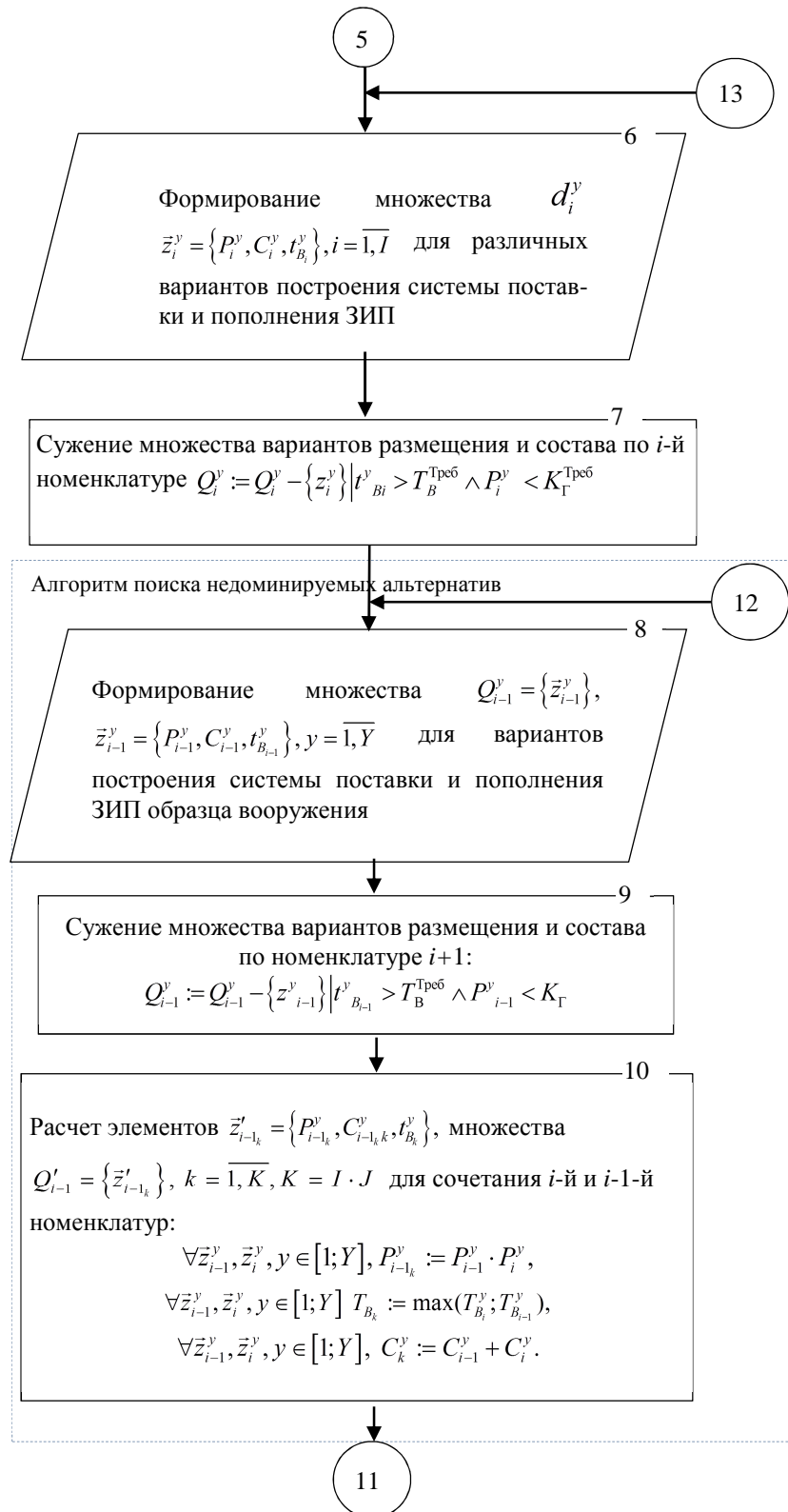


Рис. 1. Блок-схема методики выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей (продолжение)

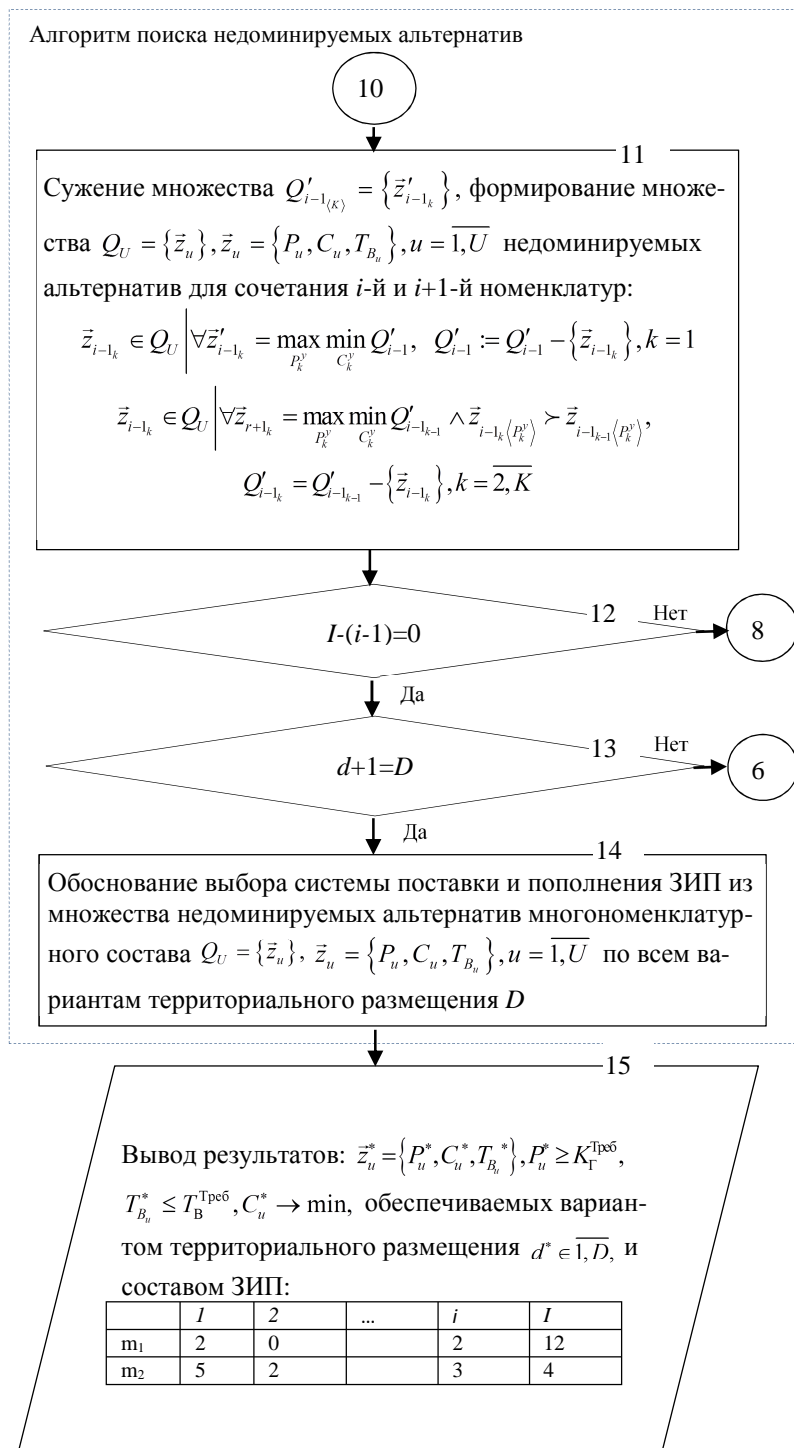


Рис. 1. Блок-схема методики выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей (окончание)

Рассмотрим последовательность действий методики, представленной на рис. 1.

1. Выполняется анализ технического состояния и системы эксплуатации, который позволяет идентифицировать параметры системы ТООР, оказывающие наибольшее влияние на готовность образца вооружения и ресурсоемкость процесса поддержания его готовности, выделить критические номенклатуры в составе ЗИП.

2. Формируется множество параметров системы ТООР для каждой критической номенклатуры.

3. Выполняется анализ условий применения образца ВВТ, особенностей его системы эксплуатации, который позволяет обосновать параметры системы поставки и пополнения ЗИП.

4. Осуществляется формирование множества параметров длительности доступа к элементам, находящимся в составе ЗИП-О и ЗИП-Г, вариантов территориального размещения с учетом распределения вооружения и пунктов пополнения запасов в позиционном районе.

5. С помощью модели, приведенной в [6], рассчитываются показатели готовности образца вооружения, максимальной длительности восстановления работоспособного состояния и ресурсоемкости поддержания готовности, определяемые составом и территориальным размещением комплектов ЗИП, с учетом номенклатуры i .

6. Формируется полное множество вариантов системы поставки и пополнения ЗИП по i -й номенклатуре d_i^y , где $D = \{d_1, d_2, \dots, d_y, \dots, d_Y\}$, $d^y = \{X_1^y, X_2^y, \dots, X_i^y, \dots, X_j^y\}$.

7. Исключаются из Q_i варианты, не удовлетворяющие критериям готовности и длительности восстановления.

8. Формируется полное множество вариантов системы поставки и пополнения ЗИП по $i+1$ -й номенклатуре \bar{z}_{i+1}^y .

9. Исключаются из Q_{i+1}^y варианты, не удовлетворяющие критериям готовности и длительности восстановления.

10. Рассчитываются показатели для сочетания номенклатур $i-1$ и i по каждому варианту территориального размещения множества D , определяющему параметры $T_\Gamma, T_{3И}, m_1, m_2$.

11. Применение алгоритма отыскания недоминируемых альтернатив позволяет снизить мощность множества вариантов системы поставки и пополнения ЗИП Q_U после каждого этапа расчетов, исключив доминируемые варианты.

12. Цикл расчетов завершается учетом последней критической номенклатуры I .

13. Цикл расчетов проводится для каждого территориального варианта размещения из множества D комплектов ЗИП по всем критическим номенклатурам I .

14. Выполняется обоснование варианта оптимальной системы поставки и пополнения ЗИП, определяемого территориальным размещением, и состава многономенклатурного комплекта, обеспечивающих требования к готовности и длительности восстановления работоспособного состояния при минимальных затратах на поддержание готовности.

15. Осуществляется вывод результатов: показателя готовности, максимальной длительности восстановления работоспособного состояния образца ВВТ, местоположения и состава по каждой номенклатуре комплектов ЗИП, обеспечивающих указанные показатели с минимальными затратами.

Полученные значения для двух критичных номенклатур i и $i-1$ представлены вектором

$$\bar{z}_{i-1_k} = \{P_k, C_k, T_{B_k}\}, k = \overline{1, K}; K = IJ, \quad (6)$$

где K – число вариантов, сочетающих состав номенклатур i и $i-1$ в ЗИП.

Значения векторов \bar{z}_{i-1_k} для возможных вариантов состава ЗИП представим множеством $Q'_{i-1} = \{\bar{z}_{i-1_k}\}$. В соответствии с принципом Белмана часть элементов множества Q'_{i-1} , не яв-

ляющихся условно-оптимальными по завершении каждого этапа, может быть отброшена и может не использоваться в дальнейших вычислениях.

Обозначим подмножество недоминируемых альтернатив Q_U , сформируем подмножества его альтернатив векторов \bar{z}'_{i-1_k} по следующему правилу:

$$\bar{z}'_{i-1_k} \in Q_U \left| \forall \bar{z}'_{i-1_k} = \max_{P_k} \min_{C_k} Q'_{i-1}, Q'_{i-1} := Q'_{i-1} - \{\bar{z}'_{i-1_k}\}, k = 1. \quad (7)$$

Для нахождения второго и последующих недоминируемых значений используем

$$\bar{z}'_{i-1_k} \in Q_U \left| \forall \bar{z}'_{i-1_k} = \max_{P_k} \min_{C_k} Q'_{i-1_{k-1}} \wedge \bar{z}'_{i-1_{k-1}} \succ \bar{z}'_{i-1_{k-1}(P_k)}, Q'_{i-1_k} = Q'_{i-1_{k-1}} - \{\bar{z}'_{i-1_k}\}, k = \overline{2, K}. \quad (8)$$

При дальнейших расчетах для учета третьей и последующих номенклатур элементов в составе ЗИП необходимо использовать тот же алгоритм. Однако на каждом последующем этапе каждому y -му варианту присваиваются соответствующие элементы множеств $\bar{z}^y_i = \{P_i^y, C_i^y, T_{B_i}^y\}, i = \overline{1, I}$ третьей и последующих $i-1$ номенклатур, каждому j -му варианту присваиваются элементы множества Q_U , полученные на предшествующем этапе.

Расчет показателей готовности, длительности восстановления работоспособного состояния и ресурсоемкости производится от первой до последней критической номенклатуры. Реализация последовательности операций проводится для каждого варианта территориального размещения. Сущность алгоритма поиска недоминируемых альтернатив системы обеспечения запасными частями образца вооружения более наглядно можно представить в виде гистограммы (рис. 2), где представлены значения готовности и ресурсоемкости каждого альтернативного варианта размещения и состава комплектов ЗИП образца вооружения. Кроме того, каждый вариант удовлетворяет требованиям к длительности восстановления работоспособного состояния. На гистограмме выделено множество недоминируемых альтернатив, которые следует учитывать в дальнейшем, остальные варианты можно отбросить, тем самым снизив трудоемкость дальнейших расчетов.

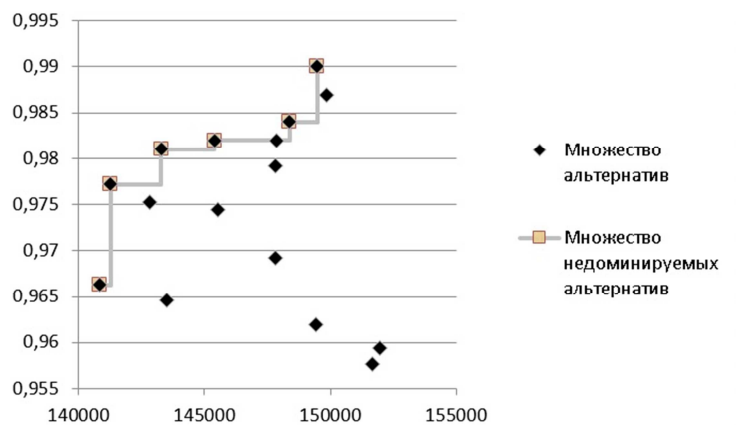


Рис. 2. Множество недоминируемых альтернатив системы обеспечения запасными частями образца вооружения

Каждый полученный элемент множества недоминируемых альтернатив соответствует варианту территориального размещения и составу комплектов ЗИП образца вооружения, которые удовлетворяют заданным требованиям к оперативности восстановления работоспособ-

ного состояния. Полученный вариант в имеющихся условиях обеспечивает заданные требования к готовности образца вооружения с минимальными эксплуатационными затратами.

Описанный в статье алгоритм в составе методики выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей реализован в виде программы для ЭВМ, интерфейс которой показан на рис. 3.

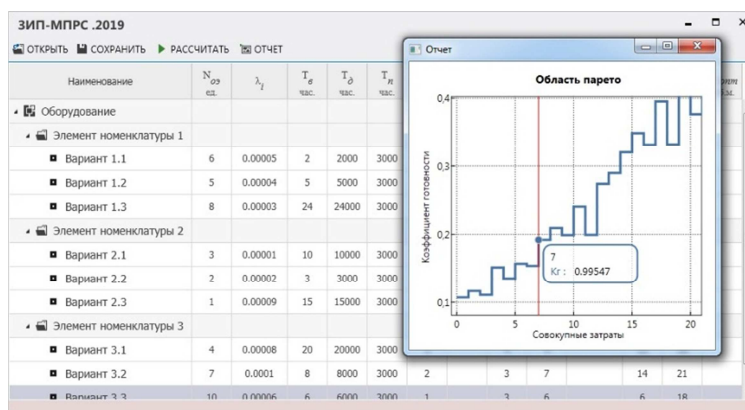


Рис. 3. Программа для ЭВМ, реализующая методику выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей образца вооружения

Методика выбора параметров, представленная в виде программного продукта, не требует специальной подготовки оператора и позволяет в приемлемые сроки провести расчет и обоснование варианта размещения и состава комплектов ЗИП, обеспечивающих требования к готовности и длительности устранения неисправности образца вооружения при минимальных эксплуатационных затратах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В публикации предложена методика выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей малогабаритной приемно-регистрающей станции. В отличие от других представленная методика позволяет при известных показателях готовности, длительности устранения неисправности и ресурсоемкости найти оптимальный вариант построения системы обеспечения запасными частями в части обоснования варианта территориального размещения и состава комплектов ЗИП. В сочетании с моделью, представленной в [1], методика позволяет обосновать выбор параметров системы ТОиР и системы обеспечения запасными частями, обеспечивающий требуемый показатель готовности минимальными затратами ресурсов.

В составе методики разработан алгоритм поиска недоминируемых альтернатив, в основе которого лежит методика Кеттеля, разновидность метода динамического программирования [6, 7, 8]. Однако в отличие от методики Кеттеля представленный в статье алгоритм отыскания недоминируемых альтернатив обеспечивает снижение длительности и трудоемкости за счет автоматизации расчетов. Методика реализована в виде программного продукта, интерфейс которого представлен на рис. 3. Работа с программным продуктом не требует специальной подготовки оператора и позволяет снизить длительность и трудоемкость решения задачи обоснования параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей образца вооружения. Практическая значимость разработанного алгоритма подтверждается результатами апробации методики для обоснования оптимального состава и мест размещения ЗИП образца вооружения.

Список используемых источников

1. Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Тришункин В.В. Методика обоснования системы поставки запасных частей комплексов вооружения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 297–308.
2. ГОСТ 27.507-2015. Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов. – М.: Стандартинформ, 2016. – 50 с.
3. ГОСТ РВ 27.3.03-2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. – М.: Стандартинформ, 2005. – 38 с.
4. ГОСТ РВ 0015–705-2008. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Запасные части, инструменты и принадлежности. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 42 с.
5. Патент на полезную модель RU 155521 U1, 10.10.2015. Устройство для оценки технического уровня средств контроля и диагностирования сложных технических систем / Дубовский В.А., Вырвич А.А., Гасюк Д.П., Николаев С.Г., Савекин Ф.Н., Гасюк Ю.Д., Ларькин В.В., Ерюшев А.С., Залозный Д.А. – Заявка № 2015120966/08 от 02.06.2015.
6. Ushakov I.A. Optimal resource allocation: with practical statistical applications and theory. – Published: Hoboken, N.J.:Wiley, 2013. – 265 p.
7. J.D. Kettele, Jr. Least-coast allocation of reliability investment // Operations Research. – 1962. – Vol. 10.
8. Алгоритмы оперативного обоснования оптимальных планов доставки комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей / Д.В. Решетников, А.Н. Дьяков, Е.А. Жеребцов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 658. – С. 130–138.
9. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965. – 458 с.
10. Сеньченков В.И., Абсалямов Д.Р. Формальное описание отказов и выбор минимального множества контролируемых признаков в технических системах // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – №3.

М.Ю. Зоткин,
кандидат техн. наук;
В.И. Миронов,
доктор техн. наук, профессор;
А.О. Шушаков,
кандидат техн. наук

АЛГОРИТМ ТЕРМИНАЛЬНОЙ МНОГОШАГОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СЕРВИСНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ УГЛОВОМ СОПРОВОЖДЕНИИ ОРБИТАЛЬНОГО ОБЪЕКТА С ОДНИМ УЧАСТКОМ ВКЛЮЧЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлен алгоритм дискретной терминальной стабилизации программных движений динамически несимметричного сервисного космического аппарата на участках слежения за орбитальным объектом с одним участком включения управляющего реактивного двигателя (УРД), когда управление угловым движением происходит по трем каналам одновременно. Проведено численное моделирование, которое показало, что угловые отклонения от программных значений достигают максимальных значений в области максимальных относительных угловых скоростей линии визирования.

Ключевые слова: сервисный космический аппарат, орбитальный объект, стабилизация, параметры Родрига – Гамильтона, многошаговый метод.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития космических систем является создание сервисных космических аппаратов (СКА). Основными задачами таких СКА являются:

- диагностика технического состояния путем визуального контроля;
- решение задач некооперируемого сближения с орбитальным объектом (ОО) [5];
- сбор космического мусора и др.

При выполнении данных задач СКА должен выполнять:

- программные развороты на ОО;
- угловое сопровождение ОО;
- коррекцию параметров движения центра масс относительно ОО;
- сближение и стыковку с некооперируемым ОО и др.

При выполнении операций наблюдения ОО, например для диагностики технического состояния, аппаратура наблюдения жестко устанавливается на корпусе СКА, поэтому необходимо в зонах видимости ОО осуществлять его непрерывное угловое сопровождение. Для этого требуется, во-первых, сформировать соответствующую программу управления угловым движением СКА и, во-вторых, обеспечить стабилизацию СКА на всём участке наблюдения орбитального объекта.

Алгоритмы формирования программы изменения параметров углового движения должны рационально использовать как априорную информацию о движении, так и текущие оценки параметров абсолютного и относительного движения СКА и ОО, получаемые по данным бортовых навигационных измерений. Такая программа должна рассчитываться непосредственно в полете в зависимости от конкретных динамических условий наблюдения конкретного ОО. В этой ситуации для решения рассматриваемой задачи стабилизации углового сопровождения цели более предпочтительным является метод, основанный на многошаговом принципе стабилизации, который разработан в трудах Д.Е. Охоцимского, Ю.Г. Сихарулидзе, Ю.Ф. Голубева [4].

Применительно к задаче стабилизации СКА при угловом сопровождении ОО многошаговый метод предусматривает разбиение временного интервала движения СКА на временные интервалы длительности ΔT – «шаги» управления. На каждом шаге стабилизации должна решаться пространственная краевая задача по определению параметров управления по трем каналам одновременно на основе данных о текущих параметрах ориентации, формируемых навигационной системой СКА, и наличия программы углового сопровождения.

Синтез управления при стабилизации пространственного движения относительно центра масс СКА является весьма сложной задачей. Эта сложность обусловлена наличием перекрестных связей, когда управление движением относительно одной оси связанной системы координат СКА может влиять на движение относительно другой. Такая возможность появляется в рамках многошагового метода стабилизации, так как на ограниченных интервалах стабилизации ΔT допустимо вводить обоснованные упрощения.

В публикации представлен алгоритм терминальной стабилизации программных движений динамически несимметричного СКА на участках слежения за ОО с использованием кватернионной модели динамики в параметрах Родрига – Гамильтона по трем углам одновременно.

ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ СЕРВИСНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Исходной информацией для решения задачи являются навигационные данные о текущих параметрах углового движения СКА. Предполагается также наличие программы углового сопровождения ОО с учетом данных о прогнозируемом фазовом состоянии ОО на траектории его свободного движения. Задача управления угловым сопровождением ОО заключается в стабилизации пространственного движения СКА. Трудность решения такой задачи обусловлена высокими требованиями к точности процесса управления, сложностью динамических и кинематических пространственных уравнений углового движения, динамической несимметричностью СКА, приводящей к возникновению перекрестных связей. Проблема многошаговой стабилизации заключается в том, что на каждом участке последовательно решается терминальная задача управления, обеспечивающая перевод СКА из текущего фазового углового положения p_0, ω_0 в требуемое конечное состояние p_1, ω_1 , соответствующее текущему интервалу ΔT . Здесь сложность определяется прежде всего сложностью кинематических и динамических дифференциальных уравнений углового движения. Для динамически несимметричного СКА они имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{p}_0 = \frac{1}{2} (-\omega_x p_1 - \omega_y p_2 - \omega_z p_3); \\ \dot{p}_1 = \frac{1}{2} (\omega_x p_0 - \omega_y p_2 - \omega_z p_3); \\ \dot{p}_2 = \frac{1}{2} (\omega_y p_0 - \omega_z p_1 + \omega_x p_3); \\ \dot{p}_3 = \frac{1}{2} (\omega_z p_0 + \omega_y p_1 - \omega_x p_2), \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_x = \frac{I_y - I_z}{I_x} \omega_y \omega_z + U_x(t); \\ \dot{\omega}_y = \frac{I_z - I_x}{I_y} \omega_x \omega_z + U_y(t); \\ \dot{\omega}_z = \frac{I_x - I_y}{I_z} \omega_x \omega_y + U_z(t), \end{array} \right.$$

где U_i – управляющие угловые ускорения, создаваемые УРД по каждому каналу управления;

p_i – параметры Родрига – Гамильтона;

ω_i – вектор угловой скорости СКА.

Принципиально задачу управления для такой системы уравнений углового движения можно решить с помощью традиционных методов решения краевых задач [1, 2]. Однако их

применение в контуре стабилизации программы требует проведения многократных расчетов на каждом интервале многошагового метода, что сопряжено со значительными вычислительными затратами при реализации этих алгоритмов на БЦВМ. Поэтому при разработке экономичных в вычислительном отношении алгоритмов необходимо ввести некоторые обоснованные допущения, упрощающие динамическую модель углового движения.

Для синтеза приближенного алгоритма заметим, что полная система параметров Родрига – Гамильтона представляет избыточную систему, так как эти параметры связаны условием

$$p_0^2 + p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 = 1.$$

Поэтому при синтезе алгоритма стабилизации можно воспользоваться системой, состоящей только из трех уравнений.

Обозначим через \bar{a} векторную часть кватерниона \bar{p} , так что $\bar{a}(t) = (p_1(t), p_2(t), p_3(t))^T$.

Тогда систему кинематических и динамических уравнений можно будет представить следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\bar{a}} = F(\bar{a}) \bar{\omega}; \\ \dot{\bar{\omega}} = \bar{f}_\omega(\bar{\omega}) + \bar{U}(t), \end{cases}$$

где $F(\bar{a}) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} p_0 & -p_2 & -p_3 \\ p_3 & p_0 & -p_1 \\ -p_2 & p_1 & p_0 \end{pmatrix};$

\bar{U} – вектор управляющих угловых ускорений, $\bar{U} = (U_x, U_y, U_z)^T$;

\bar{f}_ω – вектор ускорений, обусловленный гироскопическими моментами,

$$\bar{f}_\omega = (f_{\omega x}, f_{\omega y}, f_{\omega z})^T.$$

Причем

$$f_{\omega x} = \frac{I_y - I_z}{I_x} \omega_y \omega_z;$$

$$f_{\omega y} = \frac{I_z - I_x}{I_y} \omega_x \omega_z;$$

$$f_{\omega z} = \frac{I_x - I_y}{I_z} \omega_x \omega_y.$$

С учетом ограниченности временных интервалов стабилизации в многошаговом методе можно упростить уравнения углового движения путем усреднения параметров Родрига – Гамильтона и вектора гироскопических ускорений. Тогда уравнения движения будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\bar{a}} = F(\bar{a}_{cp}) \bar{\omega}; \\ \dot{\bar{\omega}} = \bar{U}(t). \end{cases}$$

При этом

$$F(\bar{a}_{cp}) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} p_{0cp} & -p_{2cp} & -p_{3cp} \\ p_{3cp} & p_{0cp} & -p_{1cp} \\ -p_{2cp} & p_{1cp} & p_{0cp} \end{pmatrix};$$

$$p_{0cp} = \frac{1}{2}(p_0(t_0) + p_0(\Delta T)); \quad p_{2cp} = \frac{1}{2}(p_2(t_0) + p_2(\Delta T));$$

$$p_{1cp} = \frac{1}{2}(p_1(t_0) + p_1(\Delta T)); \quad p_{3cp} = \frac{1}{2}(p_3(t_0) + p_3(\Delta T)).$$

Здесь $p_i(t_0)$ и $p_i(\Delta T)$ – значения параметров Родрига – Гамильтона в начале и в конце текущего интервала стабилизации ($i = 0, 1, 2, 3$).

Введем новые обобщенные кинематические параметры $\bar{y} = (y_1, y_2, y_3)^T$ в соответствии с формулой

$$\bar{y}(t) = B \bar{a}(t).$$

В последнем выражении

$$B = F^{-1}(\bar{a}_{cp}) = 2 \begin{pmatrix} p_{0cp} & -p_{2cp} & -p_{3cp} \\ p_{3cp} & p_{0cp} & -p_{1cp} \\ -p_{2cp} & p_{1cp} & p_{0cp} \end{pmatrix}^{-1};$$

символом \bar{a} обозначен вектор параметров Родрига – Гамильтона векторной части кватерниона, $\bar{a} = (p_1, p_2, p_3)^T$.

После перехода к переменным $\bar{y}(t)$ исходные уравнения углового движения преобразуются к следующему скалярному виду:

$$\begin{cases} \dot{y}_i = \omega_i; \\ \dot{\omega}_i = U_i(t), \end{cases} \quad i = x, y, z. \quad (1)$$

где $U_i(t) = \frac{M_i(t)}{I_i}$.

Таким образом, введение новых обобщенных кинематических параметров обеспечивает возможность декомпозировать процесс расчета параметров стабилизации по каждому каналу и получить в дальнейшем достаточно простые аналитические решения.

При реализации алгоритмов управления на БЦВМ обычно используют системы нормированных величин, что позволяет снизить требования к ее разрядной сетке.

Введем далее следующую систему нормированных переменных:

– нормированное время ($\tau \in [0, 1]$):

$$\tau = t / \Delta T;$$

– нормированная управляющая функция ($|\tilde{U}_i| \leq 1$):

$$\tilde{U}_i(t) = \frac{U_i}{U_{i\max}};$$

– нормированные угловые переменные:

$$\tilde{y}_i(t) = y_i(t) \frac{I_i}{M_i \Delta T^2};$$

– нормированные значения элементов угловой скорости:

$$\tilde{\omega}_i(t) = \frac{I_i \omega_i(t)}{M_i \Delta T}.$$

При переходе к нормированным переменным уравнения (1) преобразуются к следующему виду:

$$\begin{cases} \tilde{y}'_i = \tilde{\omega}_i; \\ \tilde{\omega}'_i = \tilde{U}_i(\tau), \end{cases} \quad i = x, y, z,$$

где нормированные управляющие функции $\tilde{U}_i(t)$ должны удовлетворять следующим ограничениям: $|\tilde{U}_i(\tau)| \leq 1$.

АЛГОРИТМ ТЕРМИНАЛЬНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ УГЛОВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО ОБЪЕКТА

Исходными данными при решении задачи терминальной стабилизации программы углового сопровождения ОО на каждом интервале многошагового метода являются начальные и конечные значения параметров Родрига – Гамильтона p_0, p_1, p_2, p_3 и элементов вектора угловой скорости $\bar{\omega}$, длительность временных интервалов, в течение которых решается задача стабилизации ΔT , главные моменты инерции СКА, максимальные значения управляющих моментов \bar{M}_y , создаваемых УРД.

Для решения задачи будем использовать полученные ранее приближенные уравнения углового движения СКА в обобщенных нормированных параметрах Родрига – Гамильтона.

Предварительно необходимо определить граничные условия задачи управления в новых переменных. Для этого сначала следует найти матрицу B :

$$B = F^{-1}(\bar{a}_{\text{ср}}).$$

Тогда краевые условия по обобщенным переменным $y_i(t_0)$ и $y_i(\Delta T)$ можно будет рассчитать по формулам:

$$y_i(t_0) = B_{ij} \cdot p_1(t_0) + B_{ij} \cdot p_2(t_0) + B_{ij} \cdot p_3(t_0); \quad y_i(\Delta T) = B_{ij} \cdot p_1(t_0) + B_{ij} \cdot p_2(t_0) + B_{ij} \cdot p_3(t_0),$$

где B_{ij} – элементы матрицы B , $i, j = 1, 2, 3$.

Краевые условия по нормированным переменным $\tilde{y}_i, \tilde{\omega}_i$ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_i(t_0) &= y_i(t_0) \frac{I_i}{M_{yi} \Delta T^2}; & \tilde{y}_i(\Delta T) &= y_i(\Delta T) \frac{I_i}{M_{yi} \Delta T^2}; \\ \tilde{\omega}_i(t_0) &= \frac{I_i}{M_{yi}} \frac{\omega_i(t_0)}{\Delta T}; & \tilde{\omega}_i(\Delta T) &= \frac{I_i}{M_{yi}} \frac{\omega_i(\Delta T)}{\Delta T}, \end{aligned}$$

где I_i – центральные моменты инерции по соответствующим осям;

M_{yi} – максимальный управляющий момент по соответствующим осям.

Входящие в указанные выше выражения величины $y_i(t_0), \omega_i(t_0)$ являются текущими параметрами углового движения СКА, вырабатываемыми контуром определения параметров ориентации его автономной навигационной системой по результатам обработки угловых измерений, а терминальные значения угловых параметров $y_i(\Delta T), \omega_i(\Delta T)$ принимаются в соответствии с программой углового сопровождения ОО. Оптимальный по расходу рабочего тела поворот СКА на каждом шаге стабилизации обеспечивается при включении УРД в начале временного интервала стабилизации ($\tau = 0$) управляющего момента на максимальную величину ($\tilde{u}_i(\tau) = \pm 1$) и выключении его в момент времени $\tau = 1$.

Определим длительность включения τ_{i1} . Интегрируя уравнения движения с учетом принятых краевых условий, найдем

$$\tilde{y}_i(1) = \tilde{y}_i^{\text{н}}(1) + \int_0^1 d\tau \int_0^\tau u_i(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $\tilde{y}_i^{II}(1) = \tilde{y}_{0i} + \tilde{\omega}_{0i}$;

$\tilde{y}_i^{II}(1)$ – характеризует промах по угловым параметрам в свободном неуправляемом движении в конце интервала стабилизации.

Продолжительность включения управляющих моментов по всем каналам управления должна удовлетворять ограничению

$$0 \leq \tau \leq 1.$$

Из соотношения (2) с учетом ступенчатого характера получим

$$\tilde{y}_i^{II}(1) - \tilde{y}_i(1) + \tau_{1i} \left(1 - \frac{\tau_{1i}}{2}\right) \text{sign } u_i = 0.$$

Знак управляющего момента $u_i(\tau)$ следует выбирать противоположным разности $\tilde{y}_i^{II}(1) - \tilde{y}_i(1)$, т.е.

$$\text{sign } u_i = -\text{sign}(\tilde{y}_{0i} + \tilde{\omega}_{0i} - \tilde{y}_i(1)).$$

Разрешая последнее уравнение относительно τ_{1i} , получим

$$\tau_{1i} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot |\Delta \tilde{y}_i^{II}(1)|}, \quad (3)$$

где $|\Delta \tilde{y}_i^{II}(1)| = |\tilde{y}_{0i} + \tilde{\omega}_{0i} - \tilde{y}_i(1)|$ представляет собой модуль прогнозируемого рассогласования в конце временного интервала стабилизации по угловым параметрам при отсутствии управляющего момента.

Из анализа (3) следует, что решение задачи стабилизации по каждому каналу существует, если $|\Delta \tilde{y}_i^{II}(1)| \leq 1/2$, т.е. при условии, что управляющий момент, действует в течение всего временного интервала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Приводятся результаты численных исследований процесса стабилизации программы управления СКА в режиме углового сопровождения ОО при формировании управляющих функций по представленному выше алгоритму, в котором не предусмотрен учет ограничений по конечной угловой скорости на каждом интервале стабилизации.

Исследования проводились путем математического моделирования управляемого движения СКА на последовательности интервалов стабилизации многошагового метода.

Основная цель численных исследований заключалась в следующем:

- в исследовании методической точности алгоритма стабилизации, обусловленной влиянием допущений, принятых при разработке алгоритма;
- в анализе влияния интервалов дискретизации многошагового метода стабилизации на характеристики точности углового сопровождения ОО.

В качестве исходных данных для решения задачи стабилизации были выбраны результаты расчета программы управления угловым движением СКА в режиме отслеживания ОО в углах Эйлера и параметрах Родрига – Гамильтона, полученные в работе [3].

Приведем в качестве примера некоторые результаты численных расчетов методической точности процесса стабилизации СКА при отсутствии ограничений на конечную угловую скорость при угловом сопровождении орбитального объекта. Длительность временных интервалов ΔT , на которых решалась задача стабилизации, равна 25 с.

На рис. 1 и 2 приведены рассогласования Δ_i между $\bar{p}_{i\text{расч}}$ и $\bar{p}_{i\text{ипр}}$ на каждом участке стабилизации. На рис. 3 и 4 представлены отклонения расчетных значений углов рыскания ψ и тангажа ϑ от их программных значений.

Действующие допущения оказывают влияние на точность терминальной стабилизации СКА при угловом сопровождении ОО. Угловые отклонения от программных значений достигают максимальных значений в области максимальных относительных угловых скоростей линии визирования, т.е. в окрестности минимальных значений относительной дальности в пролетном варианте. Для повышения точности угловой стабилизации в области повышенных отклонений необходимо уменьшать интервал дискретизации ΔT .

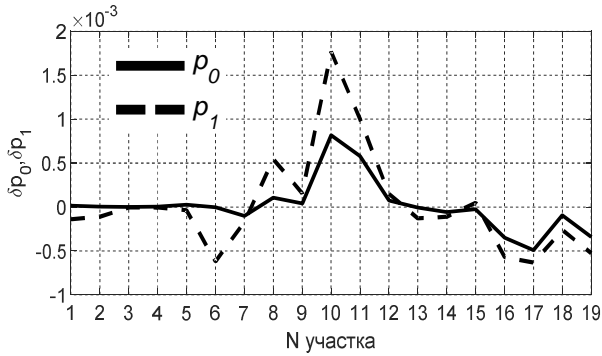


Рис. 1. Отклонение $\rho_{0\text{расч}}, \rho_{1\text{расч}}$ от $\rho_{0\text{пр}}, \rho_{1\text{пр}}$

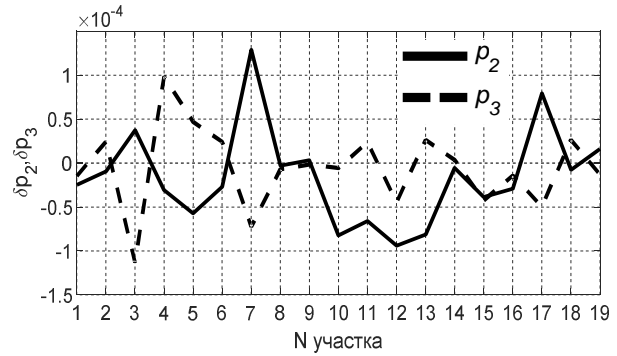


Рис. 2. Отклонение $\rho_{2\text{расч}}, \rho_{3\text{расч}}$ от $\rho_{2\text{пр}}, \rho_{3\text{пр}}$

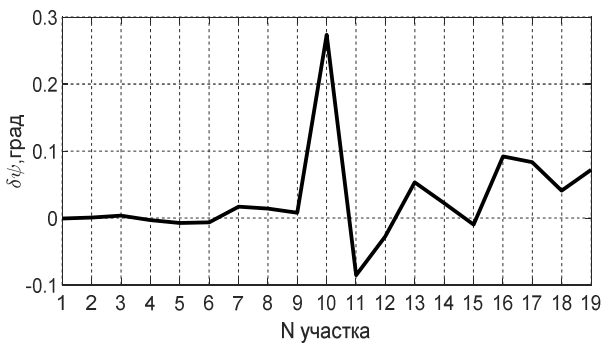


Рис. 3. Отклонение $\psi_{\text{расч}}$ от $\psi_{\text{пр}}$

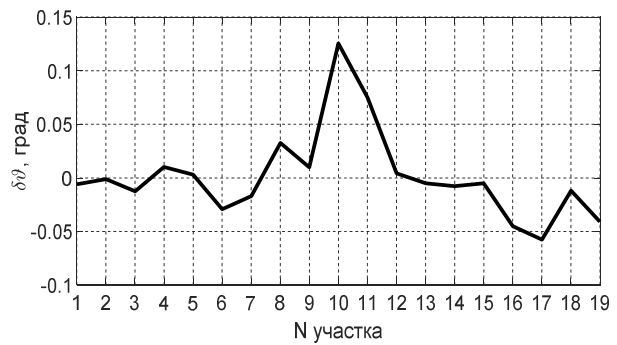


Рис. 4. Отклонение $\vartheta_{\text{расч}}$ от $\vartheta_{\text{пр}}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм позволяет решать задачу стабилизации СКА аналитически (по конечным расчетным соотношениям), когда управление угловым движением происходит по трем каналам одновременно в режиме углового сопровождения ОО с использованием параметров Родрига – Гамильтона. При синтезе алгоритмов с учетом ограниченности интервалов стабилизации была использована приближенная модель углового движения СКА. Это позволило ввести новые обобщенные кинематические параметры, что обеспечило возможность декомпозировать процесс расчета параметров управления по каждому из каналов и получить достаточно простые аналитические решения, удобные для практического применения.

В целом предложенный алгоритм позволяет реализовать процесс стабилизации по свободным траекториям углового движения.

Список используемых источников

1. *Калиткин Н.Н., Альшина Е.А.* Численные методы. – М.: Академия, 2013. – 304 с.
2. *Мионов В.И., Мионов Ю.В., Юсупов Р.М.* Синтез итерационных алгоритмов решения краевых задач и нелинейных уравнений // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 1. – С. 9–15.
3. *Мионов В.И., Мионов Ю.В., Зоткин М.Ю.* Расчет программы управления угловым движением космического аппарата в режиме сопровождения орбитального объекта по параметрам Родрига – Гамильтона // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 170–174.
4. *Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г.* Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. – М.: Наука, 1975. – 400 с.
5. *Фоминов И.В., Сасункевич А.А., Калабин П.В.* Анализ влияния ошибок формирования начальных относительных параметров движения сервисного космического робота на траекторию пассивного периодического облета некооперируемого космического аппарата // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 208–217.

В.И. Крыжановский,
кандидат техн. наук, доцент;
И.А. Трофимов,
кандидат техн. наук

УЧЕТ ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЕЙ В ДВУХКОНТУРНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ НАВЕДЕНИЯ НА ЦЕЛЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

Разработана двухконтурная следящая система для разворота поворотной платформы, на которой расположен оптико-электронный прибор (ОЭП). Наведение оптической оси ОЭП на цель производится путем одновременного разворота платформы по азимуту и разворота ОЭП относительно платформы по высоте. Исследовано влияние перекрестных связей между контурами на качество переходных процессов. Предложено решение в непрерывном и дискретном вариантах для устранения влияния перекрестных связей с целью повышения качества переходных процессов при одновременных разворотах платформы и ОЭП.

Ключевые слова: математическая модель движения, наведение на цель, перекрестная связь, двухконтурная следящая система, качество переходного процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим двухконтурную следящую систему для управления угловым движением платформы с установленным на нее оптико-электронным прибором. Каждый из элементов системы имеет одну степень свободы, при этом платформа вместе с ОЭП совершает угловое движение относительно неподвижной оси вращения, а ОЭП – относительно оси, которая вращается вместе с платформой. В работе [1] была получена математическая модель движения платформы с ОЭП как объекта управления и разработана двухконтурная следящая система для наведения ОЭП на цель. Проведенное моделирование показало, что быстроедействие процесса наведения при одновременном развороте по азимуту и высоте выше, чем при последовательных разворотах. Вместе с тем при одновременном развороте возникают перекрестные связи, которые влияют на качество переходных процессов, в том числе на запас устойчивости и быстроедействие. Поэтому разработка алгоритма управления, устраняющего влияние перекрестных связей на процесс разворота, является актуальной и практически важной задачей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ

Положение платформы связано с подвижной системой координат $Oxyz$ (рис. 1), которая вращается относительно оси OZ неподвижной системы координат $OXYZ$ с угловой скоростью $\dot{\psi}$, а положение одноименных абсцисс и ординат определяется углом азимута ψ .

Положение ОЭП определяет связанная с ним подвижная система координат $Ox_1y_1z_1$. Ось Oy_1 направлена по оптической оси ОЭП и вращается относительно подвижных осей абсцисс, связанных с платформой и ОЭП, с угловой скоростью $\dot{\theta}$. Текущее положение оптической оси над горизонтом определяется углом высоты θ .

Разработанная в [1] двухконтурная следящая система для наведения оптической оси ОЭП на цель изображена на рис. 2.

Как видно из структурной схемы (рис. 2), при одновременном развороте по азимуту и высоте возникают перекрестные связи. Влияние контура разворота по азимуту (в дальнейшем первый канал) на контур разворота по высоте (в дальнейшем второй канал) обусловлено мо-

ментом, возникающим вследствие центробежной силы, стремящейся свести угол высоты к нулю. Влияние второго канала на первый канал обусловлено в общем случае изменением момента инерции всего поворотного механизма относительно оси z при изменении угла высоты. Взаимовлияние каналов ощутимо проявляется в случае, когда моменты инерции платформы и ОЭП являются соизмеримыми по величине. Если момент инерции платформы гораздо больше момента инерции ОЭП, влиянием движения второго канала на движение первого можно пренебречь, однако и в этом случае влияние первого канала на второй следует учитывать, если следящая система первого канала может обеспечить быстрые развороты платформы.

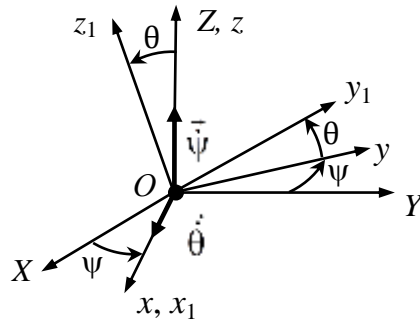


Рис. 1. Кинематические параметры положения следящей системы

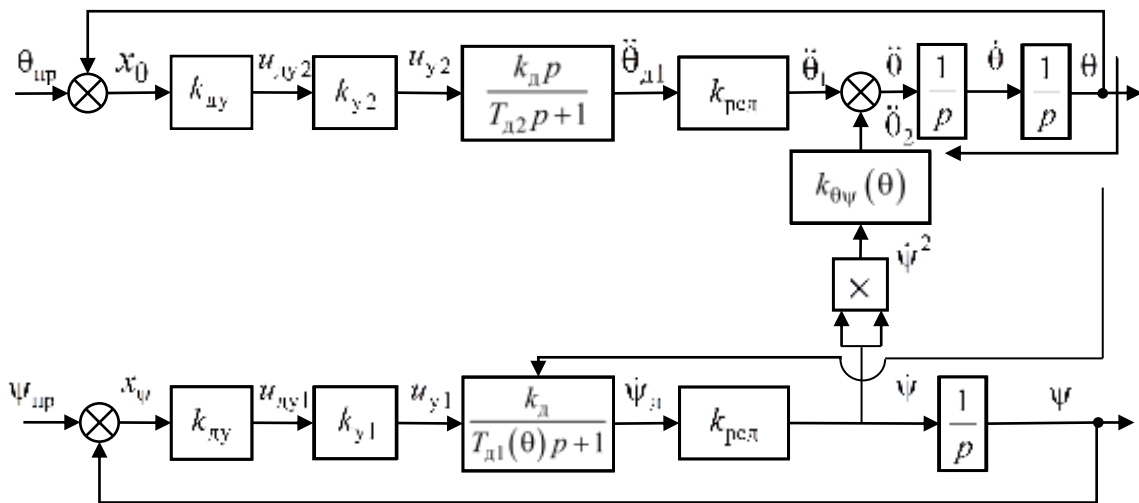


Рис. 2. Структурная схема двухкантурной следящей системы

На рис. 2 приведены следующие обозначения: $\psi_{пр}$, $\theta_{пр}$ – программные значения угла разворота платформы и ОЭП; ψ , θ – фактические значения угла разворота платформы и ОЭП; x_ψ , x_θ – углы рассогласования; $k_{д\psi}$ – коэффициент передачи датчика угла; k_{y1} , k_{y2} – коэффициенты передачи усилителей первого и второго канала соответственно; k_d – коэффициент передачи двигателя; $T_{д1}$, $T_{д2}$ – постоянные времени двигателей; $k_{ред}$ – коэффициент передачи редуктора.

Коэффициент $k_{\theta\psi}(\theta)$ учитывает влияние скорости углового движения платформы на величину центробежного момента, а следовательно, и на величину эквивалентного углового ускорения $\ddot{\theta}_2$ в зависимости от угла разворота ОЭП и определяется выражением

$$k_{\theta\psi}(\theta) = \sin \theta \cos \theta. \quad (1)$$

Характер изменения этого коэффициента приведен на рис. 3.

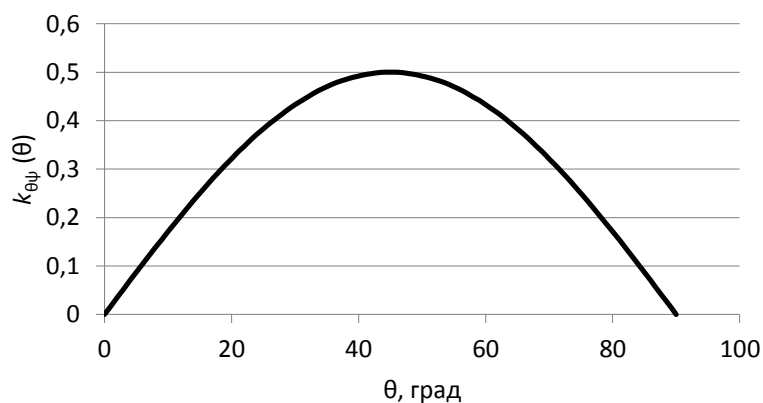


Рис. 3. Коэффициент влияния первого канала на второй канал

Максимальное влияние первого канала на второй возникает при разворотах платформы на большие углы и на небольших разворотах ОЭП в окрестностях 45° . При этом возмущающее угловое ускорение $\ddot{\theta}_2$ и управляющее угловое ускорение $\ddot{\theta}_1$ становятся соизмеримыми. На рис. 4 показаны переходные процессы разворота ОЭП при изменении угла высоты с 55° до 50° и развороте платформы на 100° , сплошной линией обозначен процесс при автономном развороте ОЭП, пунктирной – при одновременном развороте ОЭП и платформы. Как видно, перекрестная связь оказывает существенное влияние на запас устойчивости и быстродействие.

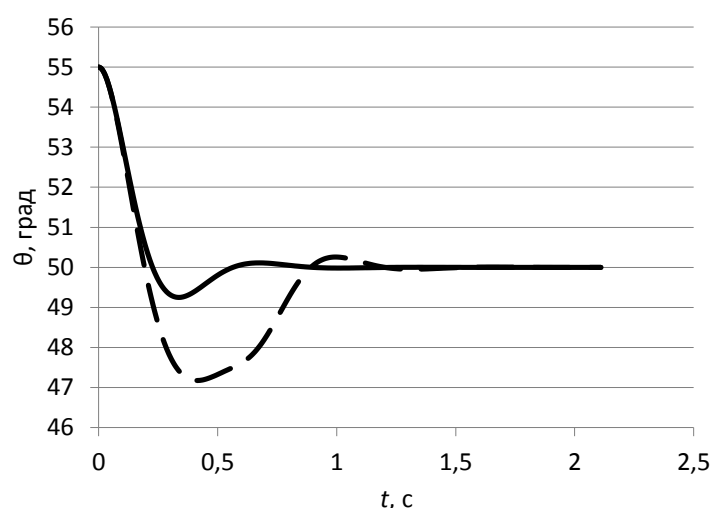


Рис. 4. Переходные процессы при развороте ОЭП

Соответствующая структурной схеме (см. рис. 2) математическая модель, описывающая динамику движения двухконтурной системы, может быть записана в виде системы уравнений [1]:

$$\begin{aligned}
 x_\psi &= \psi_{пр} - \psi, \quad u_{\text{д}y1} = k_{\text{д}y} x_\psi, \quad u_{y1} = k_{y1} u_{\text{д}y1}, \quad I_B = m_B \left[\frac{R_B^2}{2} + \left(\frac{L_B^2}{3} - \frac{R_B^2}{4} \right) \cos^2 \theta \right], \\
 I_{\text{сум}} &= I_{\text{пл}} + I_B, \quad I_{\text{прив}} = I_{\text{д}} + I_{\text{ред}} + \frac{I_{\text{сум}} k_{\text{ред}}^2}{\eta_{\text{ред}}}, \quad T_{\text{д}1} = \frac{1,2 \cdot I_{\text{прив}} \cdot R_{\text{д}}}{c_m c_e}, \\
 \dot{\psi}_{\text{д}} &= \dot{\psi}_{\text{д}}(0) e^{-\frac{t}{T_{\text{д}1}}} + k_{\text{д}} u_{y1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{д}1}}} \right), \quad \dot{\psi} = \dot{\psi}_{\text{д}} k_{\text{ред}}, \quad \psi = \psi(0) + \dot{\psi} t, \quad x_\theta = \theta_{\text{пр}} - \theta, \\
 u_{\text{д}y2} &= k_{\text{д}y} x_\theta, \quad u_{y2} = k_{y2} u_{\text{д}y2}, \quad \ddot{\theta}_{\text{д}} = \ddot{\theta}_{\text{д}}(0) e^{-\frac{t}{T_{\text{д}2}}} + \frac{k_{\text{д}}}{T_{\text{д}2}} (u_{y2} - u_{y2}(0)) e^{-\frac{t}{T_{\text{д}2}}}, \quad \ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_{\text{д}1} k_{\text{ред}}, \\
 \ddot{\theta}_2 &= \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta, \quad \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2, \quad \dot{\theta} = \dot{\theta}(0) + \ddot{\theta} t, \quad \theta = \theta(0) + \dot{\theta} t.
 \end{aligned} \tag{2}$$

В системе уравнений (2) приведены следующие обозначения: $u_{\text{д}y1}, u_{\text{д}y2}$ – напряжения на выходе датчиков угла первого и второго канала соответственно; u_{y1}, u_{y2} – напряжения на выходе усилителей первого и второго канала соответственно; $I_B, I_{\text{пл}}$ – моменты инерции ОЭП и платформы соответственно; m_B – масса ОЭП; R_B – радиус ОЭП; L_B – длина ОЭП; $I_{\text{сум}}$ – суммарный момент инерции; $I_{\text{прив}}$ – приведенный момент инерции подвижной системы; $I_{\text{д}}$ – момент инерции двигателя; $I_{\text{ред}}$ – момент инерции редуктора; $\eta_{\text{ред}}$ – КПД редуктора; $R_{\text{д}}$ – сопротивление обмотки якоря двигателя; c_m, c_e – коэффициенты пропорциональности, рассчитываемые по паспортным данным двигателя.

Аналитическое решение вышеприведенной системы получить не удалось, поэтому моделирование проводилось численными методами.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ

При моделировании предполагалось, что платформа и ОЭП представляют собой однородные цилиндры с моментами инерции $I_{\text{пл}} = 12,5 \text{ кгм}^2$, $I_{\text{ОЭП}} = 10,7 \text{ кгм}^2$. Следящие системы для платформы и ОЭП рассчитывались как автономные, без учета влияния перекрестных связей в соответствии с методикой, изложенной в литературе [2, 3] по проектированию следящих систем, а также по формулам [1] для обеспечения заданного перерегулирования. Моделирование проводилось для всех возможных комбинаций с дискретностью 5° при развороте платформы от 0 до 180° и всех начальных и конечных значениях разворота ОЭП в диапазоне от 0 до 90° . Для всех комбинаций определялось перерегулирование как мера запаса устойчивости и длительность переходного процесса.

При классическом [2] методе определения длительности переходного процесса для линейных систем ее величина не зависит от величины задающего воздействия. В данной работе переходный процесс считался законченным, если он заходил в коридор, ограниченный величиной максимально допустимой ошибки и больше из него не выходил. Кроме того, предполагалось, что входное напряжение двигателя не должно превышать его номинального значения. При этих условиях длительность переходного процесса не является постоянной величиной. Полученная зависимость длительности переходного процесса от величины угла автономного разворота ОЭП показана на рис. 5. Монотонное увеличение длительности переходного процесса объясняется ограничением скорости вращения двигателя вследствие ограничения на входное напряжение, а разрывы первого рода возникают вследствие вхождения в коридор на следующей полувольте колебательного процесса при увеличении угла разворота.

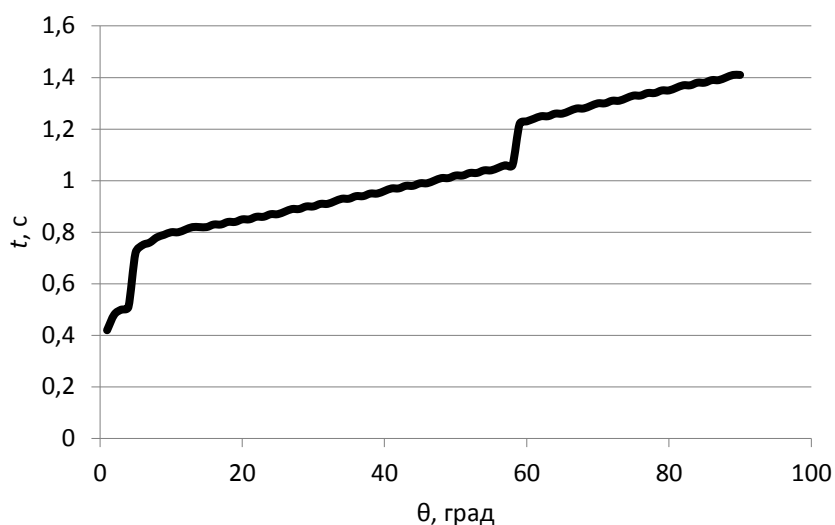


Рис. 5. Зависимость длительности переходного процесса от угла разворота

Моделирование при различных начальных условиях и требуемых углах разворота показало, что взаимовлияние контуров может существенно влиять на длительность переходного процесса и запас устойчивости, при этом показатели качества как ухудшались, так и улучшались по сравнению с показателями при автономных разворотах.

Расчеты показали, что для канала разворота платформы длительность переходного процесса составляла от 61 до 118% от длительности переходного процесса при автономном развороте, а перерегулирование – от 59 до 105% от перерегулирования при автономном развороте. Уменьшение длительности переходного процесса наблюдалось в 82% случаев, а перерегулирования – в 90% случаев. Положительный эффект взаимовлияния объясняется тем, что расчет параметров канала разворота платформы производился в предположении, что угол разворота ОЭП по высоте равняется нулю. В этом случае суммарный момент инерции платформы с ОЭП максимальный, при увеличении угла поворота ОЭП он становился меньше, что приводило к уменьшению эквивалентной постоянной времени двигателя с редуктором и платформой $T_{д1}$, вследствие чего и улучшались динамические свойства. Средняя длительность переходного процесса, посчитанная для всех комбинаций, составила 1,81 с при автономных разворотах и 1,57 с при одновременных разворотах. Уменьшение составило примерно 13%.

Для канала разворота ОЭП длительность переходного процесса составляла от 38 до 219% от длительности переходного процесса при автономном развороте, а перерегулирование – от 0 до 378% от перерегулирования при автономном развороте. Увеличение длительности переходного процесса наблюдалось в 82% случаев, а перерегулирования – в 53% случаев. Отрицательный эффект взаимовлияния объясняется тем, что при увеличении угла высоты ОЭП центробежный момент, обусловленный вращением платформы, препятствует управляющему моменту двигателя, а при уменьшении угла высоты ОЭП суммируется с управляющим моментом двигателя, что способствует увеличению перерегулирования, поэтому и в первом и во втором случаях длительность переходного процесса возрастает. При автономных разворотах средняя длительность переходного процесса для канала разворота ОЭП составляла 0,95 с, а при одновременных – 1,05 с, т.е. увеличение составило примерно 11%.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что для повышения качества переходных процессов необходимо внести изменения в структуру системы для компенсации влияния разворота платформы на разворот ОЭП.

СИСТЕМА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПЕРЕКРЕСТНОЙ СВЯЗИ

Для устранения влияния разворота платформы на разворот ОЭП необходимо на вход двигателя второго канала подать напряжение u_k для создания дополнительного управляющего момента с целью компенсации возмущающего ускорения $\ddot{\theta}_2$. Измененный фрагмент структурной схемы системы, изображенной на рис. 2, представлен на рис. 6.

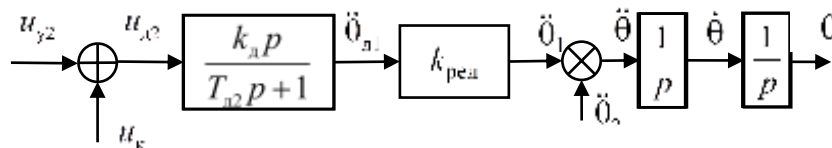


Рис. 6. Измененный фрагмент структурной схемы

Передаточная функция части указанного на рисунке фрагмента как отношение изображения по Лапласу скорости вращения двигателя к изображению по Лапласу напряжения на входе двигателя имеет следующий вид:

$$W_k(p) = \frac{k_d k_{ред}}{T_{d2} p + 1}.$$

Это типовое аperiодическое звено первого порядка, для которого известна реакция на ступенчатый входной сигнал при ненулевых начальных условиях:

$$\dot{\theta}_1(t) = \dot{\theta}(0) e^{-\frac{t}{T_{d2}}} + k_d k_{ред} u_{d2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{d2}}} \right). \quad (3)$$

Берем производную и определяем выражение для углового ускорения:

$$\ddot{\theta}_1(t) = \frac{1}{T_{d2}} e^{-\frac{t}{T_{d2}}} \left[k_d k_{ред} u_{y2} - \dot{\theta}(0) \right]. \quad (4)$$

Поскольку рассматриваемый фрагмент структурной схемы линейный, для него справедлив принцип суперпозиции. Исходя из предположения, что компенсирующее напряжение u_k должно формировать ускорение двигателя, равное возмущающему ускорению $\ddot{\theta}_2$, получаем соотношение

$$\ddot{\theta}_2(t) = \frac{1}{T_{d2}} e^{-\frac{t}{T_{d2}}} \left[k_d k_{ред} u_k - \dot{\theta}_2(0) \right]. \quad (5)$$

При полной компенсации возмущающего ускорения $\dot{\theta}_2(0) = 0$. С учетом этого соотношения и выражения для $\ddot{\theta}_2$ в системе уравнений (2) из формулы (5) находим выражение для формирования компенсирующего напряжения u_k :

$$u_k = \frac{T_d \dot{\Psi}^2 \sin \theta \cos \theta}{k_d k_{ред} e^{-\frac{t}{T_d}}}. \quad (6)$$

Моделирование показало, что при формировании напряжения u_k по формуле (6) и его суммировании с управляющим напряжением u_{y2} переходные процессы при одновременном развороте совпадают с процессами при автономном развороте [1], откуда следует, что разворот ОЭП по азимуту не влияет на разворот по высоте. Для приборной реализации информа-

ция о скорости вращения по азимуту может быть получена с помощью тахогенератора, а информация об угле высоты – с соответствующего датчика угла.

Вместе с тем формирование u_k труднореализуемо с помощью непрерывных устройств, поэтому целесообразно вычисления по формуле (6) производить с помощью ЦВМ или специализированного вычислительного устройства. Систему уравнений (2) необходимо дополнить (заменить) уравнениями:

$$u_k(i) = \frac{T_d \dot{\Psi}^2(i) \sin \theta(i) \cos \theta(i)}{k_d k_{ред} e^{-\frac{t}{T_d}}}, \quad (7)$$

$$u_{д2} = u_{y2} + u_k(i),$$

где T – период дискретности.

В формуле (7) предполагается, что $f(i) = f(iT), i = 0, 1, \dots$

ПРИМЕР РАСЧЕТА СИСТЕМЫ

Моменты инерции для платформы и ОЭП выбираем те же, что и для исходной системы. Поскольку моменты инерции соизмеримы, для первого и второго каналов выбираем одинаковые двигатели, датчики углов и редукторы со следующими параметрами:

- коэффициент передачи датчика угла $0,1 \text{ В/}^\circ$;
- коэффициент передачи двигателя $300^\circ/(\text{Вс})$;
- коэффициент передачи редуктора $0,01$.

Постоянные времени двигателей с редуктором и нагрузкой составляют $0,127 \text{ с}$ для первого канала и $0,089 \text{ с}$ для второго канала. Рассчитанные для обеспечения перерегулирования 15% при автономных разворотах коэффициенты усиления усилителей составляют $24,4$ для первого канала и $35,1$ для второго канала. Период дискретности для формирования компенсирующего напряжения на входе двигателя выбираем $0,01 \text{ с}$, что примерно на порядок меньше постоянных времени двигателей первого и второго каналов.

Моделирование разворота ОЭП при тех же комбинациях углов поворота, что и для исходной системы, показало, что запас устойчивости при управлении с компенсацией перекрестной связи и при автономных разворотах практически совпадает. Средняя длительность переходных процессов составила $0,96 \text{ с}$, увеличение по сравнению с автономными разворотами составило 1% .

На рис. 7 приведены переходные процессы при развороте по азимуту на 100° и по высоте от 50 до 40° .

На рис. 8 приведены переходные процессы при развороте по азимуту на 100° и по высоте от 40 до 50° .

На рис. 7 и 8 штриховой линией выделен процесс при одновременном развороте, сплошной – процессы при автономном развороте и развороте с компенсацией перекрестной связи, поскольку они практически не отличаются, максимальное отклонение не превышает $0,3\%$. Такое совпадение характерно при небольших углах разворота ОЭП, когда двигатель работает на линейном участке статической характеристики. При больших углах разворота ограничение на максимально допустимое входное напряжение двигателя не позволяет в полной мере использовать механизм коррекции, но и в этих случаях отклонение не превышает 3% .

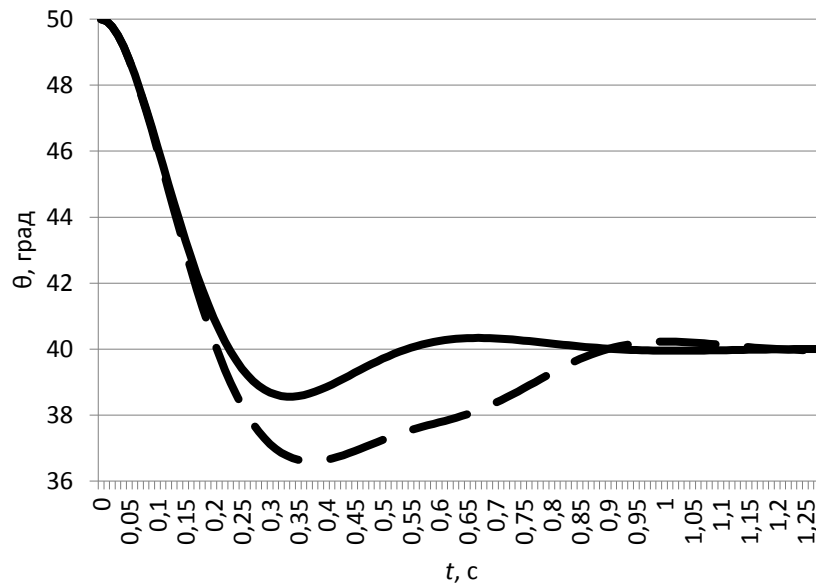


Рис. 7. Переходные процессы для ОЭП при уменьшении угла высоты

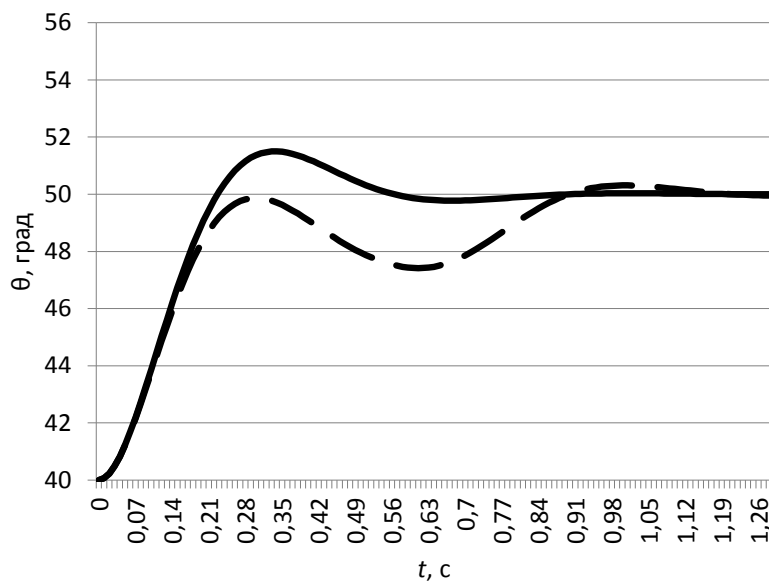


Рис. 8. Переходные процессы для ОЭП при увеличении угла высоты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перекрестные связи возникают из-за того, что разворот ОЭП по высоте меняет общий момент инерции подвижной системы, вследствие чего изменяются динамические характеристики поворота платформы, а при повороте платформы по азимуту возникает центробежный момент, влияющий на динамику разворота ОЭП. Если расчет следящей системы для поворота платформы производить с расчетом на наихудший случай, когда угол поворота ОЭП равен нулю и момент инерции подвижной системы максимален, во всех остальных случаях динамика поворота платформы улучшается, нет необходимости производить коррекцию влияния поворота ОЭП на поворот платформы. Разворот платформы с большой угловой скоростью

приводит к возникновению возмущающего центробежного момента, который может привести к существенному ухудшению динамики разворота ОЭП. Предложенный способ компенсации влияния этой перекрестной связи в непрерывном и дискретном вариантах обеспечивает совпадение процессов при автономном и одновременном разворотах с погрешностью не более 3%, что гарантирует выполнение заданных требований по быстродействию и запасу устойчивости.

Список используемых источников

1. *Крыжановский В.И., Щербаков В.И.* Математическая модель двухконтурной следящей системы для наведения на цель оптико-электронного прибора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 337–345.
2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – 4-е изд. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
3. *Бесекерский В.А.* Динамический синтез систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1970. – 576 с.

Г.Н. Мальцев,
доктор техн. наук, профессор;
Д.В. Склемин,
кандидат техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТКАЗОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрена марковская модель процесса идентификации отказов радиоэлектронной системы с учетом использования ИПИ-технологий. В основе модели лежит формализованное описание в пространстве состояний процедуры последовательного поиска неисправности в иерархической структуре радиоэлектронной системы, образованной ее делением на структурные элементы. Модель позволяет определять среднее время идентификации (распознавания) отказов в отсутствие и при использовании информационной поддержки эксплуатационных процессов на основе ИПИ-технологий. Представлены результаты расчетов коэффициента готовности радиоэлектронной системы при различных значениях среднего времени идентификации отказов. В рассмотренных условиях применение ИПИ-технологий при эксплуатации радиоэлектронных систем дает возможность на порядок уменьшить среднее время распознавания неидентифицированного отказа.

Ключевые слова: радиоэлектронные системы, ИПИ-технологии, интенсивность отказов, граф состояний, идентификация отказа, коэффициент готовности.

Эффективное применение современных сложных радиоэлектронных систем (РЭС) различного назначения обеспечивается научно-обоснованной системой их эксплуатации, которая должна учитывать эксплуатационные свойства и особенности применения современных РЭС, как объектов эксплуатации, по назначению. К числу таких особенностей относятся, с одной стороны, унификация РЭС и их высокая надежность, а с другой – высокие требования к поддержанию готовности РЭС к применению по назначению и предупредительный характер проводимых мероприятий их технической эксплуатации. В этих условиях одним из направлений совершенствования системы эксплуатации РЭС является реализация ее информационной поддержки на основе ИПИ-технологий – современных технологий информационной поддержки жизненного цикла сложных технических систем.

Современные РЭС характеризуются структурной и функциональной сложностью, и их следует рассматривать как структурно-сложные системы. При этом структурная сложность РЭС определяется большим числом элементов в составе системы и разнообразием связей между ними, а также наличием нескольких иерархических уровней подсистем, входящих в рассматриваемую систему. Это обеспечивает требуемые функциональные возможности РЭС и их высокую надежность, а также усложняет процессы поиска и устранения отказов в случае их возникновения.

В настоящей публикации рассмотрена марковская модель процесса идентификации отказов РЭС, позволяющая определять среднее время идентификации (распознавания) отказов и коэффициент готовности РЭС для различных параметров системы эксплуатации, в том числе с учетом использования информационной поддержки эксплуатационных процессов на основе ИПИ-технологий.

К особенностям структурно-сложных технических систем, в том числе РЭС, относятся [1]:

- наличие в составе системы конструктивно-независимых аппаратных комплексов (подсистем), выполняющих самостоятельные функции;
- наличие сложных связей между аппаратными комплексами, позволяющих осуществить структурное перестроение системы;

- многофункциональность системы и возможность ее использования в различных режимах применения по назначению;
- одновременность работы элементов системы;
- наличие естественной и функциональной избыточности системы;
- неоднозначность понятия отказа.

В общем случае любая сложная система может быть представлена как многоуровневая конструкция из взаимодействующих элементов, объединяемых в подсистемы различных уровней. В рамках системного анализа операция декомпозиции сложной технической системы на подсистемы описывается следующим образом [2, 3]. Сложная система разделяется на конечное число составных частей с учетом всех связей между ними, характеризующих их взаимодействие. С этого начинается интерпретация исследуемой технической системы как сложной системы, а ее частей как подсистем. В том случае, если подсистемы оказываются всё еще чрезмерно сложными, осуществляется деление каждой из них на конечное число более мелких подсистем (с сохранением всех связей). Процедуру деления можно продолжать до получения таких подсистем, которые в условиях решаемой задачи будут признаны простыми и удобными для исследования. Такие подсистемы рассматриваются как элементы сложной системы. При этом деление технической системы на элементы в общем случае может быть выполнено различными способами и является в определенной мере условным.

При рассмотрении уровней деления структурно-сложной технической системы на подсистемы можно говорить об ее иерархической структуре. Иерархическая структура РЭС, являющейся структурно-сложной технической системой, представлена на рис. 1. На самом верхнем, первом, уровне иерархии находится РЭС в целом. На втором уровне – аппаратные комплексы, выполняющие в составе РЭС различные функциональные задачи. Третий уровень включает в себя составные части аппаратных комплексов – блоки, которые участвуют в выполнении тех функциональных задач, которые решают аппаратные комплексы. На четвертом уровне иерархии расположены модули, из которых состоят блоки. Нижний, пятый, уровень содержит платы. Такое построение характерно для большинства наземных РЭС космических комплексов [4–6].

Задача поиска и устранения отказа структурно-сложной РЭС может решаться для элементов, находящихся на различных уровнях ее иерархической структуры. Выбор уровня, на котором осуществляется анализ РЭС как структурно-сложной системы, определяет и конкретную область применения термина «элемент системы». На выбранном уровне осуществляется анализ состояния элементов, входящих в состав системы, а также связей между этими элементами. Выбор уровня определяется прежде всего постановкой и содержанием решаемой задачи поиска и устранения отказа РЭС, при этом принципиальное значение имеет наличие информации о состоянии и эксплуатационных свойствах элементов системы, необходимой для решения поставленной задачи. При поиске и устранении неисправностей структурно-сложной РЭС уровень отказавшего элемента (так называемого типового элемента замещения), до которого осуществляется поиск, определяет глубину поиска.

Глубина поиска неисправностей РЭС в общем случае определяется выбранной системой технического диагностирования, наличием соответствующей технической документации и задачами, поставленными перед исполнителем. Процесс поиска неисправности РЭС может рассматриваться как переход из состояния неидентифицированного отказа в состояние идентифицированного отказа и связан с поэтапным поиском места отказа. В данном случае под состоянием неидентифицированного отказа понимается состояние, в котором неисправность, являющаяся причиной отказа, не обнаружена и/или не определен алгоритм ее устранения, а под состоянием идентифицированного отказа понимается состояние, в котором неисправность, являющаяся причиной отказа, обнаружена и определен алгоритм ее устранения.

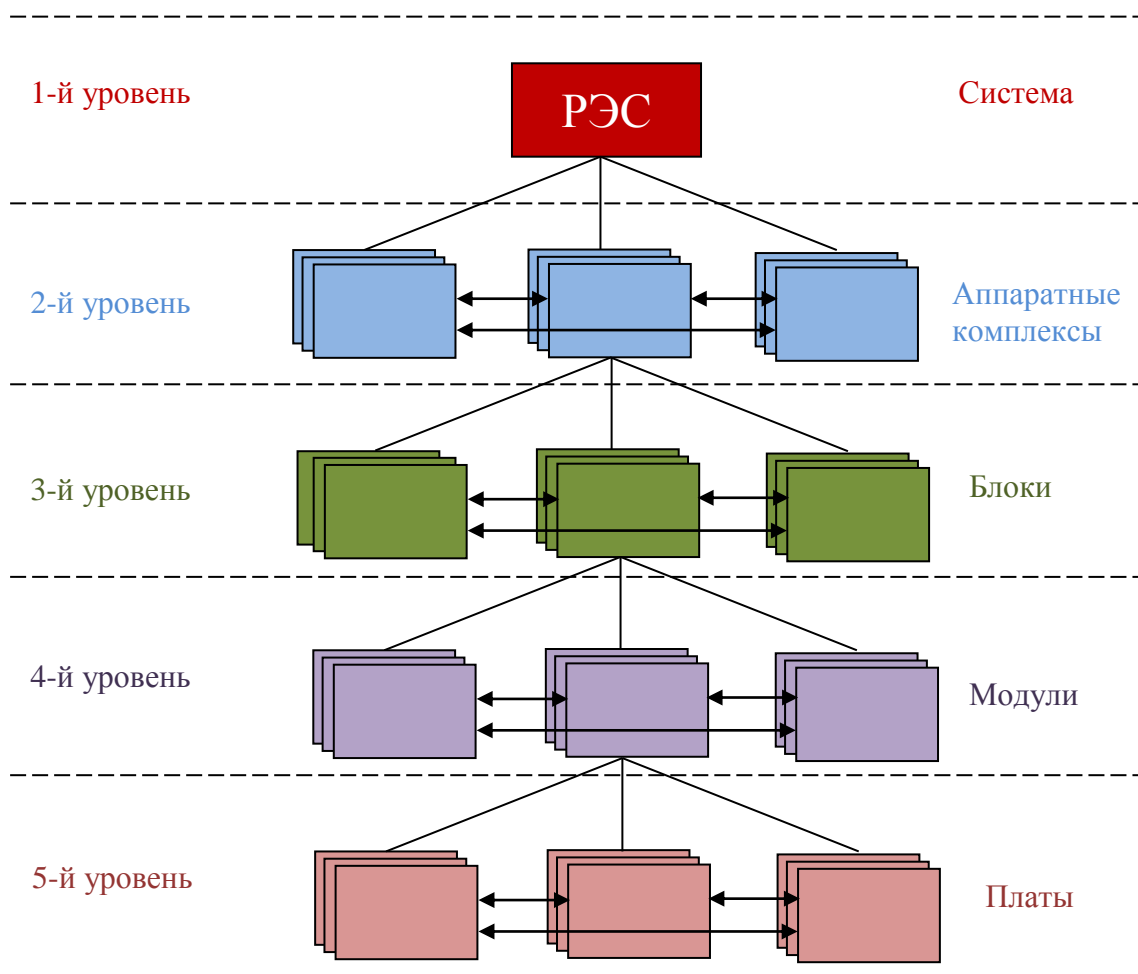


Рис. 1. Иерархическая структура РЭС как структурно-сложной технической системы

На каждом этапе поиска места отказа РЭС проводится процесс разукрупнения, который начинается с поиска отказавшего аппаратного комплекса и заканчивается определением отказавшей платы, что соответствует идентификации отказа. Используем подход к формализованному описанию процесса идентификации отказа в структурно-сложной РЭС в пространстве состояний марковской моделью [6]. Граф состояний процесса идентификации отказа представлен на рис. 2. Этапами процесса идентификации отказа являются: S_1 – возникновение неисправности РЭС, S_2 – определение отказавшего аппаратного комплекса, S_3 – определение отказавшего блока, S_4 – определение неисправного модуля, S_5 – определение неисправной платы, S_6 – идентификация отказа. Приведенный граф состояний соответствует графу состояний процесса гибели и размножения с линейной последовательностью переходов между состояниями, при которых переход из каждого состояния возможен только в предыдущее или последующее состояние. Он аналогичен графу состояний системы массового обслуживания [7], но отличается соотношением между интенсивностями переходов. Кроме того, с учетом содержания описываемого процесса поиска и обнаружения неисправности РЭС начальным состоянием всегда является состояние возникновения неисправности S_1 и при соответствующем задании интенсивностей переходов система по истечении определенного времени поиска неисправности приходит в заключительное состояние обнаружения неисправности и идентификации отказа S_6 .

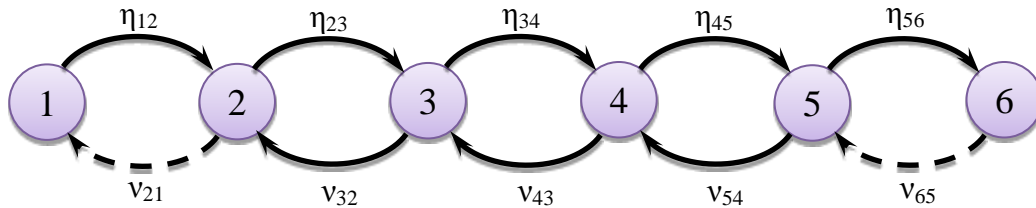


Рис. 2. Граф состояний процесса идентификации отказа РЭС

Увеличение номера состояния соответствует последовательному продвижению по этапам идентификации отказа и увеличению глубины поиска – переходу с более высокого на более низкий уровень в иерархической структуре РЭС. Параметрами процесса переходов между состояниями i и $j=i+1$ при идентификации отказа являются интенсивности переходов η_{ij} , которые определяются средними сроками работ по поиску и правильной идентификации отказа на каждом этапе и обратно пропорциональны среднему времени нахождения на i -м этапе поиска T_i при правильной идентификации отказа:

$$\eta_{i(i+1)}=1/T_i. \quad (1)$$

Для состояний S_1 и S_5 в предположении, что отказавший аппаратный комплекс обнаруживается сразу, а обнаружение неисправной платы соответствует идентификации отказа, можно полагать $T_1 \approx 0$, $T_5 \approx 0$.

Помимо продвижения по этапам поиска и обнаружения неисправности РЭС с более высокого i -го на более низкий $(i+1)$ -й уровень в иерархической структуре РЭС необходимо ввести переходы (возвраты) с более низкого i -го на более высокий $(i-1)$ -й уровень, что отражает сложность поиска неисправности структурно-сложной РЭС и возможные варианты ошибочного принятия решения по определению отказавшего блока, модуля, платы. Параметром процесса такого перехода является интенсивность перехода v_{ji} . Параметрами процесса переходов между состояниями i и $j=i-1$ при идентификации отказа являются интенсивности переходов при неправильной идентификации отказа v_{ij} , которые определяются средними сроками работ по поиску и неправильной идентификации отказа на каждом этапе и обратно пропорциональны среднему времени нахождения на $(i-1)$ -м этапе поиска τ_{i-1} при неправильной идентификации отказа:

$$v_{i(i-1)}=1/\tau_{i-1}. \quad (2)$$

Для состояний S_2 и S_6 в предположении, что отказавший аппаратный комплекс обнаруживается сразу, а обнаружение неисправной платы соответствует идентификации отказа, можно полагать $\tau_1 \rightarrow \infty$, $\tau_5 \rightarrow \infty$.

Таким образом, при анализе процесса поиска и обнаружения неисправностей РЭС интенсивности переходов между более высокими и более низкими уровнями в иерархической структуре РЭС $\eta_{i(i+1)}$ и $v_{i(i-1)}$ задаются по статистике поиска неисправностей: $\eta_{i(i+1)}=1/T_i$, $i=2,3,4$; $v_{i(i-1)}=1/\tau_{i-1}$, $i=3,4,5$. При этом использование ИПИ-технологий за счет мониторинга технического состояния изделия, сбора сведений и ведения баз данных (БД) об отказах конкретного изделия и изделий-аналогов [8, 9] позволяет увеличить интенсивности переходов $\eta_{i(i+1)}$ и уменьшить интенсивности переходов $v_{i(i-1)}$. Переходы из состояния S_2 в состояние S_1 и из состояния S_6 в состояние S_5 , которые характеризуются интенсивностями переходов $v_{21} \approx 0$ и $v_{65} \approx 0$, введены формально для обеспечения соответствия графа состояний процесса идентификации отказа графу состояний процесса гибели и размножения и возможности описания его системой дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с правилом Колмогорова.

В соответствии с графом состояний, приведенным на рис. 2, и введенными обозначениями процесс идентификации отказа описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{F}_1(t) = -\eta_{12}F_1(t) + \nu_{21}F_2(t), \\ \dot{F}_2(t) = -\nu_{21}F_2(t) + \eta_{12}F_1(t) + \nu_{32}F_3(t) - \eta_{23}F_2(t), \\ \dot{F}_3(t) = -\nu_{32}F_3(t) + \eta_{23}F_2(t) + \nu_{43}F_4(t) - \eta_{34}F_3(t), \\ \dot{F}_4(t) = -\nu_{43}F_4(t) + \eta_{34}F_3(t) + \nu_{54}F_5(t) - \eta_{45}F_4(t), \\ \dot{F}_5(t) = -\nu_{54}F_5(t) + \eta_{45}F_4(t) + \nu_{65}F_6(t) - \eta_{56}F_5(t), \\ \dot{F}_6(t) = -\nu_{65}F_6(t) + \eta_{56}F_5(t), \end{cases} \quad (3)$$

где $F_1(t) \dots F_6(t)$ – вероятности нахождения в момент времени t процесса идентификации отказа в состояниях $S_1 \dots S_6$ соответственно, удовлетворяющие условию нормировки $\sum_{i=1}^6 F_i(t) = 1$.

Вероятность $F_6(t)$ соответствует вероятности идентификации отказа в момент времени t : $P_{\text{ид.о}}(t) = F_6(t)$.

Начальными условиями для анализа с использованием рассмотренной модели процесса идентификации отказа, возникшего в момент времени $t=0$, являются вероятности $F_1(0)=1$, $F_2(0)=F_3(0)=F_4(0)=F_5(0)=F_6(0)=0$. Для стационарного режима при $t \rightarrow \infty$ система дифференциальных уравнений (3) преобразуется в систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \nu_{21}F_2 - \eta_{12}F_1 = 0, \\ \eta_{12}F_1 + \nu_{32}F_3 - (\nu_{21} + \eta_{23})F_2 = 0, \\ \eta_{23}F_2 + \nu_{43}F_4 - (\nu_{32} + \eta_{34})F_3 = 0, \\ \eta_{34}F_3 + \nu_{54}F_5 - (\nu_{43} + \eta_{45})F_4 = 0, \\ \eta_{45}F_4 + \nu_{65}F_6 - (\nu_{54} + \eta_{56})F_5 = 0, \\ \eta_{56}F_5 - \nu_{65}F_6 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Стационарное значение вероятности $F_6(t)$ при $t \rightarrow \infty$ определяется выражением

$$P_6 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^5 \prod_{k=i}^5 \frac{\nu_{(k+1)k}}{\eta_{k(k+1)}}}. \quad (5)$$

Выражение (5) является аналитическим решением системы линейных уравнений (4), описывающих стационарный режим процесса гибели и размножения, для вероятности F_6 . При значениях интенсивностей переходов $\nu_{21} \approx 0$, $\nu_{65} \approx 0$, $\eta_{12} \rightarrow \infty$, $\eta_{56} \rightarrow \infty$, что соответствует $\tau_1 \rightarrow \infty$, $\tau_5 \rightarrow \infty$, $T_1 \approx 0$, $T_5 \approx 0$, вероятность $F_6 = P_{\text{ид.о}}$ при $t \rightarrow \infty$ стремится к единице. Значение вероятности идентификации отказа $P_{\text{ид.о}}=1$ соответствует событию идентификации отказа, и при принятых допущениях стационарному режиму всегда соответствует обнаружение неисправности и идентификации отказа. При этом интервал времени, в течение которого значение вероятности $P_{\text{ид.о}}(t) = F_6(t)$ достигает значения, близкого к единице, зависит от соотношения между интенсивностями переходов $\eta_{i(i+1)} = 1/T_i$, $i=2,3,4$, и $\nu_{i(i-1)} = 1/\tau_{i-1}$, $i=3,4,5$.

На рис. 3 показаны расчетные графики зависимости от времени t вероятности идентификации отказа и обнаружения неисправности $P_{\text{ид.о}}$ с использованием и без использования ИПИ-технологий. Кривая 1 соответствует поиску неисправностей с полнофункциональным использованием ИПИ-технологий, кривая 2 – поиску неисправностей с использованием интерактивных технических руководств, при этом обновление информации в БД о причинах отказов и методах их устранения не предусмотрено, кривая 3 – поиску неисправностей без использования ИПИ-технологий. Задавались следующие интенсивности переходов: при поиске неисправностей с использованием ИПИ-технологий – $\eta_{23}=6 \text{ ч}^{-1}$, $\eta_{34}=5 \text{ ч}^{-1}$, $\eta_{45}=4 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_{32}=\nu_{43}=\nu_{54}=10^{-3} \text{ ч}^{-1}$, при поиске неисправностей с использованием интерактивных технических руководств – $\eta_{23}=0,25 \text{ ч}^{-1}$, $\eta_{34}=0,2 \text{ ч}^{-1}$, $\eta_{45}=0,17 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_{32}=\nu_{43}=\nu_{54}=10^{-3} \text{ ч}^{-1}$, при поиске неисправностей без использования ИПИ-технологий – $\eta_{23}=0,11 \text{ ч}^{-1}$, $\eta_{34}=0,1 \text{ ч}^{-1}$, $\eta_{45}=0,09 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_{32}=\nu_{43}=\nu_{54}=10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Для формальных переходов во всех случаях полагалось $\eta_{12}=\eta_{56}=10^6 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_{21}=\nu_{65}=10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

С момента возникновения отказа вероятность его идентификации $P_{\text{ид.о}}(t)$ монотонно возрастает, приближаясь в определенный момент времени t к единичному значению. Момент

времени, в который вероятность идентификации отказа достигает значения, близкого к единице, принимается как максимальное время идентификации отказа $T_{ид.о}$. В качестве такого значения вероятности идентификации отказа задавалось значение $P_{ид.о}(T_{ид.о})=0,99$. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает, что в рассмотренных условиях применение ИПИ-технологий приводит к сокращению максимального времени идентификации отказа $T_{ид.о}$ до 13 раз. При использовании ИПИ-технологий $T_{ид.о} \approx 10$ ч, а без использования ИПИ-технологий $T_{ид.о} \approx 130$ ч. Сокращение времени идентификации отказа при использовании ИПИ-технологий прежде всего связано с возможностью обращения при поиске неисправностей к БД и сокращением времени определения и согласования методов устранения неисправностей.

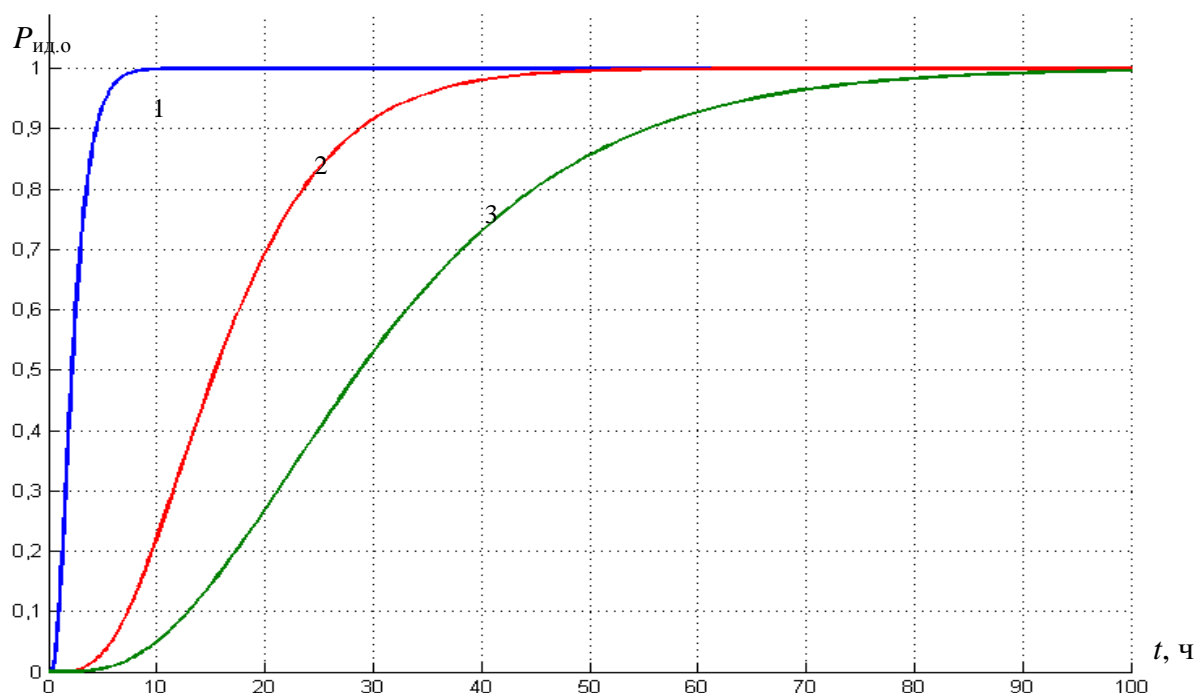


Рис. 3. Зависимость вероятности идентификации отказа от времени при использовании и без использования ИПИ-технологий

Найденная зависимость от времени вероятности идентификации отказа и обнаружения неисправности $P_{ид.о}(t)=F_6(t)$ представляет собой функцию распределения времени идентификации отказов для использованных исходных данных – значений параметров $\eta_{i(i+1)}=1/T_i$, $i=2,3,4$, и $\nu_{i(i-1)}=1/\tau_{i-1}$, $i=3,4,5$. Сравнение величин $T_{ид.о}$ для различных исходных данных позволяет оценить роль использования ИПИ-технологий в процессе идентификации отказов и выигрыш в максимальном (гарантированном) времени идентификации отказа и обнаружения неисправности РЭС.

Если же использовать модель процесса идентификации отказов РЭС с учетом применения ИПИ-технологий для формирования исходных данных для марковской модели процесса эксплуатации РЭС в пространстве состояний [10], то по зависимости $P_{ид.о}(t)=F_6(t)$ необходимо определить среднее время идентификации отказа $T_{ид.ср}$. Для этого, следуя [11], путем дифференцирования определяется плотность распределения вероятности идентификации отказов

$w_{ид.о}(t) = \frac{dF_6(t)}{dt}$, а по полученной плотности распределения – среднее время идентификации

отказа $T_{\text{ид.ср}} = \int_0^{\infty} w_{\text{ид.о}}(t)tdt$. Найденному таким образом среднему времени идентификации

отказа $T_{\text{ид.ср}}$ будет соответствовать интенсивность распознавания неидентифицированных отказов $\gamma=1/T_{\text{ид.ср}}$.

В рассмотренных условиях численные значения среднего времени идентификации отказа $T_{\text{ид.ср}}$ при поиске неисправностей с полнофункциональным использованием ИПИ-технологий (кривая 1 на рис. 3) составляет 2,7 ч; при поиске неисправностей с использованием интерактивных технических руководств, при этом обновление информации в БД о причинах отказов и методах их устранения не предусмотрено (кривая 2 на рис. 3) – 18,2 ч; при поиске неисправностей без использования ИПИ-технологий (кривая 3 на рис. 3) – 34,3 ч.

Строго говоря, марковские модели процессов в пространстве состояний предполагают экспоненциальное распределение потоков событий [7], а получаемые с использованием рассмотренной модели процесса идентификации отказов РЭС с учетом использования ИПИ-технологий зависимости вероятности идентификации отказа от времени не являются экспоненциальными. Поэтому сравним значения функции распределения $P_{\text{ид.о}}(t)=F_6(t)$ при $t=T_{\text{ид.ср}}$ со значениями экспоненциальной функции распределения $P(t)=1-\exp(-t/T_{\text{ср}})$ при $t=T_{\text{ср}}$. При значении аргумента, равном его среднему значению $t=T_{\text{ср}}$, экспоненциальная функция распределения принимает значение $P(t)=0,632$.

Значения функции распределения $P_{\text{ид.о}}(t)=F_6(t)$, если $t=T_{\text{ид.ср}}$, при поиске неисправностей с полнофункциональным использованием ИПИ-технологий составляет 0,6323; при поиске неисправностей с использованием интерактивных технических руководств, когда обновление информации в базе данных ИПИ о причинах отказов и методах их устранения не предусмотрено – 0,6259; при поиске неисправностей без использования ИПИ-технологий – 0,625. Данные значения мало отличаются от значения экспоненциальной функций распределения $P(t)=0,632$ при значениях аргумента, равных среднему значению $t=T_{\text{ср}}$.

Результаты расчетов стационарного коэффициента готовности РЭС при различных значениях интенсивностей процесса поиска и обнаружения неисправностей на основании решения системы уравнений процесса функционирования РЭС в пространстве состояний [10] представлены на рис. 4 и 5. Использование информационной поддержки позволяет за счет снижения времени идентификации отказа повысить готовность унифицированной РЭС к применению по назначению.

На рис. 4 показаны расчетные зависимости коэффициента готовности K_r от интенсивности распознавания неидентифицированных отказов γ при различных интенсивностях восстановления μ . Задавались следующие параметры системы эксплуатации РЭС: интенсивность поступления заявок на применение $0,4 \text{ ч}^{-1}$; интенсивность подготовки к применению 4 ч^{-1} ; интенсивность применения $1,33 \text{ ч}^{-1}$; интенсивность неидентифицированных отказов $5 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; интенсивность идентифицированных отказов 10^{-3} ч^{-1} ; интенсивность проведения технического обслуживания $2,3 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; интенсивность завершения технического обслуживания $0,007 \text{ ч}^{-1}$. Кривая 1 соответствует $\mu=2 \text{ ч}^{-1}$ (средняя продолжительность восстановления РЭС 30 мин), кривая 2 – $\mu=0,3333 \text{ ч}^{-1}$ (средняя продолжительность восстановления РЭС 3 ч), кривая 3 – $\mu=0,0416 \text{ ч}^{-1}$ (средняя продолжительность восстановления РЭС 1 сут.), кривая 4 – $\mu=0,0083 \text{ ч}^{-1}$ (средняя продолжительность восстановления РЭС 5 сут.).

Приведенные зависимости показывают: при уменьшении интенсивности распознавания неидентифицированных отказов γ , что соответствует увеличению времени идентификации отказов, уменьшается коэффициент готовности K_r , особенно в области малых значений интенсивности распознавания неидентифицированных отказов, в рассмотренных условиях – при $\gamma < 0,02 \text{ ч}^{-1}$ (среднее время идентификации отказа составляет более 2 сут.). При увеличении γ величина коэффициента готовности K_r насыщается на некотором уровне, который зависит от интенсивности восстановления μ . Так, при $\gamma > 0,04 \text{ ч}^{-1}$ (среднее время идентификации

отказа составляет менее суток) коэффициент готовности K_r практически не изменяется. С увеличением интенсивности восстановления μ , что соответствует уменьшению времени устранения отказов, коэффициент готовности K_r увеличивается. Использование ИПИ-технологий при эксплуатации РЭС позволяет повысить как интенсивность распознавания неидентифицированных отказов γ , так и интенсивность восстановления μ [8, 9].

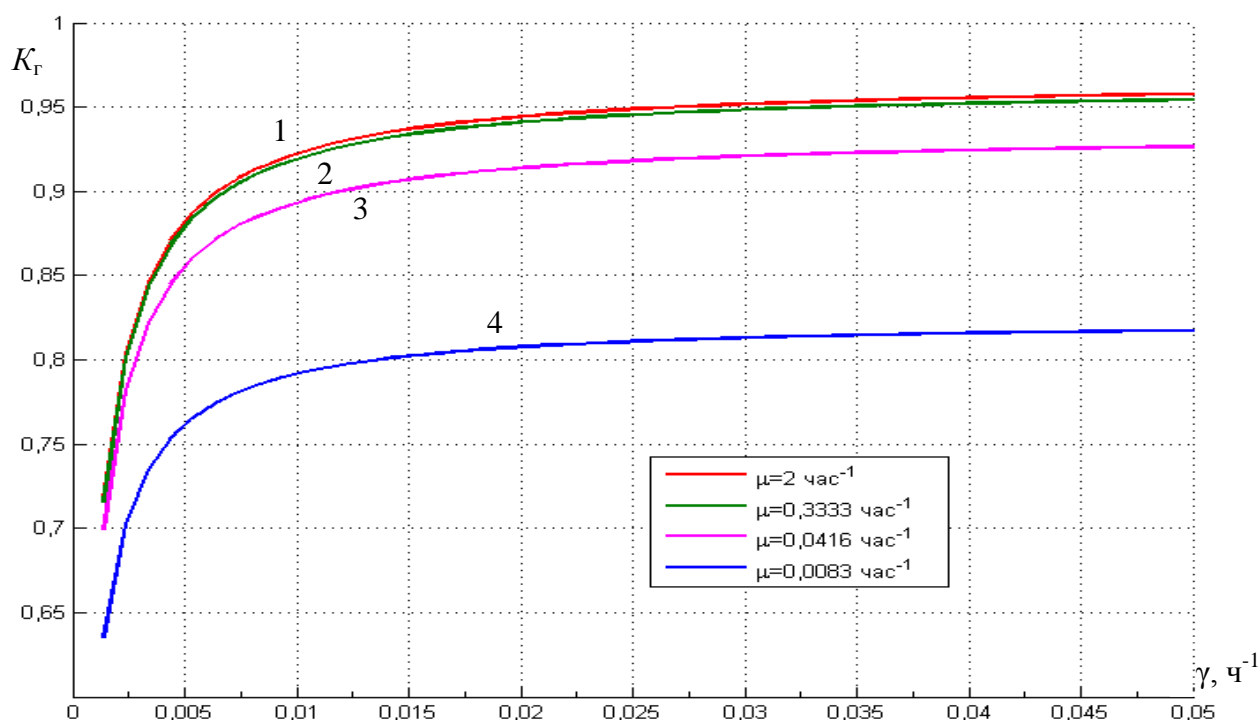


Рис. 4. Зависимость коэффициента готовности РЭС от интенсивности распознавания неидентифицированных отказов

Если уменьшается среднее время восстановления РЭС, диапазон изменения коэффициента готовности K_r при изменении интенсивности распознавания неидентифицированных отказов увеличивается. При среднем времени восстановления 5 сут. коэффициент готовности изменяется в пределах от 0,6356 до 0,8174. Если среднее время восстановления РЭС составляет 1 сут., то коэффициент готовности изменяется в пределах от 0,6996 до 0,9264. При среднем времени восстановления РЭС 3 ч коэффициент готовности изменяется в пределах от 0,7154 до 0,9542. При среднем времени восстановления РЭС 30 мин коэффициент готовности изменяется в пределах от 0,7173 до 0,9577. К тому же при различных значениях среднего времени восстановления РЭС значение интенсивности распознавания неидентифицированных отказов, при котором дальнейшее увеличение этой интенсивности не существенно влияет на готовность РЭС, различно. Так, при $\mu = 2 \text{ ч}^{-1}$ это значение составляет $\gamma \approx 0,05 \text{ ч}^{-1}$, при $\mu = 0,3333 \text{ ч}^{-1}$ — $\gamma \approx 0,048 \text{ ч}^{-1}$, при $\mu = 0,042 \text{ ч}^{-1}$ — $\gamma \approx 0,043 \text{ ч}^{-1}$, при $\mu = 0,0083 \text{ ч}^{-1}$ — $\gamma \approx 0,033 \text{ ч}^{-1}$. Снижение временных затрат на восстановление РЭС требует снижения временных затрат на идентификацию отказов.

На рис. 5 приведены расчетные зависимости коэффициента готовности K_r от интенсивности неидентифицированных отказов λ при различных интенсивностях их распознавания γ . Задавались следующие параметры системы эксплуатации РЭС: интенсивность поступления заявок на применение $0,4 \text{ ч}^{-1}$; интенсивность подготовки к применению 4 ч^{-1} ; интенсивность применения $1,33 \text{ ч}^{-1}$; интенсивность идентифицированных отказов 10^{-3} ч^{-1} ; интенсивность проведения технического обслуживания $2,3 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; интенсивность завершения технического обслуживания $0,007 \text{ ч}^{-1}$; интенсивность восстановления 2 ч^{-1} . Кривая 1 соответствует

$\gamma=4 \text{ ч}^{-1}$ (среднее время распознавания отказа 15 мин), кривая 2 – $\gamma=0,667 \text{ ч}^{-1}$ (среднее время распознавания отказа 1,5 ч), кривая 3 – $\gamma=0,083 \text{ ч}^{-1}$ (среднее время распознавания отказа 0,5 сут.), кривая 4 – $\gamma=0,017 \text{ ч}^{-1}$ (среднее время распознавания отказа 2,5 сут.).

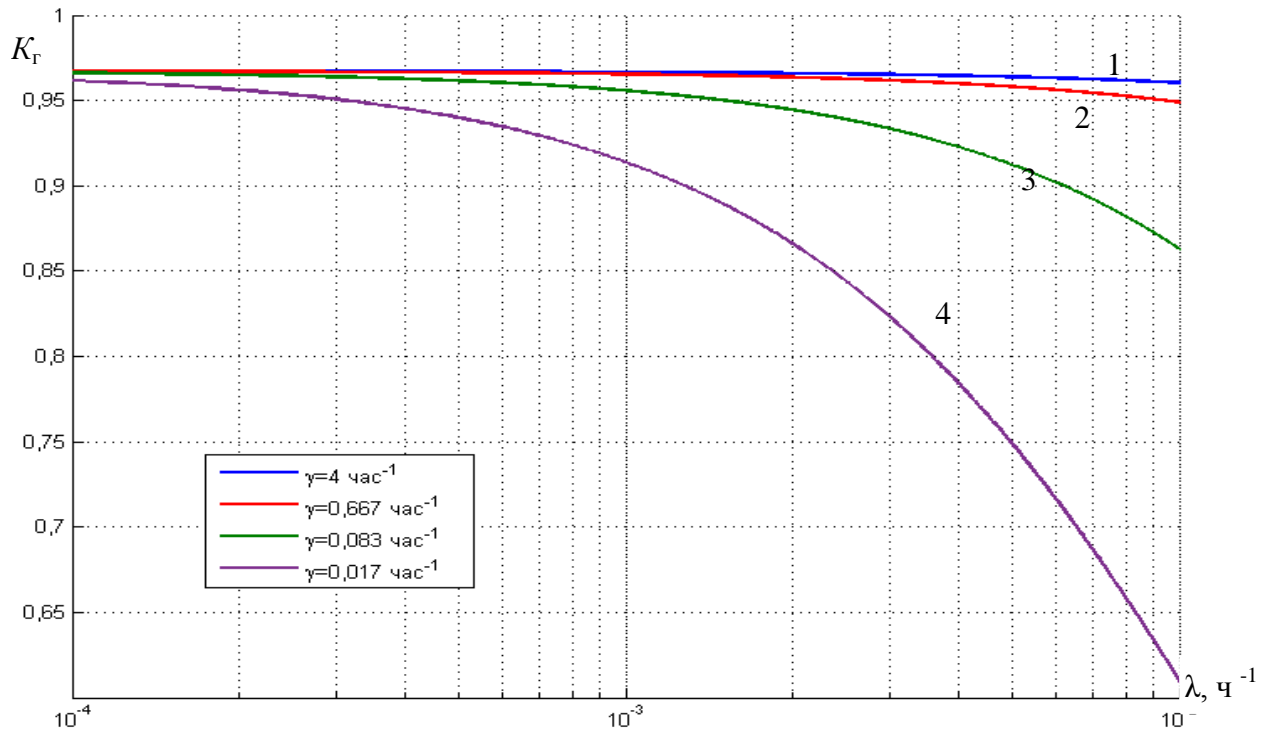


Рис. 5. Зависимость коэффициента готовности РЭС от интенсивности неидентифицированных отказов

Приведенные зависимости показывают, что при малых значениях интенсивности неидентифицированных отказов λ коэффициент готовности K_G практически не изменяется. Увеличение интенсивности неидентифицированных отказов λ приводит к снижению коэффициента готовности K_G , которое тем существеннее, чем меньше интенсивность распознавания неидентифицированных отказов γ . В рассмотренных условиях при $\gamma=4 \text{ ч}^{-1}$, и $\gamma=0,667 \text{ ч}^{-1}$ изменение величины λ в широких пределах практически не влияет на величину K_G . Использование ИПИ-технологий позволяет уменьшить время обнаружения неидентифицированных отказов и тем самым увеличить интенсивность распознавания неидентифицированных отказов γ . При среднем времени идентификации отказа 2,5 сут. коэффициент готовности изменяется в пределах от 0,6113 до 0,961. Если среднее время идентификации отказа составляет 0,5 сут., то коэффициент готовности изменяется в пределах от 0,8651 до 0,966. При среднем времени идентификации отказа 1,5 ч коэффициент готовности изменяется в пределах от 0,9499 до 0,9671. Если среднее время идентификации отказа составляет 15 мин, то коэффициент готовности изменяется в пределах от 0,9608 до 0,9672. Кроме того, по мере накопления статистики и наполнения БД по отказам интенсивность неидентифицированных отказов λ уменьшается, поскольку первоначально неидентифицированные отказы переходят в разряд идентифицированных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная марковская модель процесса идентификации отказов РЭС позволяет оценить параметр модели процесса эксплуатации РЭС – среднее время идентификации (распо-

знания) отказов. Основой модели является формализованное описание в пространстве состояний процедуры последовательного поиска неисправности в иерархической структуре РЭС, образованной ее делением на структурные элементы – аппаратные комплексы, блоки, модули, платы. Анализ зависимостей вероятности идентификации отказа и обнаружения неисправности от времени с использованием и без использования ИПИ-технологий позволяет сделать вывод, что применение ИПИ-технологий приводит к значительному сокращению времени идентификации отказа, в рассмотренных условиях – до 13 раз.

Полученные результаты исследования коэффициента готовности РЭС при различных соотношениях между параметрами модели и при использовании ИПИ-технологий для поиска и идентификации неисправностей демонстрируют, что использование ИПИ-технологий приводит к повышению готовности к применению сложных технических систем в широком диапазоне условий эксплуатации.

Список используемых источников

1. *Рябинин И.А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 278 с.
2. *Качала В.В.* Основы теории систем и системного анализа. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 216 с.
3. *Зеленцов В.А., Павлов А.Н.* Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы // Информационно-управляющие системы. – 2010. – №6. – С. 7–12.
4. *Галантерник Ю.М., Гориш А.В., Калинин А.Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М.: МГУЛ, 2003. – 200 с.
5. *Молотов Е.П.* Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. – М.: Физматлит, 2004. – 256 с.
6. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения / С.Ф. Боев, А.С. Логовский, А.П. Линкевичиус и др. – М.: Научная книга, 2019. – 424 с.
7. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
8. *Норенков И.П., Кузьмик П.К.* Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
9. Информационная поддержка жизненного цикла электронных средств / В.В. Гольдин, В.Г. Журавский, А.В. Сарафанов и др. – М.: Радио и связь, 2002. – 379 с.
10. *Мальцев Г.Н., Склемин Д.В.* Анализ готовности сложных технических систем при использовании информационных технологий поддержки жизненного цикла // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 3. – С. 28–46.
11. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.

Ю.М. Сударь,
кандидат техн. наук;
В.И. Щербаков,
кандидат техн. наук, доцент;
А.О. Юлина

ПАССИВНАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

На основе анализа физических силовых полей Земли на высоте геостационарной орбиты (ГСО), возможностей отечественных средств выведения и анализа принципов работы существующих систем пассивной гравитационной стабилизации (СПГС) обоснована новая принципиальная схема СПГС, в которой в качестве гравитационного балласта рассматривается разгонный блок, соединенный с гравитационной штангой КА длинным тросом. Приведены результаты расчетов и анализа баллистической схемы развертывания системы в рабочее положение на ГСО, а также оценка основных параметров СПГС.

Ключевые слова: геостационарная орбита, система пассивной гравитационной стабилизации, разгонный блок, баллистическая схема развертывания.

ВВЕДЕНИЕ

Использование современных космических технологий позволяет решать на принципиально новом качественном уровне широкий спектр прикладных задач. Эффективность решения этих задач определяется качественными показателями средств выведения, надежностью и продолжительностью активного функционирования орбитальных средств, качественными показателями управления и эксплуатации этих средств.

Особую нишу среди орбитальных космических средств занимают крупногабаритные космические аппараты на геостационарной орбите. Их предельные массово-габаритные характеристики напрямую зависят от возможностей средств выведения. Высокая стоимость выведения, значительное энергоресурсное потребление в процессе эксплуатации и ряд других факторов, прежде всего научно-технических и экономических, предъявляют к орбитальным объектам на геостационарной орбите особые требования по эффективности их целевого применения. Поэтому поиск и обоснование новых решений, связанных с увеличением сроков активного существования геостационарного КА, повышением надежности функционирования его систем, позволит решить эту задачу.

Рассмотренные и научно обоснованные в настоящей статье принцип, конструктивная схема пассивной гравитационной стабилизации, а также баллистическая схема развертывания системы в рабочее положение отличаются технологической простотой реализации и позволяют минимизировать техногенное воздействие на среду за счет использования отработавших свой ресурс ракетных блоков в качестве «выносного балласта» системы пассивной гравитационной стабилизации.

АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Рассмотрим крупногабаритный космический объект в физических полях на геостационарной орбите. Приведем анализ и оценку трех основных факторов среды: гравитационного, геомагнитного и светового давления.

Гравитационный фактор. Возмущающие гармоники геопотенциала [1], а именно, несферичность Земли, и высшие гармоники практически не оказывают влияние на параметры

геостационарной орбиты КА, так как она находится в плоскости экваториальной симметрии гравитационного поля, при этом сам космический объект статичен в этом поле. Эти аргументы усилены удаленностью космического объекта от центра притяжения. Радиус орбиты почти в семь раз больше среднего радиуса Земли. Это позволяет использовать оценки гравитационного градиента по модели центрального поля:

$$gr = 2 \frac{\mu}{r_c^3}, \quad (1)$$

где gr – модуль градиента геопотенциала;

μ – гравитационный параметр, $\mu = 398602 \text{ км}^3/\text{с}^2$;

r_c – геоцентрический радиус орбиты.

На рис. 1 представлен график изменения величины гравитационного градиента (1) вдоль геоцентрического радиуса. Значение этого параметра на высоте геостационарной орбиты равно $1,058 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-2}$. Заметим, что величина гравитационного градиента на низкой орбите в 266 раз превышает значение этого параметра на геостационарной орбите. Это означает, что для создания одинаковых условий пассивной гравитационной стабилизации линейный размер космического объекта на геостационарной орбите должен в 266 раз превышать линейный размер низковысотного КА.

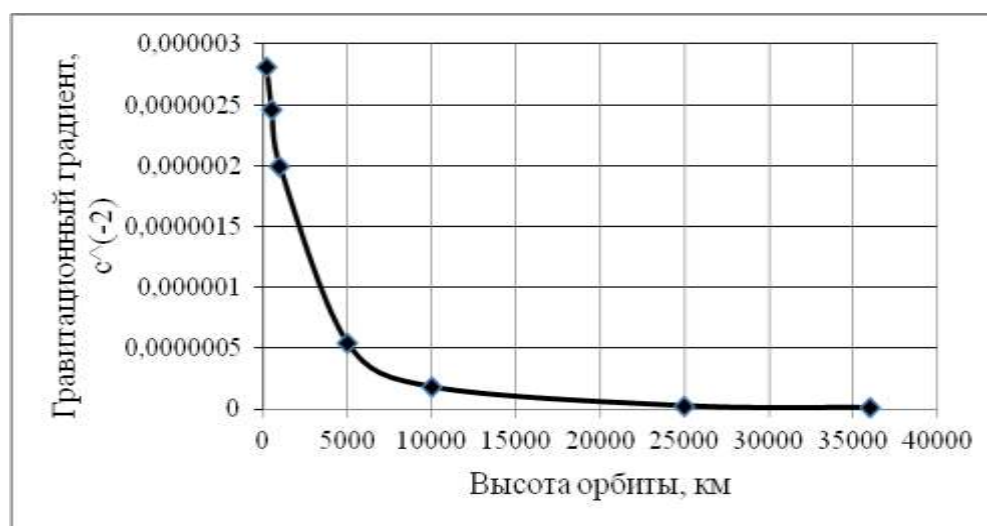


Рис. 1. Радиальное изменение гравитационного градиента

Сопоставляя гравитационные градиенты Луны и Земли, отметим, что их соотношение оценивается величиной 10^{-8} [2].

Геомагнитный фактор. Приведем оценку электромагнитной силы, возникающей в результате взаимодействия КА с геомагнитным полем Земли. Сила Лоренца, действующая на электростатически заряженный КА, определяется выражением [2]

$$F_L = q_c V_c B, \quad (2)$$

где q_c – электростатический заряд КА;

V_c – орбитальная скорость КА;

B – индукция геомагнитного поля.

Приближенная оценка силы Лоренца по формуле (2), без уточнения физических свойств материалов, формы и размеров КА, характеризуется величиной $F_L \approx 10^{-8} \text{ Н}$. Переменная компонента силы Лоренца изменяется по гармоническому закону на периоде земных суток.

Световое давление. Удельное световое давление на единицу площади [1] определяется выражением

$$p_{cb} = (1 + k_{cb}) \frac{q}{c} \cos^2 \alpha,$$

где k_{cb} – коэффициент отражательной способности;

c – скорость света;

α – угол между направлением потока частиц и нормалью к освещенной поверхности;

q – удельная лучистая энергия, проходящая через единицу площади поперечного сечения в единицу времени, $q = \frac{Q}{4\pi\rho_c^2}$;

Q – суммарная лучистая энергия Солнца за единицу времени (мощность);

ρ_c – расстояние до Солнца, $\rho_c = 1,49 \cdot 10^{11}$ м.

Мощность излучения Солнца [3] $Q = 3,86 \cdot 10^{26}$ Вт. Следовательно, удельная лучистая энергия $q = \frac{3,86 \cdot 10^{26}}{4 \cdot 3,14 \cdot (1,49)^2 \cdot 10^{22}} = 1384,3$ Вт/м². Тогда удельное световое давление можно определить из следующего выражения:

$$p_{cb} = 4,6 \cdot 10^{-6} (1 + k_{cb}) \cos^2 \alpha \text{ Н/м}^2.$$

Рассмотрим модель формы КА в виде пластины, нормаль которой направлена к центру Земли. Максимальное значение силы светового давления на пластину площадью 100 м² и коэффициентом отражательной способности 0,8 в период осеннего и весеннего равноденствия оценивается величиной $8,3 \cdot 10^{-4}$ Н. Минимальное значение силы светового давления стремится к нулю. На периоде земных суток функция силы светового давления, изменяясь по закону косинуса, четырежды достигает экстремальных значений.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Гравитационное поле Земли на геостационарной орбите характеризуется очень малым значением гравитационного градиента, поэтому эффективная пассивная гравитационная стабилизация КА возможна при условии линейного распределения массы в конструкции КА на сотни метров.

2. Основные возмущающие факторы геопотенциала (полярное сжатие и высшие гармоники) не оказывают существенного влияния на гравитационную устойчивость крупногабаритного КА на геостационарной орбите, поскольку его положение статично в этом поле.

3. Электромагнитная сила и световое давление на периоде земных суток изменяются по гармоническому закону. Отношение их максимальных значений к силе гравитационного притяжения составляет 10^{-8} для силы Лоренца и 10^{-5} для светового давления.

ДОПУСТИМАЯ МАССА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Выведение КА на геостационарную орбиту осуществляется РН среднего класса РН «Союз-2-1Б», «Союз-2-3» и тяжелыми РН «Протон-М» и «Ангара-А5».

В составе РН среднего класса используется разгонный блок «Фрегат» в различных модификациях. При этом выводимая масса полезной нагрузки на геостационарную орбиту с космодрома Байконур составляет 750–1500 кг [4].

В составе тяжелых РН «Протон-М» и «Ангара-А5» для выведения космических аппаратов на геостационарную орбиту может быть использован двухступенчатый разгонный блок, при этом выводимая полезная нагрузка возрастает до 2500–2900 кг [4].

Таким образом, предельная масса крупногабаритного КА на геостационарной орбите с учетом возможностей отечественных средств выведения не превышает значений 750–2900 кг.

ПАССИВНАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Наибольшее распространение среди пассивных систем стабилизации КА получили системы, использующие для стабилизации восстанавливающий момент гравитационных сил – системы гравистаблизации (СПГС). Подробно о них рассказывается в [5, 6].

В основе существующих СПГС лежит принцип присоединения к КА выносных балластных масс-стабилизаторов. По способу крепления и развертывания стабилизаторов системы подразделяются на жесткие и гибкие.

На практике широко используются гравитационные штанги на основе выдвижных устройств типа STEM (длинные трубчатые стержни) и STAGER (спиральная металлическая лента) [5].

Новой тенденцией является использование в качестве стабилизаторов вместо жестких штанг гибких протяженных элементов. Такие системы получили развитие в связи с разработкой микро- и наноспутников. Например, в малом КА TU Sat 1 стабилизирующий груз был связан с КА 30-метровой титановой проволокой. Точность стабилизации такой системы около 10° [7].

Аналогичную точность для наноспутника GPS Scintillation CubeSat обеспечивает десятиграммовая масса на конце стальной ленты (подобно измерительной рулетке) [8].

Рассмотренные принципы построения СПГС имеют существенные ограничения по линейному размеру и позволяют достигать требуемой точности стабилизации только на низких околоземных орбитах.

Применение штанги, соединенной со стабилизатором гибкой синтетической нитью-тросом, позволяет увеличить между ними расстояние на 2-3 порядка. Это сопровождается возрастанием восстанавливающего гравитационного момента, который пропорционален квадрату расстояния между КА и грузом-стабилизатором. Эта так называемая «система усиленной гравитационной стабилизации» [9] имеет все преимущества для реализации на геостационарной орбите.

Таким образом, пассивная система усиленной гравитационной стабилизации в условиях низкопотенциальной гравитационной среды геостационарной орбиты обладает наилучшими характеристиками для достижения целевого эффекта.

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ КОМПОНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Анализ силовых полей в зоне геостационарной орбиты, возможностей средств выведения на геостационарную орбиту, а также принципов построения системы пассивной гравитационной стабилизации позволяет определить оптимальную в этом смысле компоновочную схему КА (рис. 2). На рис. 2 введены следующие обозначения: 1 – антенна КА; 2 – гравитационная телескопическая штанга; 3 – сферический шарнир; 4 – синтетический трос; 5 – выносная балластная масса. Стержневая гравитационная штанга 2 проходит по главной оси инерции КА 1 и предназначена для передачи гравитационного момента на КА. Узлом крепления штанги к КА является сферический шарнир 3, в котором целесообразно предусмотреть управление по двум углам. Это позволит, с одной стороны, эффективнее решать задачу наведения оси визирования КА, а с другой – наряду с другими средствами решать задачу успокоения колебаний, которые могут быть значительными на этапе развертывания всей системы [10].

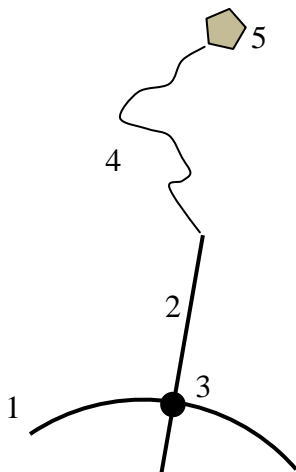


Рис. 2. Компоновочная схема системы пассивной гравитационной стабилизации

Верхний конец штанги соединен с длинным тросом 4. Трос предназначен для удержания на заданном удалении по местной вертикали выносного балласта 5. Основная его функция реализуется за счет разности гравитационных потенциалов и центробежных ускорений на орбите КА и балласта, когда трос «аккумулирует» механическую энергию внутренних сил системы. Трос при этом испытывает натяжение. Совместно трос и штанга реализуют генерацию гравитационного момента, который через сферический шарнир передается на КА.

Для решения задачи пассивной гравистаблизации в качестве материала троса целесообразно выбирать высокомодульные синтетические материалы [11], обладающие малым весом (менее одного килограмма на километр длины), высокой прочностью, малым линейным расширением и значительной стойкостью к агрессивным факторам космической среды.

В качестве выносного балласта предлагается использовать средство доставки КА на геостационарную орбиту. Например, разгонный блок «Фрегат-СБ» имеет конечную массу 950 кг [4]. Такое значение массы практически сопоставимо с массой полезной нагрузки 750–2900 кг и оптимально при максимизации силы натяжения троса и достижения целевого эффекта.

Рассмотренная конструктивная схема СГПС имеет большой потенциал по обеспечению заданной точности одноосной стабилизации КА.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ГРАВИСТАБИЛИЗАЦИИ

Рассмотрим движение по геостационарной орбите системы «КА – балласт», изображенной на рис. 2, в стационарном режиме [2]. В этом режиме концевые массы расположены на местной вертикали и взаимно удалены на расстояние, равное длине соединительного троса. При этом центр масс системы, определяемый выражением

$$r_c = \frac{m_a r_a + m_b r_b}{M}; \quad M = m_a + m_b, \quad (3)$$

где m_a , r_a – масса КА и радиус его круговой орбиты;

m_b , r_b – масса и радиус круговой орбиты выносного балласта,

движется по геостационарной орбите с местной круговой скоростью. Балласт движется выше центра масс и имеет избыток круговой скорости, а КА движется ниже с дефицитом круговой скорости.

За счет разностей гравитационных сил и эйлеровых сил инерции на орбитах концевых масс трос имеет натяжение, которое и обеспечивает вертикальную ориентацию связи.

Оценим величину силы натяжения в функции от геометрических и массовых параметров системы «КА – балласт». Это основной параметр, определяющий точность пассивной гравитационной стабилизации и ее устойчивость по отношению к различным возмущающим факторам.

Оценку выполним при следующих расчетных условиях:

- гравитационное поле ньютоновское;
- линейные размеры концевых масс связи пренебрежимо малы по сравнению с длиной соединительного троса;
- трос представляет собой невесомую и нерастяжимую нить.
- центр масс системы движется по круговой орбите с орбитальной угловой скоростью, равной угловой скорости вращения Земли: $\omega_3 = 7,272 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Силу натяжения троса F_a в точке крепления его к гравитационной штанге определим из решения прямой задачи несвободного движения КА. Требуется по заданной траектории движения КА определить силы, под действием которых это движение происходит. Для этого запишем классическое уравнение движение КА в абсолютных координатах:

$$m_a \frac{d^2 \mathbf{r}_a}{dt^2} = \mathbf{G}_a + \mathbf{F}_a,$$

или в проекциях на главную нормаль к траектории:

$$m_a a_n = G_a - F_a, \quad (4)$$

где a_n – нормальное ускорение КА,

$$a_n = \frac{V_a^2}{r_a} = \frac{(r_a \omega_3)^2}{r_a} = r_a \omega_3^2; \quad (5)$$

G_a – сила гравитационного притяжения КА,

$$G_a = m_a \frac{\mu}{r_a^2}. \quad (6)$$

Радиус орбиты КА получим из выражения (3) с учетом, что длина нерастяжимого троса $l = r_b - r_a$:

$$r_a = r_c - \frac{m_b}{M} l. \quad (7)$$

Подставим выражения (5)–(7) в (4) и разрешим его относительно силы натяжения троса:

$$F_a = m_a \left(\frac{\mu}{r_a^2} - r_a \omega_3^2 \right). \quad (8)$$

Сила натяжения зависит от массы КА и балласта, а также от длины соединительного троса.

На рис. 3 представлен график зависимости силы натяжения (8) на конце гравитационной штанги для генерации восстанавливающего момента:

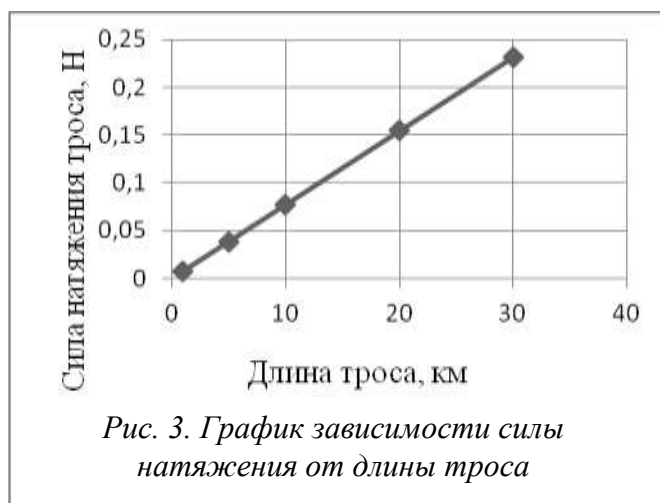
$$\mathbf{M}_{\text{тр}} = \mathbf{d} \times \mathbf{F}_a, \quad (9)$$

где \mathbf{d} – длина гравитационной штанги.

Как видно из графика, сила натяжения практически линейно зависит от длины троса. Для массы КА 4500 кг силу натяжения троса следует пересчитать с коэффициентом 1,6.

Величина гравитационного момента в (9) зависит от произведения модулей сомножителей. Из этого следует, что требуемое значение гравитационного момента может быть обеспечено различными сочетаниями значений длин троса и штанги. При этом сама штанга утрачивает свою первородную функцию гравитационного стабилизатора и выполняет роль «рычага» для создания момента от силы натяжения троса. Следовательно, требование по

максимизации длины штанги, присущее классическим системам пассивной гравитации, утрачивает актуальность. Это позволяет упростить конструктивно-компоновочную схему КА и улучшить его массовый параметр за счет использования длинного и легкого троса, который позволяет за счет своей гибкости компактное депонирование.



Таким образом, для создания условий пассивной гравитационной стабилизации КА на геостационарной орбите, сопоставимых с системами гравитационной стабилизации, использующих гравитационные штанги на низкоорбитальных КА, длина вертикальной связки «КА – разгонный блок» должна быть не менее 3-4 километров.

Увеличение длины связки приводит к линейному росту показателя целевого эффекта.

В проведенных летных экспериментах по разворачиванию связки использовались тросы длиной от нескольких сот метров до десятков километров [11].

АНАЛИЗ СХЕМЫ МАНЕВРА РАЗВЕРТЫВАНИЯ СИСТЕМЫ ГРАВИТАЦИОННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НА МЕСТНУЮ ВЕРТИКАЛЬ

Теоретически исследовано и практически реализовано несколько схем маневров разворачивания связки двух КА, каждая из которых предполагает свою уникальную обеспечивающую систему. Обзор схем разворачивания и описание некоторых экспериментов представлены в [11].

Для разворачивания СПГС на геостационарной орбите на местную вертикаль предлагается теоретически исследованная схема маневра, изложенная в работе [12]. Предложенная схема маневра по сравнению с другими характеризуется относительной технологической простотой и предполагает несложное устройство и алгоритм ее реализации. Схема маневра изображена на рис. 4.

Пунктирными линиями обозначены траектории движения КА и разгонного блока в орбитальной системе координат xOy в плоскости геостационарной орбиты. Начало системы координат находится в центре масс. Для равновеликих по массе концевых элементов связки траектории разворачивания симметричны относительно центра масс всей системы, которая движется по геостационарной орбите.

Система управления для реализации такого маневра должна включать следующие элементы: устройство разделения и расталкивания монолитного блока «КА – разгонный блок», устройство депонирования троса (в виде безынерционной катушки), устройство подачи троса с заданной скоростью или с заданной силой натяжения.

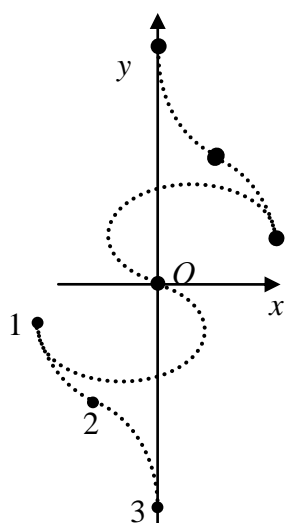


Рис. 4. Схема маневра развертывания на местную вертикаль

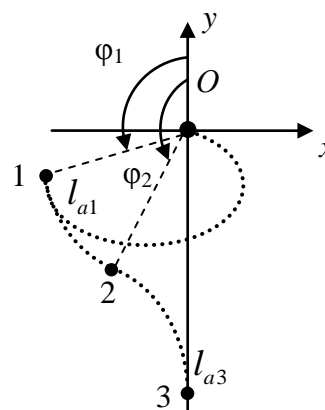


Рис. 5. Параметры схемы маневра развертывания

Технологически маневр развертывания можно разделить на этапы.

1. Разделение и трансверсальное расталкивание КА и разгонного блока с заданным импульсом скорости ΔV , величина которого зависит от массы КА, разгонного блока и конечной длины вертикальной связки. В момент разделения разгонный блок должен быть ориентирован по вектору орбитальной скорости.

2. Подача троса с малым натяжением, соответствующим постоянной перегрузке $n = 0,0534\Delta\bar{V}$, где $\Delta\bar{V}$ – безразмерный импульс расталкивания, нормированный по круговой скорости центра масс связки. Длительность этого этапа определяется полной остановкой подачи троса и сопоставима с периодом обращения (сутки). На рис. 4 этому этапу соответствует участок траектории О–1. Завершение этапа характеризуется параметрами, изображенными на рис. 5: $\bar{t}_1 = 0,997$ – безразмерное время (в долях земных суток); $\bar{l}_1 = 18,93\Delta\bar{V}$ – безразмерное расстояние (в долях радиуса геостационарной орбиты) от КА до центра масс связки; $\varphi_1 = 91,78^\circ$ – угловая фаза.

3. Фиксация и удержание неизменной длины троса. Это действие приводит связку в попутное маятниковое движение относительно центра масс, которое сопровождается возрастанием угловой скорости и силы натяжения троса. Маятниковое движение связки происходит в угловом секторе $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Контроль окончания этого этапа происходит по времени и силе натяжения троса. Участок траектории этого этапа обозначен 1–2.

4. Подача троса с постоянной скоростью. Скорость подачи зависит от длительности предыдущего этапа. Этап характеризуется равномерным взаимным удалением объектов связки и замедлением маятникового движения. Завершение этапа характеризуется остановкой маятникового движения при выходе объектов связки на местную вертикаль. Участок траектории этого этапа обозначен 2–3.

Длительность маневра развертывания связки на местную вертикаль составляет около 1,75 сут.

Приведем пример расчета основных параметров схемы маневра развертывания системы пассивной гравитации в рабочее положение.

Примем в расчете массы КА и выносного балласта соизмеримыми и равными $m_a = m_b = 1000$ кг, что соответствует предельным возможностям выведения на геостационарную орбиту с космодрома Байконур РН «Союз-2-1Б». Выберем длину развернутой систе-

мы по местной вертикали, равной 20 км, что обеспечивает на конце гравитационной штанги усилие $F_a = 0,154$ Н. При этих исходных данных траектории развертывания КА и балласта симметричны относительно центра масс системы.

Ввиду симметричности схемы маневра расчет параметров положения произведен для КА по алгоритму, изложенному в работе [12].

В качестве допущения и упрощения расчетов примем значение фазового угла попутного маятниковое движение $\Delta\varphi = 50^\circ$, при котором длины участков троса, выпущенных на этапе О–1 и 2–3 равны, то есть $l_{a3} = 2l_{a1} = 10$ км.

Приведем численные значения основных параметров положения и управления:

- 1) величина импульса скорости расталкивания $\Delta V = 1,9$ см/с. Далее происходит пассивное разведение объектов при свободной подаче троса до окончания первого этапа;
- 2) время выполнения маневра на первом этапе $t_1 = 23$ ч 56 мин;
- 3) время движения в маятниковом режиме $t_{12} = 7$ ч 57 мин;
- 4) скорость подачи троса на последнем этапе маневра 0,23 м/с;
- 5) продолжительность маневра подачи троса $t_{23} = 6$ ч;
- 6) общее время выполнения маневра развертывания системы 37 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная конструктивная схема системы пассивной гравитационной стабилизации геостационарного КА имеет большой потенциал по достижению заданной точности ориентации КА при ограниченной длине гравитационной штанги. Технология выведения КА на геостационарную орбиту и его последующее развертывание в рабочее положение позволяет использовать «космический мусор» в виде отработавшего свой ресурс ракетного блока в качестве выносной балластной массы – стабилизатора. Предложена баллистическая схема маневра развертывания системы в рабочее положение, которая характеризуется относительной технологической простотой и предполагает несложное аппаратное устройство и алгоритм управления.

Список используемых источников

1. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / под ред. Г.Н. Дубошина. – 2-е изд. – М.: Наука, 1976. – 864 с.
2. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука, 1990. – 336 с.
3. Физика космоса: маленькая энциклопедия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Советская энциклопедия, 1986. – 783 с.
4. Анализ проектно-баллистических характеристик комбинированной схемы выведения космического аппарата на геостационарную орбиту с использованием ракет-носителей среднего класса / А.А. Белик, Ю.Г. Егоров, В.М. Кульков и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 4 (81). – С. 17–21.
5. Сарычев В.А. Вопросы ориентации искусственных спутников // *Итоги науки и техники: исследование космического пространства*. – М.: ВИНТИ, 1978. – Т.11. – 223 с.
6. Храмов Д.А. Пассивные системы гравитационной стабилизации космических аппаратов // *ИТМ НАНУ и НКАУ: информационно-аналитический бюллетень*. – 2005. – №5.
7. TU Sat 1. – URL: <http://www.css.tayloru.edu/~physics/picosat/index4.htm> (дата обращения: 04.07.2019).

8. *Waydo S., Henry D., Campbell M.* CubeSat design for LEO-based Earth science missions. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/2934227> (дата обращения: 04.07.2019).
9. *Андрюенко А.Я., Чадаев А.И.* Анализ возможностей усиленно-гравитационной стабилизации низковысотных спутников // *Космические исследования*. – 1998. – Т. 36, № 4. – С. 391–398.
10. *Пироженко А.В., Храмов Д.А.* Схема гравитационной стабилизации космической тросовой системы со сферическим шарниром // *Техническая механика*. – 2001. – № 1. – С. 136–148.
11. *Щербаков В.И.* Спуск с орбиты малого КА с помощью космической тросовой системы: монография. – Germany, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 232 с.
12. *Щербаков В.И.* Развертывание космической тросовой системы на местную вертикаль // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2012. – Вып. 634. – С. 56–62.

М.Л. Белокопытов*,

кандидат техн. наук;

А.П. Григорьев**,

Г.И. Козырев*,

доктор техн. наук, профессор;

А.В. Кокорев*,

кандидат техн. наук;

Ю.С. Овчинникова**

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

**АО «КБ Арсенал имени М.В. Фрунзе», г. Санкт-Петербург

СОВРЕМЕННЫЕ АВИАЦИОННЫЕ ТРЕНАЖЕРЫ КАК СРЕДСТВО НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДГОТОВКИ АВИАЦИОННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Рассматривается процесс сквозной непрерывной подготовки специалистов аэрокосмического профиля в контексте деятельностного (компетентностного) подхода. Указаны принципиальные проблемы, возникающие при использовании элементов информационных технологий в задачах реализации тренажерно-обучающих систем. Приводится классификация и краткое описание авиационных тренажеров. Выдвинут ряд гипотез, которые могут быть положены в основу проектирования авиационного тренажера, снабженного распределенной экспортной системой, выполняющей роль оптимального электронного инструктора.

Ключевые слова: тренажер, авиационный комплекс, обучающая система.

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение и увеличение количества бортового оборудования, повышение степени автоматизации самолетоводения приводит к перераспределению функций между автоматизированными системами самолета и экипажем, существенно изменяет структуру деятельности бортовых операторов, в значительной степени влияет на их психофизиологическое состояние и, соответственно, на качество решения задач.

Функциональное объединение различных видов оборудования с элементами конструкции самолета для достижения с участием человека-оператора единой цели образует целевые эргатические комплексы [1]. Целевые комплексы, управляемые операторами, определяют требуемый уровень безопасности полетов и эффективность использования самолетов.

Современный уровень информационных технологий обеспечивает возможность высококачественной реализации всех компонентов обучающих систем (ОС) и авиационных тренажеров (АТ) (таких как модели процессов и устройств, пользовательские интерфейсы, средства автоматизированного контроля и т.п.). В то же время многие работы по созданию подобных систем и тренажеров существенным образом тормозятся из-за отсутствия общей методологии их построения и использования. При этом основная сложность в разработке обусловлена широким многообразием целей, методов и средств, применяемых в обучающем процессе с использованием имеющихся инструментальных средств.

В настоящее время актуальной задачей является разработка архитектуры ОС на основе построения алгоритмов управления обучением операторов с использованием обратной связи. Помощь в эффективном решении этой задачи могут оказать интеллектуальные методы извлечения, хранения и представления знаний, являющиеся одним из направлений использования искусственного интеллекта. Вопросы проектирования различных ОС подробно рассмотрены в литературе [2–6]. В то же время проблемы, связанные с проектированием современных АТ как эффективных дидактических средств практического этапа обучающего

процесса, из-за специфики их применения в различных отраслях промышленности раскрыты недостаточно подробно. Этот недостаток предполагается устранить в рамках данной научной статьи.

ЭТАПЫ ПОДГОТОВКИ АВИАЦИОННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Профессиональная подготовка оператора (пилот, штурман, бортовой оператор и пр.) летательного аппарата (ЛА) – это трудоемкий и дорогостоящий процесс. Она складывается из курса теоретического обучения, практической, тренажерной и летной подготовок (рис. 1).



Рис. 1. Основные этапы подготовки авиационных специалистов

Такая последовательность связана с иерархической структурой концептуальной модели (рис. 2) и модели деятельности человека вообще, где на верхнем уровне находятся навыки, среднем – умения, нижнем – знания.

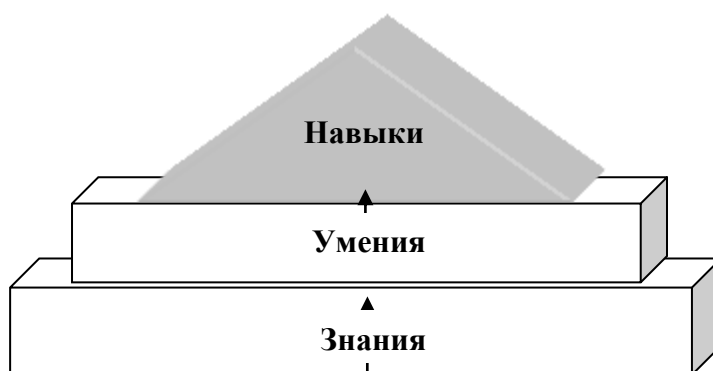


Рис. 2. Иерархическая структура концептуальной модели деятельности человека

Знание – это степень усвоения учебного материала (УМ). Различают пять уровней усвоения УМ (рис. 3).

«Нулевой» уровень – «Понимание» – это такой уровень, при котором обучающийся способен понимать, т.е. осмысленно воспринимать новую для него информацию, этот уровень нельзя называть уровнем усвоения УМ по изучаемой теме. Фактически речь идет о предшествующей подготовке обучающегося, которая дает ему возможность понимать новый для него УМ.

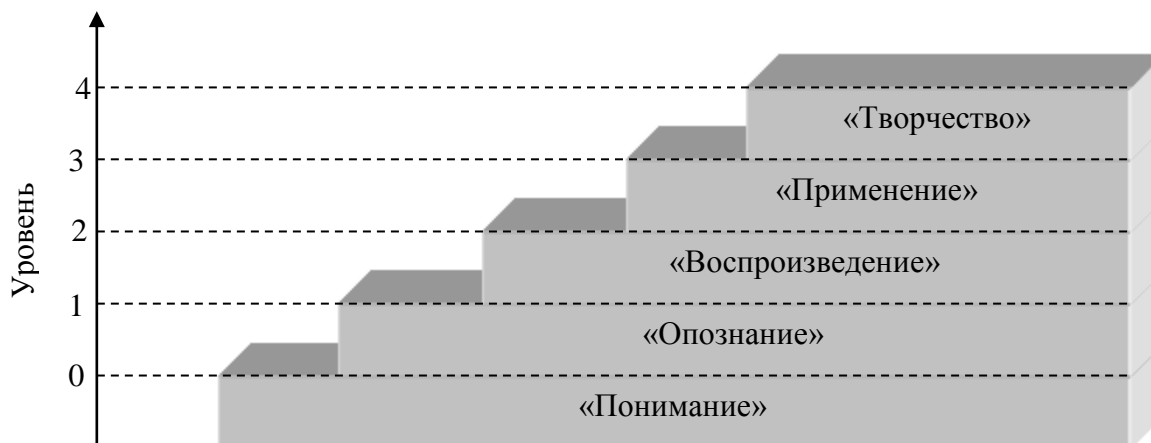


Рис. 3. Уровни усвоения учебной информации

Первый уровень – «Опознание» – это узнавание изучаемых объектов и процессов при повторном восприятии ранее усвоенной информации о них или действий с ними, например выделение изучаемого объекта из ряда предъявленных различных объектов.

Второй уровень – «Воспроизведение» – это воспроизведение усвоенных ранее знаний, от буквальной копии до применения в типовых ситуациях. Примеры: воспроизведение информации по памяти; решение типовых задач (по усвоенному ранее образцу).

Третий уровень – «Применение» – это такой уровень усвоения информации, при котором обучающийся способен самостоятельно воспроизводить и преобразовывать усвоенную информацию для обсуждения известных объектов и применения ее в разнообразных, отличных от типовых, ситуациях. При этом обучающийся способен генерировать субъективно новую (новую для него) информацию об изучаемых объектах и действиях с ними. Примеры: решение нетипичных задач, выбор подходящего алгоритма из набора ранее изученных алгоритмов.

Четвертый уровень – «Творческая деятельность» – это такой уровень владения учебным материалом, при котором обучающийся способен создавать объективно новую информацию (ранее неизвестную никому).

В связи с реализацией высшей школой образовательных стандартов нового поколения намечается тенденция к сокращению часов, отводимых на теоретические и практические аудиторские занятия, в рамках которых в соответствии с концептуальной моделью у обучающихся должны выработываться знания и практические умения. В результате такого подхода значительный объем теоретического УМ, предназначенного для изучения, самостоятельно осваивается обучающимся. Учебный процесс (УП) в данном случае можно трактовать как процесс управления усвоением знаний и умений.

СХЕМА ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ АВИАЦИОННОГО СПЕЦИАЛИСТА

Основными действующими лицами УП являются обучающийся и преподаватель, как объект и субъект управления соответственно. Основной объем знаний обучающийся должен получать в результате самостоятельной работы (СР), при этом роль преподавателя частично должен взять на себя персональный компьютер или ОС [2], которые используются прежде всего как источник получения теоретического УМ из предметной области дисциплины и как средство контроля усвоения знаний (входной, промежуточный и итоговый виды контроля) (рис. 4). Для контроля формирования умений, в свою очередь, необходимо использовать различные технические обучающие системы (ТОС) и (или) АТ.

Ряд особенностей, присущих естественнонаучному образованию, затрудняют использова-

ние информационных технологий при организации обучающего процесса (ОП) с применением ОС и АТ. Главные из этих особенностей связаны прежде всего с тем, что для подобных специальностей принципиально необходима повседневная практическая деятельность в виде регулярно выполняемых лабораторных работ и практических занятий по решению задач в рамках предметной области [7].



Рис. 4. Обобщенная схема процесса обучения

К числу профессий, связанных с решением задач в рамках различных предметных областей, относится и профессия авиационного специалиста (АС) (бортового оператора): гражданский или военный авиационный и инженерно-технический состав. Следовательно, целесообразно рассмотреть процесс обучения АС в контексте деятельностного (компетентностного) подхода [4] в виде схемы, представленной на рис. 5.

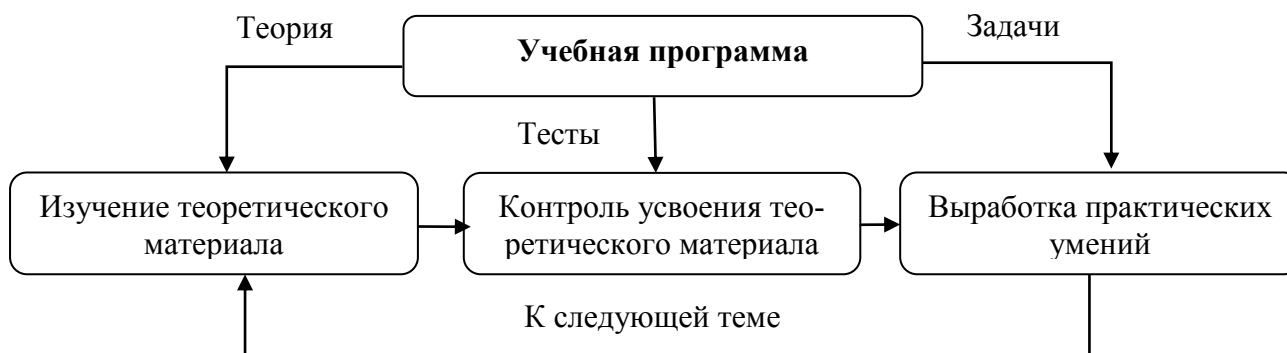


Рис. 5. Процесс обучения

Целью обучения, т.е. целью работы обучающегося, является получение знаний в конкретной предметной области, умений применять различные методы и алгоритмы, получение устойчивых навыков решения функциональных задач.

Современный уровень информационных технологий обеспечивает возможность высококачественной реализации всех компонентов ОС и АТ (модели процессов и устройств, пользовательские интерфейсы, средства автоматизированного контроля и т.п.). В то же время многие работы по созданию подобных систем и тренажеров существенным образом тормозятся из-за отсутствия общей методологии их построения и использования. При этом основная сложность в разработке обусловлена широким многообразием целей, методов и средств, применяемых в ОП с использованием данных «инструментальных средств». На рис. 6 представлена общая структура проблемы создания ОС и АТ, а также приведена номенклатура основных задач, составляющих содержание проблемных аспектов, определены функциональные связи между задачами и предложена последовательность их решения.

Рассмотрим основные технологии, которые используются при проектировании ОС и АТ, для реализации дидактической базы процесса обучения (рис. 7) [8].

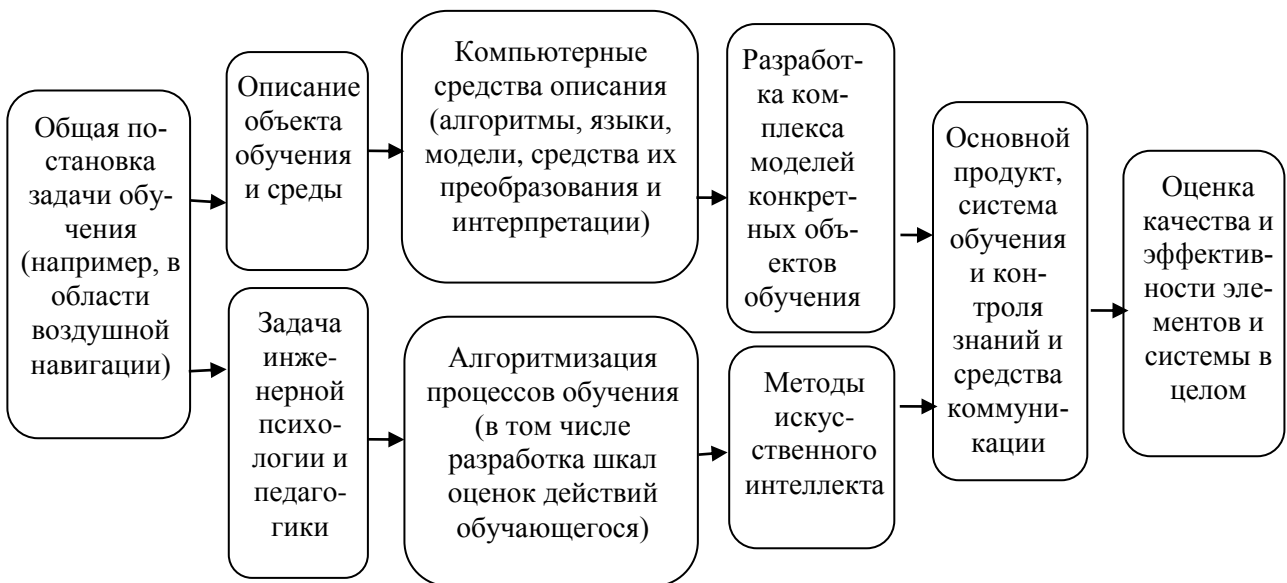


Рис. 6. Общая структура проблемы создания ОС и АТ



Рис. 7. Технологии, используемые в обучающих системах и авиационных тренажерах

На протяжении многих лет интеллектуальная поддержка обучающегося в решении задач рассматривалась как основное предназначение ОС. Выделяют три технологии поддержки в решении задач: интеллектуальный анализ результатов решений обучающегося, интерактивная поддержка в решении задач, поддержка в решении задач на примерах. Интеллектуаль-

ный анализ результатов решений обучающегося имеет дело с конечными ответами обучающегося, как были получены эти ответы – не важно. Чтобы считаться интеллектуальным, анализатор решений должен определить, верно решение или нет, найти, что конкретно в решении выполнено неправильно или чего в нем не хватает, и, возможно, определить, какие недостающие или неправильные знания могут быть ответственны за ошибку. Интеллектуальные анализаторы могут предоставлять обучающимся далеко идущую обратную связь и обновлять модель обучающегося (МО).

Анализ инструментальных оболочек и конечных курсов показал, что каждые из них обладают как определенными преимуществами, так и недостатками. Конечные курсы гораздо проще разрабатывать, но они не обладают достаточной гибкостью. Инструментальные оболочки обладают большей гибкостью, но при их создании используются обобщенные алгоритмы, разработка которых сама по себе чрезвычайно сложна. Кроме того, использование обобщенных алгоритмов может привести к потере информации, специфичной для некоторой предметной области применения.

Как бы ни была сложна структура профессиональной деятельности оператора ЛА, ее можно разделить на компоненты, соответствующие различным видам его деятельности.

Разделение профессиональной деятельности летного экипажа (пилот, штурман, бортовой оператор) позволяет использовать для практической подготовки следующую категорию тренажеров [1]: процедурные АТ, специализированные и комплексные. В иностранных источниках применительно к тренажерам для подготовки экипажей военной авиации в отдельную категорию выделяют групповые (тактические) АТ.

Процедурные авиационные тренажеры (ПАТ) – это имитаторы открытой кабины экипажа с установленным пилотажным оборудованием, основными бортовыми системами, полномасштабными копиями приборов, приборных панелей, органов управления, включая всё оборудование и программно-математическое обеспечение, которые необходимы для воспроизведения движения и управления воздушным судном на земле и в полете [11]. ПАТ предназначены для отработки экипажем процедур подготовки и выполнения полета. В тренажерах такого назначения пульта, приборы и органы управления обычно имитируются с помощью сенсорных мониторов. Для удобства отдельные пульта и органы управления могут быть представлены в виде полноразмерных макетов. Обычно это имитаторы боковых ручек управления ДА, имитаторы пульта управления автопилотом, имитаторы лицевых панелей вычислительной системы самолетовождения. Процедурные тренажеры не предназначены для приобретения навыков пилотирования. Процедурный тренажер, в составе которого отсутствуют полномасштабные копии приборов, называется базовым тренажером для пилотирования по приборам [1].

Специализированные авиационные тренажеры (САТ) – комплексные тренажеры воздушного судна с опциональным оборудованием, предназначенным для выполнения специализированных задач обучения и тренировки. К САТ относятся тренажеры навигационной системы (тренажеры штурмана), пилотажные тренажеры, пилотажно-навигационные, тренажеры навигационной системы и системы вооружения (прицельно-навигационный эргатический комплекс в составе штурмана и стрелка) [1].

Комплексные авиационные тренажеры (КАТ) – это кабинные тренажеры экипажа, предназначенные для подготовки летного экипажа в полном объеме функциональных обязанностей его членов по летной эксплуатации самолета (вертолета) конкретного типа (модели и серии воздушного судна), включающие основные системы ДА и бортовое оборудование, а также программно-математическое обеспечение, которые необходимы для воспроизведения движения и управления ЛА на земле и в полете и выполнения действий в штатной, нештатной и аварийной ситуациях в ожидаемых условиях эксплуатации. КАТ являются тренажерами высокого уровня, на них проводится подготовка в составе экипажа. Они характеризуются наличием имитатора внешней визуальной обстановки, имитатора акселерационных воздействий и имитатора акустических шумов.

Групповые (тактические) авиационные тренажеры (ТАТ) предназначены для отработки групповых боевых действий. Актуальность их появления диктуется современными требованиями, предъявляемыми к ВВС России. Это и сокращение времени на планирование и организацию боевых действий авиации, и необходимость учета противодействия противника применительно к конкретным районам боевого применения, и повышение требований к уровню взаимодействия личного состава авиационных формирований при ведении боевых действий. А главное – адекватное моделирование динамичного характера ведения современных боевых действий авиации. Тренажер обеспечивает качественную тактическую подготовку и командного, и летного, и инженерно-технического составов авиационных формирований за счет применения новейших тренажерных и компьютерных технологий.

Важными преимуществами использования ПАТ и САТ перед комплексными тренажерами являются распараллеливание процесса предварительной практической подготовки, относительно малая стоимость и простота. Учитывая неуклонное возрастание имитирующих возможностей персональных компьютеров, их применение в качестве процедурных и специализированных тренажеров является особенно перспективным.

Как показано в работе В.Е. Шукшунова «Автоматизированные обучающие системы профессиональной подготовки операторов летательных аппаратов», между тренажерной и летной практической подготовками и традиционной теоретической подготовкой наблюдается разрыв. Однако, как отмечает А.А. Красовский в [7], компьютеризация теоретического обучения позволяет ликвидировать этот разрыв, а использование компьютера в качестве ПАТ (так называемые компьютерные тренажеры) позволяет применять их одновременно для теоретической и практической подготовки, при этом обеспечивая на всех этапах обучения реализацию предтренажерной подготовки (ПП) и тренажерной подготовки (ТП), что потенциально обеспечит целевую, сквозную и непрерывную подготовку высококвалифицированных АС.

Исследования показали, что компьютерный тренажер (КТ) является эффективным средством обучения на первоначальных стадиях летной подготовки. Применение КТ уже на этапе теоретической подготовки позволяет повысить мотивацию в изучении теории, так как демонстрирует ее значимость в решении конкретных профессиональных практических задач. Использование компьютерных технологий в обучении позволяет интенсифицировать и индивидуализировать ОП, повысить объективность контроля знаний и качество обучения путем внедрения интеллектуальных методик и средств обучения.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

В настоящее время существуют три пути индивидуализации обучения. Первый из них характеризуется тем, что выбор обучающих воздействий целиком и полностью определяется «интеллектуальным» компьютером.

Второй путь предполагает, что сами обучающиеся определяют то управление обучением, которое является для них предпочтительным. Он основывается на предположении, что обучающиеся намного лучше, чем компьютер, смогут определить, какая помощь им нужна, сколько и какой трудности учебных задач им надо решить.

Третий путь предполагает смешанное управление: обучающемуся предлагается наметить ту стратегию обучения, которую он считает наиболее приемлемой. Если при этом обнаруживается «сбой», т.е. обучающийся плохо справляется с учебными заданиями, управление процессом обучения компьютер полностью берет на себя. Таким образом, актуальной является задача создания личностно-ориентированных ТОС, использующих МО и ориентированных на работу с электронным инструктором.

На сегодняшний день даже такой современный АТ, как навигационный тренажер штур-

мана «Рефрен-Н», находящийся в эксплуатации в одном из летных авиационных училищ России и относящийся к числу ТОС и систем «человек – машина» или эргатических комплексов (рис. 8), не учитывает влияние человеческого фактора, в частности в отношении инструктора, отвечающего за обучающие качества АТ.

Исследования показали, что в 10–50% случаев инструктор может не заметить допущенных обучающимися ошибок, а в 15–20% случаев он может сам принимать ошибочные решения в процессе обучения, т.е. при верном решении задачи обучающимся, инструктор трактует его как ошибку [2].



Рис. 8. Состав эргатического комплекса ЛА

Особенность задачи поддержки принятия решения в системе «человек – машина» состоит в том, что человек-оператор по существу является одноканальной системой, т.е. способен одновременно осмысливать и осуществлять только одно управление. При параллельном решении задач у обучающегося возрастает вероятность совершения ошибок, вследствие чего снижается вероятность правильного выполнения задачи $R(\zeta)$. Правильность выполнения задачи можно определить из выражения [8]

$$R(\zeta) = \frac{1 - e^{-\frac{1}{\zeta}}}{1 - \zeta e^{-\frac{1}{\zeta}}}, \quad (1)$$

где ζ – нормированная загруженность оператора летательного аппарата, изменяющаяся от минимальной загруженности ($\zeta = 0$) до максимальной ($\zeta = 1$).

На рис. 9 приведена аналитическая, в соответствии с выражением (1), и экспериментальная зависимости вероятности выполнения оператором задачи от его загруженности [8].

Сравнение аналитической зависимости вероятности выполнения оператором задачи от его загруженности (кривая 1 на рис. 9) с полученной экспериментальной зависимостью (кривая 2 на рис. 9) свидетельствует о том, что увеличение загруженности оператора эргатического комплекса ЛА до 0,5 практически не снижает вероятности правильного решения комплексом своей задачи. Однако приведенная выше формула (1) является параметрической и дает лишь приближенное выражение для плотностей распределений и вероятностей событий.

Погрешности определения эффективности эргатического комплекса в обеспечении безопасности полетов могут оказаться завышенными. Нет уверенности в том, что погрешность вычисления вероятности $R(\zeta)$ с помощью параметрических формул не будет превышать, например, значения 0,01.

Поэтому для достижения более высоких обучающих качеств АТ должен быть снабжен распределенной экспертной системой, выполняющей роль оптимального электронного инструктора. В отличие от традиционных тренажеров, тренажеры с интеллектуальным инструктором содержат знания о предметной области, об обучающемся, о стратегиях обучения и способах его индивидуализации. В результате обеспечивается возможность автоматизации контроля и управления обучением, формированием содержательно-методической базы (сце-

нарии, эталоны пилотирования и т. п.) обучения, а также большей объективности в оценке обученности.

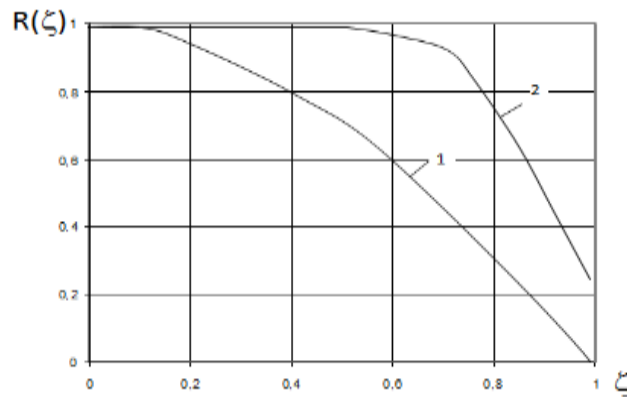


Рис. 9. Аналитическая (1) и экспериментальная (2) зависимости вероятности выполнения оператором задачи от его загруженности

Таким образом, проблема проектирования АТ, снабженного распределенной экспертной системой и выполняющего роль оптимального электронного инструктора, представляет собой комплексную техническую задачу. Обеспечение дидактической эффективности процесса подготовки является междисциплинарной научной проблемой, лежащей на «стыке» педагогики, педагогической, когнитивной и инженерной психологии, эргономики, психофизиологии и информатики.

Подходы к проектированию подобного рода комплексов ранее были сформулированы В.С. Аванесовым, Г.А. Атановым, Ю.И. Журавлевым, А.Н. Змитровичем.

Вопросы когнитивной и инженерной психологии, педагогические подходы в обучении, а также вопросы эргономики изложены в работах Р. Солсо, Ю.А. Стрелкова, В.В. Козарукова, Я.Ю. Ребо, Н.Ф. Талызиной, Л.М. Фридмана, С.Ф. Сергеева.

Психофизиологические аспекты человеко-машинного обучения в эргатических комплексах представлены в работах Г.Ю. Айзенка, Я. Стреляу, В.Д. Небылицина, Е.П. Ильина.

Также необходимо указать, что должное внимание проблеме проектирования АТ уделяли многие видные военные ученые России. Особо следует отметить труды Ю.Ф. Волынца, И.Б. Горбуновой, В.Г. Ефграфова, И.Л. Коршунова, В.И. Куватова, В.Н. Наумова.

Результаты трудов всех названных выше ученых способствовали накоплению, обобщению и систематизации научного знания по данной проблематике, а также позволили авторам статьи выявить ряд фундаментальных противоречий, возникающих при проектировании АТ. Так, противоречия возникают:

1) между высокими квалификационными требованиями к уровню подготовки АС: бортовых операторов, студентов и курсантов аэрокосмических втузов и военных вузов и отсутствием в ОП того или иного учебного заведения адекватных тренажеров;

2) между высокими квалификационными требованиями к уровню подготовки АС и сокращением продолжительности курса обучения, а также снижением количества часов обучения на учебном ЛА;

3) между необходимостью соблюдения принципов индивидуального обучения и ограниченными временными и психофизиологическими возможностями преподавателя (инструктора). Под ограниченными временными возможностями подразумевается невозможность преподавателя в рамках своей дисциплины (на лекциях и/или практических занятиях) уделить одинаковое время каждому слушателю учебной группы курсантов (студентов). Под ограниченными психофизиологическими возможностями понимается односторонняя проводимость вербального канала связи «инструктор – обучающийся»;

4) между ростом технических возможностей тренажеров (имитационные, технические средства) и неизменностью их дидактических возможностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа подходов к разрешению выявленных противоречий целесообразно сформулировать следующие основные положения.

1. Создание автоматизированной системы управления обучением в АТ возможно только при условии формализации всех ее составляющих, в том числе диагностики учебной деятельности и модели обучающегося.

2. Эффективная автоматизированная система управления формированием умений может быть построена только на основе психологической модели обучающегося.

Для подтверждения справедливости приведенных гипотез требуется решить следующие задачи:

– обосновать с последующей разработкой модели и алгоритма адаптивной диагностики деятельность обучающегося;

– разработать модели обучающегося на основе автоматизированных способов оценки результатов его деятельности и характеристик психологических процессов, лежащих в основе формирования профессиональных умений;

– разработать логическую структуру автоматизированной системы управления формированием профессиональных умений и способ оценки ее дидактической эффективности.

Актуальность проведения данных исследований определяется:

1) существованием проблемы обеспечения заданного уровня профессиональной подготовки АС;

2) существованием противоречий между необходимостью выполнения принципов индивидуального обучения и невозможностью реализации этих принципов в реалиях современной системы массового обучения в связи с ограниченными психофизиологическими возможностями обучающегося и инструктора в обработке информации;

3) существованием противоречия между принципиальной возможностью автоматизированного решения задач управления обучением средствами современных информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) и отсутствием эффективного формализованного метода решения задач диагностики деятельности обучающегося, единого подхода и математического аппарата решения.

Предложенная в процессе исследований модель и алгоритм автоматизированной процедуры адаптивной диагностики деятельности обучающегося с учетом его ПФХ позволит в дальнейшем разработать автоматизированную систему управления формированием профессиональных умений при организации дифференциации и индивидуализации ОП.

Достоверность выдвинутых гипотез, положений и выводов будет подтверждена применением апробированных методов исследования в части оценки адекватности и эффективности полученных моделей и алгоритмов, натурным экспериментом в группах студентов втузов и курсантов военных вузов, а также практическим внедрением результатов в учебный процесс.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 57259-2016. Тренажеры авиационные. Термины и определения. – Стандартинформ. – М., 2016.

2. А.А. Бессонов, В.Я. Мамаев, П.П. Парамонов Интеллектуальные обучающие системы: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2016. – 172 с.

3. Григорьев А.П., Бурлуцкий С.Г. Нейросетевая навигационная тренажерно-обучающая

система // Информационно-управляющие системы. – 2017. – Т. 88, № 3. – С. 89–98.

4. Григорьев А.П. Компетентностный подход при подготовке специалистов аэрокосмического профиля // Сборник докладов, посвященный Всемирному Дню авиации и космонавтики: в 3 ч. – СПб.: ГУАП, 2014. – Ч. I: Технические науки. – С. 30–34.

5. Информационно-коммуникационные технологии с элементами психофизиологической диагностики при проектировании адаптивной системы контроля знаний и умений авиационных специалистов / А.П. Григорьев, А.О. Чернелевский, В.С. Егоров и др. // Ученые записки Санкт-Петербургского государственного института психологии и социальной работы. – 2016. – Т. 25, № 1. – С. 128–140.

6. Воздушная навигация и элементы самолетовождения: учеб. пособие / В.Я. Мамаев, А.Н. Синяков, К.К. Петров и др. – СПб., 2002. – 256 с.

7. Красовский А.А. Основы теории авиационных тренажеров. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.

8. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов – теория, методология построения и использования: автореферат дисс. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. – М.: ИПУ, 1999. – 365 с.

В.Л. Гузенко,
кандидат техн. наук, профессор;
А.Б. Пауков,
кандидат военных наук, доцент

ОБОСНОВАНИЕ РОЛИ И ЗНАЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВОЕННОЙ СЛУЖБЫ

В публикации на основании результатов научно-исследовательской работы по проблемам обеспечения безопасности военной службы обоснована необходимость рассматривать информационную безопасность как самостоятельный вид безопасности военной службы.

Ключевые слова: информационная безопасность, защищенность военной службы, безопасность военной службы.

В основном законе нашего государства – Конституции – закреплено положение о том, что высшей ценностью в стране рассматриваются верховенство права и независимости россиянина, а функцией государства – их безусловное признание, неукоснительное выполнение и необходимая защита. Независимость широкомасштабной информации, заключающаяся в возможности доступа к ней и ее продвижения любыми способами, не запрещенными законом, гарантирована основным законом [1].

В настоящее время средства массовой информации (СМИ), коммуникационная и медийная политика относятся к числу важных параметров общегосударственного планирования и управления [2].

В целях актуализации конституционных положений реализуются документы, нацеленные на интеграцию общенациональных интересов и геополитических приоритетов России и гарантированное обеспечение их защиты. К таким документам в особенности относятся Стратегия национальной безопасности и Доктрина информационной безопасности [3, 4].

Согласно указанным правовым документам среди основных опасностей для нашей страны указаны процессы, которые связаны с задействованием информационных и коммуникационных технологий и методик, используемых для продвижения, тиражирования и пропаганды идеологии фашизма, экстремизма, терроризма и сепаратизма, причинения вреда общегражданскому миру, внутривнутриполитической, социокультурной и экономической устойчивости в государстве.

В соответствии с Федеральным законом «О статусе военнослужащих» (п. 2 ст. 27), Уставом внутренней службы Вооруженных Сил Российской Федерации (ст. 75), Положением о Министерстве обороны Российской Федерации (п. 7, пп. 26) одним из направлений деятельности командиров (начальников) является обеспечение безопасности военной службы.

Под обеспечением безопасности военной службы понимается целенаправленная деятельность органов военного управления и воинских должностных лиц по выполнению нормативных правовых актов Российской Федерации и Минобороны России, проведению комплекса мероприятий, поддерживающих условия безопасности военной службы и обеспечивающих на этой основе реализацию прав и законных интересов военнослужащих, членов их семей, а также местного населения [5].

Одним из параметров защищенности страны подразумевается информационная безопасность (ИБ). Поддержка у людей уверенности в своем будущем, гарантированное обеспечение защиты человека государством от различного рода опасностей, связанных с задействованием информационных методик и технологий подразумевает реализацию стратегической

задачи, которая заключается в обеспечении защиты граждан от вредоносной информационной среды [4].

Гарантировать защищенность от негативных информационных вбросов можно целым рядом мероприятий. К таким мероприятиям относятся, в частности, улучшение и развитие правоприменительных документов, в том числе в армии и на флоте.

Регулярно тысячи молодых людей призываются для защиты Отечества, многие граждане государства проходят воинскую службу по контракту. Во всех семьях, где кто-либо из родственников является военнослужащим, члены их семей испытывают постоянное и обоснованное беспокойство за судьбу, прежде всего за жизнь и здоровье, своих близких. Исполняя свой долг, гражданин должен быть убежден в том, что критерий признания и соблюдения общечеловеческих духовных и материальных ценностей, закрепленный Конституцией, ему гарантирован состоянием правового регулирования в государстве. Это также одни из главных факторов роста рейтинга профессии военного человека.

К базовым принципам, обеспечивающим устройство и функционирование военного механизма, относится принцип единоначалия [6]. В соответствии с содержанием правовых актов среди многочисленных направлений ответственности руководителей выделяется регулирование вопросов защищенности каждого военнослужащего и их правовая регламентация [7, 8]. Недостаточно проработанная правовая регламентация является фактором, снижающим эффективность обеспечения защищенности военной службы.

В данной публикации будем называть информационными медиавбросами следующую информацию: использование фактов о чрезвычайных происшествиях, имеющих общественную значимость; негативные публичные заявления; размещение в средствах массовой информации и сети «Интернет» материалов о непрофессиональном, неумелом и недостойном поведении военнослужащих.

Подобные действия сегодня должны рассматриваться как враждебный фактор и угроза боеспособности армии и флота. Угрозой боеспособности являются также такие факты, как: нарушение летательными аппаратами (кораблями) правил полетов (кораблевождения); падение ракет, бомб, снарядов (мин) вне полигонов (специально отведенных территорий); экологические происшествия на военных объектах; гибель группы военнослужащих и связанные с этим масштабные ритуальные мероприятия по захоронению в местах жительства родственников и др.

В нынешних обстоятельствах продвижение необъективной информации негативно отражается как на защите самих военнослужащих, их родных и близких, так и на других людях, проживающих вблизи военных объектов. Такое положение дел определяет смысловое содержание понятия «информационная безопасность», которое в парадигме сегодняшнего дня подлежит рассмотрению как самостоятельный вид безопасности военной деятельности.

Под информационной безопасностью в данном случае предлагается понимать состояние защищенности военнослужащих, членов их семей, других граждан, проживающих в районах расположения воинских частей (размещения военных объектов) или в непосредственной близости от них, от внутренних и внешних информационных угроз.

В перспективный облик системы информационной безопасности (СИБ) (рис. 1), где центральное место занимает деятельность по защите от враждебной, расшатывающей устои армии информации, целесообразно включить:

- военных руководителей, отвечающих за обеспечение ИБ;
- штабы, обеспечивающие согласованность планирования мероприятий по ИБ;
- военно-политические органы, отвечающие за морально-политическое и психологическое состояние личного состава [9];
- органы информационного обеспечения, отвечающие за мониторинг сферы массовой информации, выявление информационных угроз и оперативное реагирование на них в интересах нейтрализации последствий;

– органы службы защиты государственной тайны, отвечающие за организацию мероприятий, направленных на исключение разглашения сведений, составляющих государственную тайну.

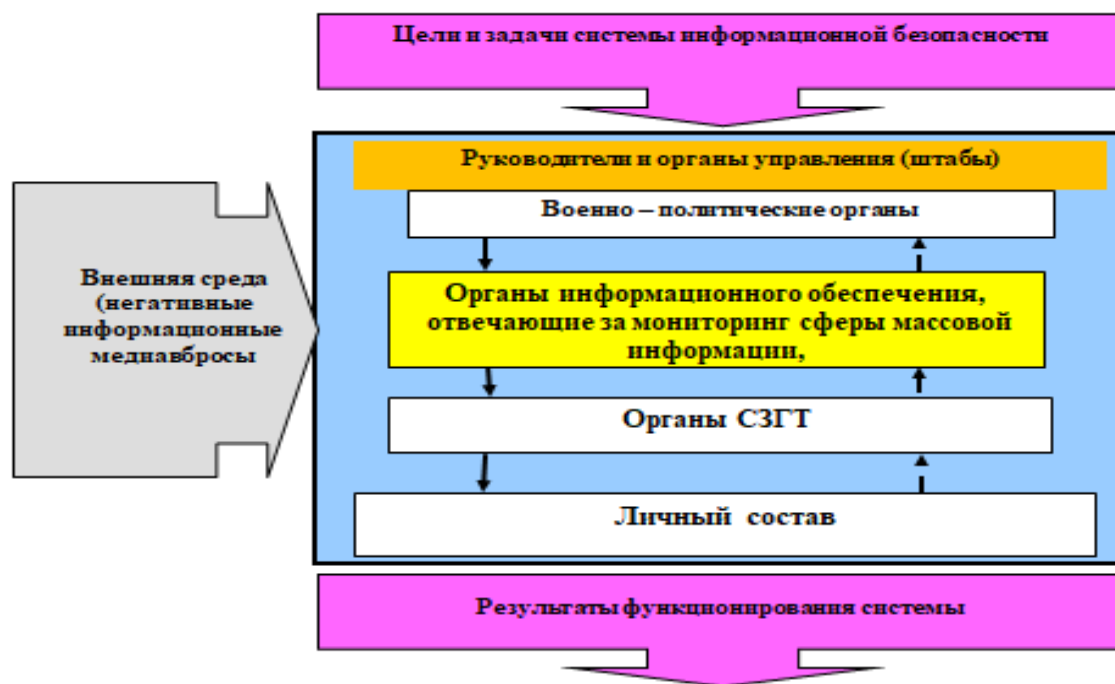


Рис. 1. Система информационной безопасности

Указанная организационно-техническая СИБ должна обладать определенными свойствами, которые позволят ей противостоять внешним факторам, особенно при их экстремальных значениях. Суть главного свойства СИБ заключается в ее способности выполнять свои функции во время и после воздействия на нее определенного негативного внешнего фактора (негативной информации). Указанное свойство будем называть информационной стойкостью (ИС). Надо понимать, что вся негативная информация, оказывающая неблагоприятное влияние на военнослужащих, имеет искусственное происхождение, она специально разработана и вброшена в СМИ и сеть Интернет. В зависимости от продолжительности действия внешние информационные воздействия (информационный вброс) бывают кратковременными и длительно действующими.

Как известно, любое свойство нуждается в его оценивании. Оценивание устойчивости ИС к воздействию внешних факторов появления негативной информации необходимо для решения двух задач:

- 1) определения уровня ИС и способности существующей СИБ противостоять действию тех или иных информационных медиабросов;
- 2) выработки организационных требований к ИС вновь создаваемых организационных структур.

Для оценивания устойчивости ИС СИБ к воздействию негативной информации вполне пригодным является детерминистический метод. Данный метод может использоваться в относительно спокойный период мирного времени, когда возможно создать математическую модель СИБ, которая будет описывать преобразование известного внешнего негативного информационного воздействия в искомую реакцию системы. Сущность детерминистического метода оценки ИС состоит в использовании моделей «информационный фактор (вброс) – СИБ (объект) – реакция СИБ», когда известны функциональные связи между фактором и объектом, а также математическая модель самого объекта (системы).

Внешнее информационное воздействие возможно описать функциональными зависимостями следующего вида:

– для кратковременного информационного медиавброса

$$X_i^M = f(q, R, k); \quad (1)$$

– для длительного информационного медиавброса

$$X_i^D = f[q, C(x, y), k, t], \quad (2)$$

где X_i^D – параметр i -го кратковременного (длительного) информационного воздействия;

q – мощность (объем) информационного медиавброса;

R – расстояние от источника вброса до объекта воздействия;

k – коэффициент, учитывающий взаимодействие с предыдущими медиавбросами;

$C(x, y)$ – показатель скорости изменения параметра информационного воздействия во времени в точке размещения объекта с координатами x, y ;

t – время действия информационного медиавброса.

Реакции СИБ на воздействие негативного фактора определяются в соответствии с моделью системы в виде

$$\{Y_i\} = H\{X_i\}, \quad (3)$$

где Y_i – параметр реакции (выходной параметр) СИБ на действие i -го фактора;

$\{\}$ – символ множества;

H – оператор СИБ.

С помощью оператора H , характеризующего структуру и свойства СИБ, каждой реализации внешнего воздействия в виде информационного медиавброса ставится в соответствие реализация реакции системы.

На основании исследования модели СИБ устанавливаются условия стойкости ко всем негативным информационным медиавбросам:

$$a \leq Y(X_i^{M(D)}) \leq b, \quad X_i^{M(D)} = X_{идоп}^{M(D)}, \quad (4)$$

где a, b – допуски на выходной параметр СИБ;

$X_{идоп}^{M(D)}$ – допустимые показатели или параметрические показатели стойкости СИБ при воздействии i -го кратковременного (длительного) информационного воздействия.

Следовательно, (параметрический) показатель стойкости СИБ представляет собой значение воздействующего негативного информационного медиавброса, при котором ни одна из характеристик системы, определяющих защиту военнослужащих, не выходит за установленные пределы.

Для длительных информационных воздействий условие стойкости часто определяется или задается в виде

$$\tau(X_i^D) < \tau_{доп}(X_{идоп}^D), \quad (5)$$

где τ – время воздействия i -й длительной (постоянной) негативной информации;

$\tau_{доп}$ – допустимое время пребывания СИБ в пространстве действия i -го длительного информационного медиавброса.

Экспериментально параметрические показатели стойкости СИБ должны определяться при проведении учений войск (сил) на ИС. В результате статистической обработки данных, которые могут быть получены в ходе учений, получают статистические средние или оценки математического ожидания параметрических показателей ИС, значения которых должны приводиться в руководящих документах.

Над проблемой защищенности службы в армии, в том числе и в рамках ИБ, в последние десятилетия работа ведется постоянно, с системных позиций, в различных форматах, оттачиваясь от разных точек зрения по данному вопросу. В том числе это делается и в русле перспективной программы социального развития армии и флота, в частности задачи, обозначенной как №4 в работе [10].

Для решения подобных задач проводятся исследовательские работы. Так, например, в процессе недавней НИР «Служба 2016» выполнен комплексный теоретико-правовой анализ юридических актов, всесторонне регламентирующих деятельность в сфере создания и поддержания необходимых условий безопасности. На его основе разработаны предложения по уточнению положений некоторых документов. Изменения в перспективную структуру системы правовых актов по созданию безопасных условий службы, с учетом требований к СИБ, представлены на рис. 2.



Рис. 2. Предложения к дополнению нормативных правовых актов в сфере обеспечения информационной безопасности

Заметим, что целесообразность внесения поправок в документы может быть обусловлена разнообразными причинами, например: изменением ситуации в конкретный момент времени; появлением новейших понятий в законодательстве; реформой и внедрением новых алгоритмов в управлении и т.п. Вопросы включения в юридические акты инновационных улучшений нашли отображение в нормативной базе, посвященной законотворчеству, проработке и составлению правовых документов [11].

Осознание необходимости кардинальных изменений в понятии «информационная защищенность (безопасность) как самостоятельный вид безопасности военной службы» продиктовано сопутствующими обстоятельствами:

- изменились взгляды и подходы к определению сути понятий в области безопасности в целом;
- появилось значительное количество юридических актов в сфере безопасности военной службы, где формулировки понятий не совпадают с содержанием положений документов более высокого уровня иерархии;
- изменились (возросли) требования к защитникам Отечества со стороны общества, населения;
- выросла негативная реакция на моменты травматизма и смерти военнослужащих в мирное время не только со стороны общественности, медиасферы, но и со стороны надзорных органов;
- наши армия и флот стали более открыты и доступны для общественных структур, прессы, родственников и родителей военнослужащих.

Предлагаемые обновления будут способствовать тому, что, с одной стороны, любые несоблюдения требований в сфере безопасности станут известными и виновные понесут установленную законом ответственность, а с другой – любые попытки негативного информационного воздействия на военнослужащих будут пресечены.

К документам, в которых положение об информационной безопасности как самостоятельном виде безопасности военной службы должно быть ясно и четко сформулировано, можно отнести:

- Закон «Об обеспечении безопасности военной службы», настоятельная необходимость разработки и принятия которого, становится всё более очевидной;
- Устав внутренней службы, в его новой редакции (в особенности гл. 7);
- Наставление по безопасности военной службы, которое позволит упорядочить терминологическую сторону вопроса, обеспечить правовое регулирование, обязанности и права в направлении развития и улучшения механизма поддержания защищенности службы;
- Новые рекомендации (инструкции) и памятки для различных категорий личного состава.

Таким образом, реализация изложенных в публикации предложений позволит повысить эффективность процесса обеспечения безопасности военной службы как одного из направлений повседневной деятельности войск.

Список используемых источников

1. Конституция Российской Федерации: официальный текст с историко-правовым комментарием. – М.: Издательство НОРМА, 2006. – 123 с.
2. Организация информационного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации: учеб. пособие / под ред. Р.Х. Цаликова, Н.А. Панкова, И.Е. Конашенкова. – М.: РИЦ Министерства обороны Российской Федерации, 2018. – 392 с.
3. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 года № 683. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_docAW191669/ (дата обращения: 22.11.2019).
4. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 года № 646. – URL: <https://base.garant.ru/182535/> (дата обращения: 22.11.2019).
5. Об утверждении Руководства по обеспечению безопасности военной службы в Вооруженных Силах Российской Федерации: Приказ Министра обороны Российской Федерации от 22 июня 2015 года № 444. – URL: <https://base.garant.ru/71207130/> (дата обращения: 15.10.2019).
6. О статусе военнослужащих: федеральный закон от 27 мая 1998 г. № 76-ФЗ. – URL: <https://base.garant.ru/178792/722cadefc6a7898629c318a529d6eb5f/> (дата обращения: 15.10.2019).
7. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации. – М.: Эксмо, 2018.

8. Положение о Министерстве обороны Российской Федерации. Утверждено Указом Президента РФ от 16.08.2004 № 1082 (ред. от 02.08.2019). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_48879/ (дата обращения: 22.11.2019).

9. Об организации военно-политической работы в Вооруженных Силах Российской Федерации: Приказ Министра обороны Российской Федерации от 22 июля 2019 года № 404. – URL: <https://base.garant.ru/71207130/> (дата обращения: 15.10.2019).

10. Стратегия социального развития Вооруженных Сил Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена решением Коллегии Министерства обороны Российской Федерации от 28 марта 2008 г. – URL: http://old.redstar.ru/2008/04/18_04/4_01.html (дата обращения: 23.11.2019).

11. Методические рекомендации по юридическому оформлению законопроектов. – М.: Государственная Дума, 2003. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_88240/ (дата обращения: 23.11.2019).

А.В. Ерофеев,
кандидат военных наук, доцент;
В.О. Кацик,
кандидат техн. наук, доцент;
Л.В. Покидов,
кандидат военных наук

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВНЕДРЕНИЮ КОМПЬЮТЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТАКТИКО- СПЕЦИАЛЬНОМ УЧЕНИИ С КУРСАНТАМИ ВЫПУСКНЫХ КУРСОВ АКАДЕМИИ

В публикации рассмотрены предложения по внедрению на тактико-специальном учении с курсантами выпускных курсов компьютерной информационной технологии на базе локальной вычислительной сети учебных командных пунктов академии.

Ключевые слова: тактико-специальное учение, группа боевого управления, законы управления войсками, принятие решения, компьютерные информационные технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Тактико-специальное учение (ТСУ) как форма практического обучения войск, применяемая для обучения курсантов, представляет по своему содержанию процесс, в ходе которого отрабатывается динамическая взаимосвязь комплекса тактических и специальных дисциплин, изученных курсантами за период обучения в академии. Оно формирует у обучающихся способность профессионально действовать в сложных ситуациях и принимать решения, адекватные сложившейся обстановке.

Проведение ТСУ в академии имеет свои особенности. Они обусловлены отсутствием у курсантов войскового опыта участия в такой форме обучения, меньшими, по сравнению с войсковыми, возможностями учебно-материальной базы, а также условностью исполнения должности в составе органа управления воинской частью или в составе боевого расчета подразделения. В связи с этим возникает необходимость применения современных образовательных технологий, способных компенсировать указанные особенности. Наиболее перспективными из них являются компьютерные информационные технологии.

Под компьютерной информационной технологией понимается процесс, в котором используется совокупность методов и средств, предназначенных для сбора, обработки информации, используемой в дальнейшем для управления деятельностью подразделений воинской части [4]. Вместе с тем в образовательной сфере по тактико-специальной подготовке курсантов применение компьютерных информационных технологий на практических занятиях и ТСУ разработано недостаточно.

Целью данной публикации является разработка предложений по применению на ТСУ группой боевого управления (ГБУ) учебного отдельного командно-измерительного комплекса (окик) компьютерных средств, способствующих формированию у курсантов профессиональных навыков, повышению оперативности и качества принимаемых решений по управлению подразделениями воинской части в сложных условиях обстановки.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГРУППОЙ БОЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ УЧЕБНОГО ОКИК НА ТАКТИКО-СПЕЦИАЛЬНОМ УЧЕНИИ

Тактико-специальное учение проводится с курсантами на завершающем этапе обучения в академии. Весь привлекаемый на учение состав курсантов согласно замыслу распределяется по учебным формированиям. Обучающиеся исполняют обязанности должностных лиц в соответствии с замыслом учения [1]. Среди формирований важную образовательную роль играет ГБУ учебного оик, являющаяся основным органом управления воинской частью в сложных условиях обстановки.

С момента приведения оик в высшие степени боевой готовности (ВСБГ) ГБУ занимает боевые посты на командном пункте (КП) и приступает к выполнению задач управления воинской частью. В ее состав назначаются 10–20 курсантов-операторов, специализирующихся по различным направлениям деятельности оик при выполнении задачи по предназначению. Для контроля действий операторов ГБУ и оказания им помощи при решении учебных вводных назначаются 1–2 посредника-преподавателя. Замыслом ТСУ и «Планом наращивания обстановки», как правило, предусматривается отработка операторами ГБУ следующих учебных тактических ситуаций (задач), составляющих модель их действий:

- занятие исходного положения на КП согласно тактическому заданию на ТСУ и уяснение выводов из учебной тактической обстановки;
- получение из учебного Главного центра (ГЦ) приказов (распоряжений) на подготовку и проведение сеансов управления космическими аппаратами, а также изменений в оперативно-тактической обстановке, задаваемой руководством ТСУ;
- принятие решений при выходе из строя по различным причинам отдельных средств наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) КА;
- проведение плановых и дополнительных сеансов управления КА;
- выполнение задач управления КА при воздействии преднамеренных и непреднамеренных помех на радиотехнические системы (РТС) и средства радиосвязи;
- выполнение задач управления КА в условиях воздействия условного противника различными средствами поражения.

Группа боевого управления, подготавливая решения по данным тактическим ситуациям в сложных условиях обстановки, должна учитывать действия законов управления войсками, таких как [2]:

- закон соответствия потребного (T_n) и располагаемого (T_p) времени при решении задач управления КА и всестороннего обеспечения (должно выполняться условие $T_n \leq T_p$);
- закон зависимости эффективности управления от объема и достоверности используемой информации в процессе принятия решения.

Для модели процесса действий ГБУ располагаемое время задается замыслом ТСУ и «Планом наращивания обстановки».

Необходимая для принятия решения информация выбирается обучающимися традиционно из выдаваемых преподавателем учебников, учебных пособий и других дидактических материалов. Степень практического выполнения требований этих законов операторами ГБУ в ходе ТСУ может служить критерием оценки эффективности их деятельности.

Учитывая данное обстоятельство, а также с целью показа преимуществ компьютерных информационных технологий целесообразно рассмотреть более детально процесс действий оператора ГБУ при решении тактической задачи традиционным аналитическим способом. Этот способ предусматривает проведение анализа значительного объема информации, направленной на всестороннюю оценку обстановки и подготовку предложений начальнику ГБУ, а также на разработку боевых документов по управлению подразделениями оик. При этом каждому оператору необходимо действовать в определенной логической последова-

тельности (в соответствии с алгоритмом), приводящей к успешному решению тактической задачи.

Например, в ситуации воздействия радиопомех на РТС управления КА в момент начала предсеансной подготовки к проведению планового очередного сеанса управления КА оператор ГБУ по оценке радиоэлектронной обстановки должен придерживаться следующего алгоритма действий:

- уточнить направление нахождения источника помехи, нанести его на карту, доложить начальнику ГБУ, сделать запись в журнал несения дежурства;
- определить через начальника боевого расчета радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и начальников боевых расчетов средств НАКУ характеристики помех и степень их влияния на работу радиотехнических систем управления КА и средств радиосвязи;
- уточнить степень совпадения направлений по азимуту и углу места воздействия помехи по отношению к зоне радиовидимости КА согласно «Плану применения средств НАКУ» на текущие сутки;
- определить возможные способы устранения преднамеренных или непреднамеренных помех;
- представить начальнику ГБУ предложения по устранению помех средствами НАКУ с указанием привлекаемых для этого сил и средств;
- подготовить по установленной форме доклад в Главный центр о помехах и их влиянии на проведение плановых сеансов управления КА;
- подготовить (при необходимости) проект боевого распоряжения командира части на устранение помех.

Перечисленные действия необходимо выполнить в течение установленного для предсеансной подготовки времени (не более 1 ч), к началу сеанса управления очередным КА.

В рассматриваемой ситуации оператор по оценке радиоэлектронной обстановки, с целью получения более полной информации, взаимодействует с командиром дежурных сил (КДС) оик, оперативным дежурным КП оик, начальником боевого расчета РЭБ, начальниками боевых расчетов радиотехнических систем и средств связи. В ходе взаимодействия уточняется информация об электромагнитной совместимости с соседями, о возможных действиях противника, о силах, средствах, способах устранения помехи. Поиск и обработка информации должна осуществляться оперативно, так как время подготовки и проведения сеансов управления жестко регламентировано «Планом применения средств НАКУ», продолжительностью предсеансной подготовки и зоны радиовидимости КА, заданных замыслом ТСУ.

Многолетний опыт проведения ТСУ с курсантами показывает, что обучающиеся, не имеющие достаточных навыков действий в подобных ситуациях, затрачивают на решение аналогичных вводных значительно больше времени, чем определено «Планом наращивания обстановки на ТСУ». Кроме того, представленные ими решения часто не отличаются глубокой информационной проработкой тактических ситуаций. Указанные положения приводят к тому, что продолжительность принятия решений обучающимися и их качество часто не соответствуют требованиям приведенных выше законов управления войсками. Основными причинами такого результата действий обучающихся на ТСУ являются:

- длительный поиск в различных учебных пособиях справочной информации для решения заданной тактической задачи;
- ограниченный набор в учебных пособиях примерных образцов справочной информации для различных тактических ситуаций с целью использования ее в разрабатываемых решениях;
- недостаточный практический опыт действий обучающихся в сложных условиях обстановки при ограниченных временных ресурсах;
- необходимость добывания информации опосредованно через других должностных лиц, затраты времени на ее проверку и письменную регистрацию.

Указанные причины снижают возможности органов управления оик по своевременному приему и доведению до подразделений решений на выполнение боевых задач в сложных условиях обстановки. Чтобы сформировать у обучающихся способность управлять подразделениями при любых изменениях обстановки, необходимо на ТСУ создать условия, которые позволят каждому оператору ГБУ оперативно получать в достаточном объеме в любое время различную справочную информацию, а также различные варианты ее использования в принимаемых решениях. Выполнить данные условия возможно с применением компьютерной информационной технологии, реализуемой путем создания на КП оик в интересах ГБУ локальной вычислительной сети (ЛВС).

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА КОМАНДНОМ ПУНКТЕ УЧЕБНОГО ОИК

Основные цели использования компьютерной информационной технологии на ТСУ:

- оказание помощи обучающимся в исполнении должностных обязанностей и принятии решений, адекватных заданной на учении обстановке в располагаемое время;
- предоставление возможности руководству и посредникам оценивать действия обучающихся, оказывать на них управляющее воздействие.

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) предназначена для предоставления информационных и вычислительных ресурсов подключенным к ней пользователям [5]. ЛВС в общем случае может быть представлена на КП оик сервером, персональными компьютерами операторов ГБУ и боевого расчета КП (пользователей).

Сервер – это компьютер, подключенный к сети и обеспечивающий ее определенными информационными услугами. В нем хранится различная информация, осуществляется управление этой информацией (ресурсами).

Пользователь ЛВС делает запросы на сервер для выполнения различных процедур, чтения файлов, поиска информации в базе данных и т.п. Сервер выполняет запрос пользователя и передает ему запрошенную информацию.

В интересах работы ГБУ оик и посредников на ТСУ предлагается обеспечить программный комплекс ЛВС возможностью выполнения таких операций (задач), как:

- поиск справочной информации с целью оценки тактической обстановки и принятия решения на выполнение задач подразделениями оик в сложившейся ситуации;
- выбор обучающимися при необходимости примерных вариантов решений вводной для заданных условий обстановки;
- наглядная имитация на мониторе компьютера выполнения операций управления КА при проведении сеанса (контроль выдачи разовых команд (РК) и временных программ (ВП) на борт КА, получение квитанций о их прохождении, контроль приема телеметрии и т.д.);
- возможность контроля посредником-преподавателем результатов информационных действий и решений по каждому обучающемуся с целью использования этой информации для выставления итоговой оценки за действия на ТСУ;
- контроль посредником временных затрат при решении вводных обучающимися;
- хранение в электронном виде разработанных обучающимися на ТСУ документов по управлению подразделениями оик;
- регистрация всей входящей в оик и исходящей в Главный центр информации с привязкой к оперативному времени.

Данные информационные задачи могут быть выполнены при наличии разработанного программного обеспечения для компьютерной ЛВС, позволяющей обучающимся и посредникам получать в любое время необходимую справочную и другую информацию.

В качестве исходных данных для разработки программы компьютерной ЛВС предлагается использовать перечисленные ниже блоки информации.

1. Общая и частная обстановка согласно замыслу ТСУ.
2. Рекомендуемая последовательность действий операторов ГБУ в ситуациях, задаваемых вводными «Плана наращивания обстановки на ТСУ» (приведение в ВСГБ, воздействие условного противника, отказы техники и вооружения и т.п.).
3. Варианты возможной тактики действий обозначаемого на ТСУ противника и характеристика его средств вооружения.
4. Задачи омик по управлению КА на разыгрываемые интервалы оперативного времени в соответствии с «Планами применения средств НАКУ».
5. Порядок подготовки и проведения сеансов управления КА стационарными и мобильными средствами НАКУ.
6. Учебная укомплектованность подразделений омик личным составом, средствами НАКУ, материальными средствами на технической позиции и в полевом районе.
7. Силы и средства, планируемые для применения с целью защиты от действий условного противника.
8. Организация взаимодействия с соседями в районе расположения омик.
9. Формы и примерные образцы документов по управлению подразделениями и поддержанию боевой готовности омик.
10. Варианты решений вводных для наиболее сложных тактических ситуаций.

Очень важно при разработке замысла ТСУ и «Плана наращивания обстановки» учитывать возможности программного обеспечения локальной вычислительной сети и на этой основе определять содержание вводных, выдаваемых операторам ГБУ.

Кроме того, необходимо также учитывать функциональные возможности ЛВС, ее уровень, вариант построения. Данные вопросы выходят за пределы цели, поставленной в статье, зависят от материально-технической базы, обеспечения учебного процесса в академии и требуют отдельного исследования.

Алгоритмы работы с программным обеспечением, применяемым операторами ГБУ, формируются на основе информации, введенной в ЛВС согласно замыслу на ТСУ. Фактически при подготовке замысла ТСУ осуществляется компьютерное моделирование управления подразделениями омик в сложных условиях обстановки.

Достоинствами использования компьютерных информационных технологий на ТСУ в интересах формирования у курсантов профессиональных компетенций являются:

- самостоятельность исполнения обязанностей обучающимися на модели, задаваемой тактической обстановкой;
- возможность создания обстановки с любой степенью сложности и напряженности;
- возможность контроля действий со стороны посредников (текущего и итогового);
- сокращение количества привлекаемых посредников.

Несмотря на положительные стороны, использование компьютерных информационных технологий может снизить возможность приобретения обучающимися речевой командирской практики, диалогового общения, формирования четких докладов и задач подчиненным [3]. Устранение данного недостатка должно осуществляться планированием в замысле ТСУ оперативных пауз. На них необходимо предусматривать заслушивание решений обучающихся с полным анализом обстановки и следующими из анализа выводами, демонстрацией рабочей карты и графических материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной статье обоснована необходимость внедрения компьютерных информационных технологий на ТСУ с курсантами выпускных курсов. Данные технологии способствуют повышению оперативности и качества решений, принимаемых составом учебной ГБУ оик, а также формированию у курсантов профессиональных навыков по управлению подразделениями и боевыми расчетами.

С целью практической реализации процесса внедрения компьютерных технологий на ТСУ предложено создать на КП учебного оик локальную вычислительную сеть. Для нее в статье определены:

- требования к информационной возможности программно-вычислительного комплекса;
- состав исходных блоков информации для разработки программного обеспечения;
- указания на зависимость формирования замысла ТСУ от возможностей ЛВС по моделированию тактических ситуаций.

Изложенные в статье предложения прошли частичную проверку на практических занятиях по дисциплине «Тактика сил запуска и управления КА» при подготовке к ТСУ. Результаты этих занятий показали целесообразность внедрения компьютерных информационных технологий в процесс проведения ТСУ, что соответствует достижению цели, заявленной в статье.

Список используемых источников

1. О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»: Приказ Минобрнауки России от 15 сентября 2014 г. № 670. – URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/70791866/paragraph/1:0> (дата обращения: 01.11.2019).
2. Военный энциклопедический словарь. – М.: Издательский дом «ОНИКС», 2002.
3. *Митрофанов К.Г., Зайцева О.В.* Применение инновационных компьютерных технологий в сфере образования: основные аспекты и тенденции // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2009. – Вып. 10(88). – С. 64–68.
4. *Степанов А.П., Новиков А.Н.* Организация подготовки личного состава общевойсковых соединений и воинских частей на основе применения современных информационных технологий. – Омск: Омский филиал военной академии МТО, 2012.
5. *Новиков Ю.В., Кондратенко С.В.* Основы локальных сетей. – М.: Интернет-университет информационных технологий, 2005.
6. Методологические основы планирования деятельности военной образовательной организации в условиях внедрения электронной информационно-образовательной среды / И.Ю. Воронков, М.А. Голубев, Л.В. Мержвинская и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 393–400.

В.Я. Пророк,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Тимофеев;
Ш.И. Шаймухаметов

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОФЕССИОНАЛЬНО ВАЖНЫМ КАЧЕСТВАМ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования по использованию методики проведения профессиографического анализа деятельности военных специалистов радиолокационных станций дальнего обнаружения (РЛС ДО) на основе нечеткого корреляционного анализа профессионально важных качеств, компетенций и функциональных задач, возникающих в ходе выполнения служебных обязанностей.

Ключевые слова: профессиография, корреляционный анализ, нечеткие множества.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на вооружение поступают сложнейшие военно-технические системы, эффективность функционирования которых во многом определяется качеством подготовки обслуживающего их личного состава. В связи с этим возрастает практическая необходимость в применении специальных технологий и разработке новых методик для изучения человека, выполняющего поставленные перед ним задачи в процессе его служебной деятельности. Наиболее распространенным способом анализа профессиональной деятельности военного специалиста является проведение профессиографических исследований.

После определения набора профессионально важных качеств, компетенций и функциональных задач военного специалиста встает вопрос о их выражении в количественно-качественной мере. Данную оценку сложно произвести, используя правила классической математики или применяя систему баллов, так как рассматриваемые показатели относятся к слабо формализуемым, а значит, имеет место неопределенность. Как известно, при наличии неопределенности или неоднозначности эффективным является математический аппарат нечетких множеств.

ПРОФЕССИОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Одним из основных методов оценки профессиональной деятельности человека на сегодняшний день является профессиографический анализ.

Приведем определения базовых понятий, которые будут использоваться в дальнейшем.

Профессиография – описание и квалификация профессий по различным критериям и признакам.

Профессиограмма – описательно-технологическая характеристика различных видов профессиональной деятельности, сделанная по определенной схеме и для решения определенных задач [1].

Достижение поставленных перед специалистом целей напрямую зависит от того, насколько он готов к выполнению поставленных перед ним задач. Для оценки успешности могут использоваться различные факторы, определяемые для каждой профессии в отдельности. В случае с военнослужащими можно считать подобным критерием безошибочность и своевременность действий при выполнении служебных и специальных обязанностей и задач.

Список профессионально важных качеств возникает в результате анализа соответствия уровня профессиональной успешности какому-либо индивидуальному свойству. В этом случае о нем можно говорить как о способности.

Считается, что любое свойство личности будет являться способностью в том случае, если оно связано с успешным выполнением какой-либо деятельности. Результативная и успешная деятельность, а также приобретенный опыт формируют совокупность свойств индивидуума. Именно от них и будет зависеть и индивидуальность личности в применении тех или иных приемов и способов выполнения задачи, степень успешности ее выполнения, а также способность к преодолению противодействующих условий и неблагоприятных факторов, оказывающих влияние на достижение положительного результата.

При определении факторов, отвечающих за предпосылку успешности рассматриваемой деятельности, нужно оценивать не просто сумму или набор необходимых свойств. Следует говорить о вполне определенном функциональном составе, который характеризуется сочетанием эмоционально-волевых, сенсомоторных, логических и многих других элементов, которые в различных видах деятельности будут своеобразно и неравномерно развиваться, образуя тем самым определенную структуру отработанных действий и способностей. Эти умозаключения приводят к необходимости использования деятельностного подхода, который используется при составлении профессиограмм.

Исходя из этого можно говорить о предназначении профессиограмм, которые составляются в парадигме деятельностного подхода. Если брать во внимание, что в большинстве случаев подготовка специалиста производится под руководством наставника или преподавателя, то следует говорить о необходимости точного руководства процессом профессионального образования того или иного специалиста. Также следует помнить о том, что обучение должно быть направлено на освоение только тех функций, которые будут в дальнейшем применяться на практике, а значит, центры подготовки обязаны конкретизировать свою работу и направления изучаемого материала. Грамотно и верно составленная профессиограмма окажет помощь преподавателям и наставникам в определении слабых и сильных сторон обучающихся, а также позволит сделать выводы о том, какие элементы образовательной программы следует включить или изменить, на каких сделать особый акцент, что будет являться достаточным условием для саморазвития специалиста [2].

Перед проведением исследования необходимо задать показатели, которые будут оцениваться экспертной группой в рамках профессиографического исследования, этими показателями будут являться профессионально важные качества (ПВК), компетенции и функциональные задачи, выполняемые военными специалистами. В рамках статьи рассматриваются только крупные логические блоки всего набора качеств (рис. 1), а в примере приводится расчет взаимосвязей отдельных показателей, которые относятся к одному из данных блоков.

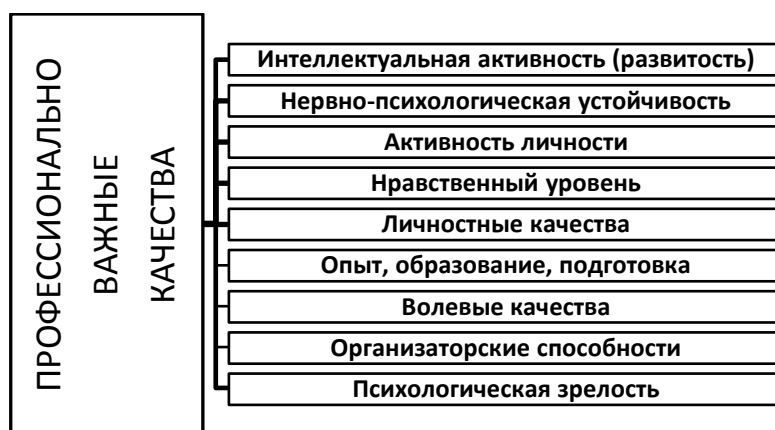


Рис. 1. Группы профессионально важных качеств

Говоря о характеристиках деятельности военного специалиста, стоит отразить также и такое понятие, как компетенция, под которой понимается интегральная характеристика, описывающая качество поведения человека в определенной деятельности. Как правило, это некая идеальная модель поведенческих проявлений, позволяющая специалисту достигать результата, быть эффективным в этом виде деятельности. Поведенческая деятельность может быть обусловлена многими факторами, основные из которых и формируют общее понимание термина «компетенция» (рис. 2):

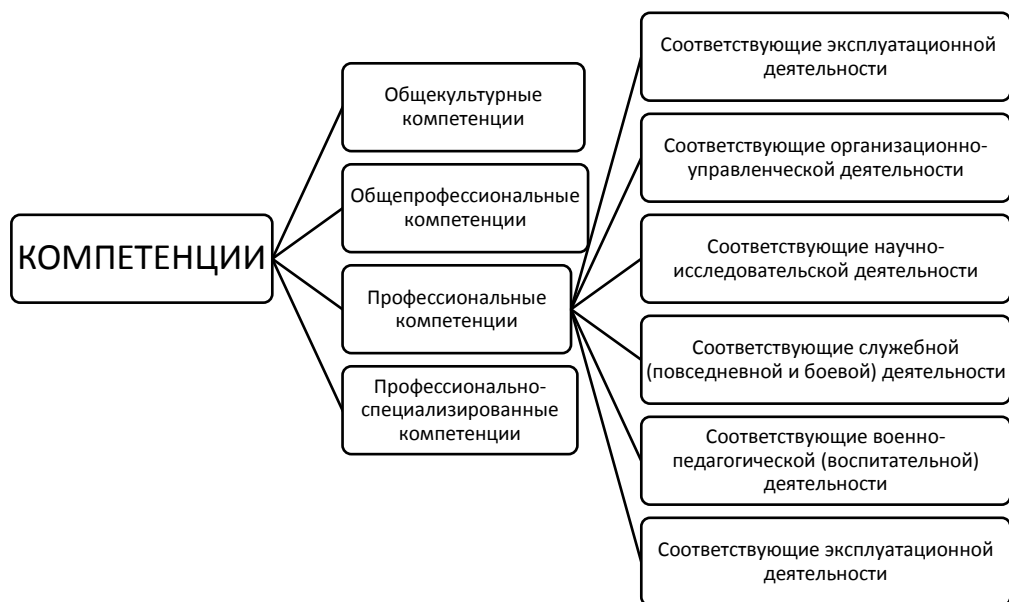


Рис. 2. Группы компетенций

После определения качеств и компетенций специалиста следует обозначить функциональные задачи, с которыми придется столкнуться военному специалисту в процессе своей профессиональной деятельности, и условия их выполнения. Их также можно разделить на несколько логических групп (рис. 3):

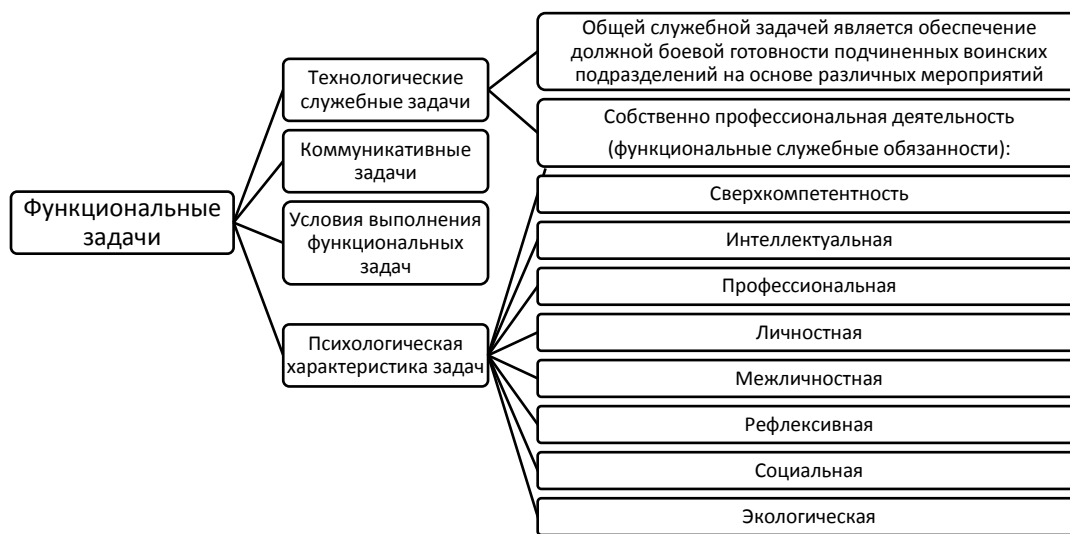


Рис. 3. Группы функциональных задач

Следующим этапом будет сбор статистической информации. Под этим этапом будет подразумеваться процесс получения от экспертной группы сведений по профессионально важным качествам, компетенциям и качеству выполнения функциональных задач у заданной группы военнослужащих.

Такую оценку сложно произвести, используя теорию вероятности или применяя систему баллов, так как данные показатели относятся к слабо формализуемым, а значит, имеет место неопределенность. Для определения значений показателей, которые поступают на вход системы профессиографического анализа, возникает необходимость использования приближенных рассуждений человека для дальнейшего их использования при проведении расчетов. Это становится возможным в случае применения нечетких лингвистических переменных [5]: двух лингвистических переменных, соответствующих уровню развития у военного специалиста ПВК, компетенций, и одной переменной, определяющей качество выполнения им функциональных задач. Степень выраженности каждой переменной будет определяться такими понятиями, как: «низкий», «ниже среднего», «средний», «выше среднего» и «высокий». Областью определений для каждой переменной будет являться интервал от 1 до 10. Данные условия, на основании которых формируется первоначальная обучающая выборка, предоставляются экспертам (табл. 1)

Таблица 1

Исходные данные терм-множеств

Область определения	Низкий	Ниже среднего	Средний	Выше среднего	Высокий
1	1	0	0	0	0
2	0,8	0,2	0	0	0
3	0,1	0,8	0,1	0	0
4	0,05	0,8	0,15	0	0
5	0	0,2	0,8	0	0
6	0	0	0,8	0,2	0
7	0	0	0,15	0,8	0,05
8	0	0	0,1	0,8	0,1
9	0	0	0	0,2	0,8
10	0	0	0	0	1

Терм-множество в нашем случае будет характеризоваться функциями принадлежности, которые рассчитываются с помощью алгоритма нечеткой классификации [4, 6]. Данный алгоритм является численным алгоритмом нахождения оптимальных разделяющих поверхностей между множеством объектов из обучающей выборки и состоит из двух основных шагов. На первом шаге рассчитываются центры классов V_i классификационной шкалы:

$$V_i^s = \frac{\sum_{x \in X} (\mu_i^s(x))^2 \cdot x}{\sum_{x \in X} (\mu_i^s(x))^2}, \quad \text{если } \mu_i^s(x) \neq 0, \quad (1)$$

$$V_i^s = 0, \forall x \in X, \text{ если } \mu_i^s(x) = 0,$$

где s – номер итерации;
 x – значение переменной.

На втором шаге рассчитываются значения функции принадлежности:

а) если $x \in X_L$, то

$$\mu_i^s = \begin{cases} 1, & \text{при } i = 1; \\ 0, & \text{при } i \neq 1; \end{cases}$$

б) если $x \in X_K$, то

$$\mu_i^s = \begin{cases} 1, & \text{при } i = X_K; \\ 0, & \text{при } i \neq X_K; \end{cases}$$

в) если $x \in X_M$, то

$$\mu_i^s(x) = \frac{1/\|x - V_i\|^2 \cdot \sum_{i=1}^K \mu_i(x)}{\sum_{j=1}^K (1/\|x - V_j\|^2)} \text{ при } x \neq V_1; x \neq V_K; 1 < i < K, \quad (2)$$

где $X_L = \{x \in X \mid x < V_1\}$;

$X_K = \{x \in X \mid x > V_K\}$;

$X_M = \{x \in X \mid V_1 \leq x \leq V_K\}$;

V_1, V_K – центры первого и последнего классов классификационной шкалы;

$\mu_i(x)$ – функция принадлежности объекта, оцениваемого параметром x , i -му классу $x \in X$;

V_i – центр i -го класса.

Оба шага выполняются до тех пор, пока разница полученных значений центров классов для заданной обучающей выборки не будет удовлетворять условию

$$|V_{i\alpha}^s - V_{i\alpha}^{s-1}|^2 \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где ε – минимально допустимое различие значений центров классов, полученных на двух последовательных итерациях.

Результатами работы алгоритма являются значения центров классов термов лингвистических переменных, а также функции принадлежности объектов обучающей выборки к найденным классам.

Результаты расчета центров классов классификационной шкалы для каждой лингвистической переменной представлены в табл. 2, соответствующие им функции принадлежности изображены ниже, на рис 4.

Таблица 2

Результаты расчета центров классов

Низкий	Ниже среднего	Средний	Выше среднего	Высокий
1,45	3,48	5,5	7,52	9,55

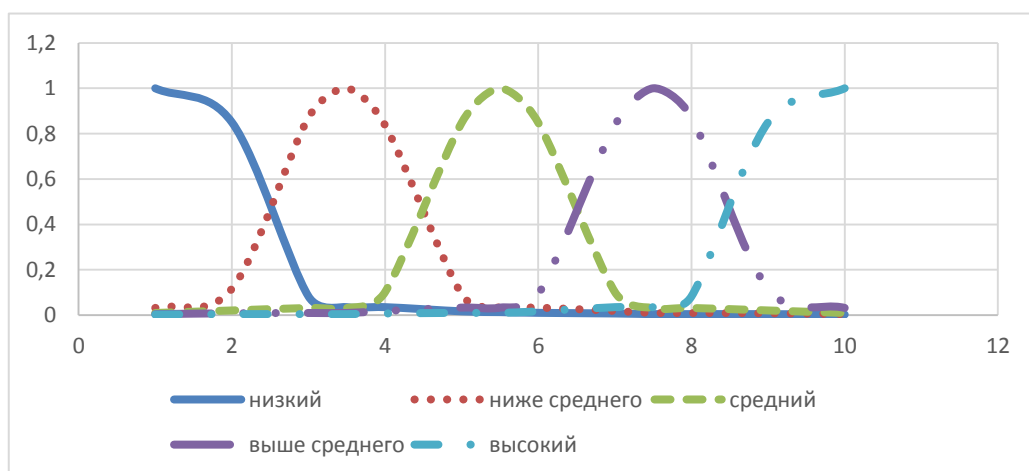


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистических переменных

Нахождение центров классов и расчет функций принадлежности термов нечетких лингвистических переменных позволяет представить значения термов: «низкий», «ниже среднего», «средний», «выше среднего» и «высокий» в виде нечеткого множества (табл. 3). В данной таблице в первой строке каждой логической переменной указано значение, а во второй – соответствующая этому значению функция принадлежности.

Таблица 3

Значения центров классов и соответствующих им функций принадлежности

Низкий (Н)				
1,000	1,250	1,454	2,000	3,000
1,000	1,000	1,000	0,850	0,083
Ниже среднего (НС)				
2,000	3,000	3,477	4,000	5,000
0,116	0,871	1,000	0,837	0,091
Средний (С)				
4,000	5,000	5,500	6,000	7,000
0,102	0,848	1,000	0,848	0,102
Выше среднего (ВС)				
6,000	7,000	7,523	8,000	9,000
0,091	0,837	1,000	0,871	0,116
Высокий (В)				
8,000	9,000	9,546	9,750	10,000
0,083	0,850	1,000	1,000	1,000

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Полученную статистическую информацию об уровне развития ПВК и компетенций, а также успешность выполнения функциональных задач военными специалистами заносим в две таблицы. Первая будет отображать данные, собранные экспертами по профессионально важным качествам и компетенциям, а вторая представляет качественную оценку выполнения ранее определенных функциональных задач теми же военнослужащими. Для выявления зависимости между набором ПВК, компетенций и успешностью выполнения функциональных задач целесообразно использовать поиск корреляционной связи, которая будет показывать согласованное изменение двух признаков и наглядно отражать факт изменчивости одного признака в соответствии с изменчивостью другого. В качестве оценки коэффициента корреляции будем использовать коэффициент корреляции r Браве – Пирсона, который в рассматриваемом случае применять наиболее рационально. Коэффициент корреляции определяет силу связи между рассматриваемыми характеристиками. Коэффициент корреляции Браве – Пирсона r_{xy} вычисляется по формуле

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

Решение рассматриваемой задачи подразумевает использование данных, выраженных в виде нечетких множеств, что заставляет применять математический аппарат арифметических операций с данными множествами [7].

1. Сложение нечетких чисел A_1 и A_2 обозначается как

$$A_1 + A_2 \stackrel{\text{def}}{=} B; \quad (5)$$

значение функции принадлежности результата сложения (5) определяется следующим выражением:

$$\mu_B(y) = \sup_{\substack{x_1, x_2 \\ y = x_1 + x_2}} \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2)). \quad (6)$$

2. Вычитание двух нечетких чисел A_1 и A_2 обозначается следующим образом:

$$A_1(-)A_2 \stackrel{\text{def}}{=} B, \quad (7)$$

причем функция принадлежности разности (7) задается выражением в следующем виде:

$$\mu_B(y) = \sup_{\substack{x_1, x_2 \\ y = x_1 - x_2}} \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2)). \quad (8)$$

3. Произведение нечетких чисел A_1 и A_2 обозначается как

$$A_1 * A_2 \stackrel{\text{def}}{=} B; \quad (9)$$

значение функции принадлежности произведения (9) определяется следующим выражением:

$$\mu_B(y) = \sup_{\substack{x_1, x_2 \\ y = x_1 * x_2}} \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2)). \quad (10)$$

4. Деление нечетких чисел A_1 и A_2 определяется как

$$A_1(:)A_2 \stackrel{\text{def}}{=} B; \quad (11)$$

значение функции принадлежности частного (7) задается в следующем виде:

$$\mu_B(y) = \sup_{\substack{x_1, x_2 \\ y = x_1 : x_2}} \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2)). \quad (12)$$

В качестве примера вычисления силы корреляционной связи рассчитаем отношение между профессионально важным качеством «способность к аналитическому мышлению» и функциональной задачей «выполнение текущего планирования».

Для получения четкого значения коэффициента корреляции необходимо произвести процедуру дефазсификации числителя и знаменателя в формуле (4) по следующему правилу:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^k U_i * \mu_A(U_i)}{\sum_{i=1}^k \mu_A(U_i)}. \quad (13)$$

Следовательно, в числителе будем иметь выражение

$$\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{-870,29 * 0,08 + 7,44 * 0,84 + 285,18 * 1 + 601,66 * 0,84 + 1702,09 * 0,08}{0,08 + 0,84 + 1 + 0,84 + 0,08} = 304,23,$$

а в знаменателе –

$$\begin{aligned} & \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 * \sum (y_i - \bar{y})^2} = \\ & = \sqrt{\frac{-1090182,27 * 0,08 + 16491,32 * 0,84 + 135990,21 * 1 + 261080,61 * 0,84 + 3295170,54 * 0,08}{0,08 + 0,84 + 1 + 0,84 + 0,08}} = \\ & = 440,52. \end{aligned}$$

Затем производим деление и получаем окончательное значение коэффициента корреляции $r = 304,23 / 440,52 = 0,69$, что соответствует среднему уровню корреляционной связи. Далее подобным образом производится расчет взаимосвязи между остальными профессионально важными качествами и компетенциями и соответствующими функциональными задачами.

В качестве наглядного изображения корреляционной зависимости между различными профессионально важными качествами, компетенциями и функциональными задачами при-

ведем несколько диаграмм. На рис. 5 изображена диаграмма значений корреляции ПВК «нетерпимость к любому нарушению закона в собственной профессиональной деятельности» и функциональной задачи «обеспечение должной боевой готовности подчиненных воинских подразделений» на основе различных мероприятий (правового характера – 1; организационно-управленческих – 2; экономических – 3; финансово-денежных – 4; материально-технических – 5; социально-бытовых – 6; природоохранных – 7) и связь этого же ПВК с необходимостью использовать в своей служебной деятельности различные способы взаимодействия с подчиненными (прямая передача устного распоряжения – 1; использование современных средств связи – 2; передачи информации носит односторонний характер – 3; прием-передача информации – 4; обмен информацией в результате делового общения – 5).

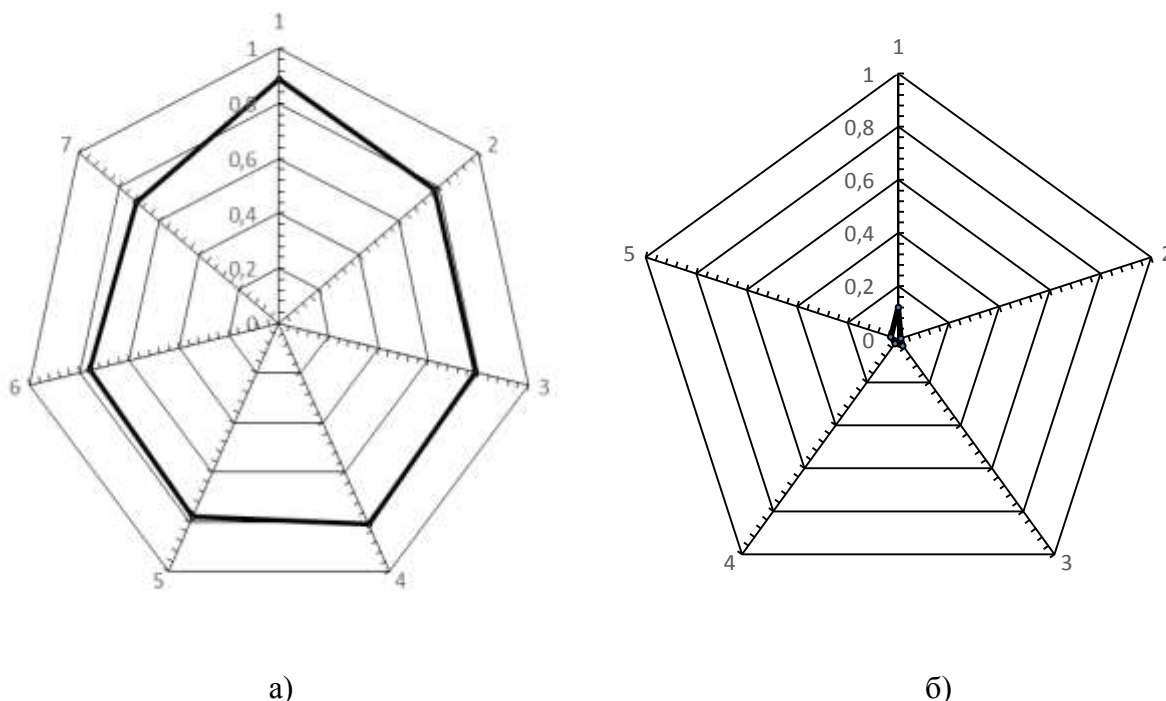
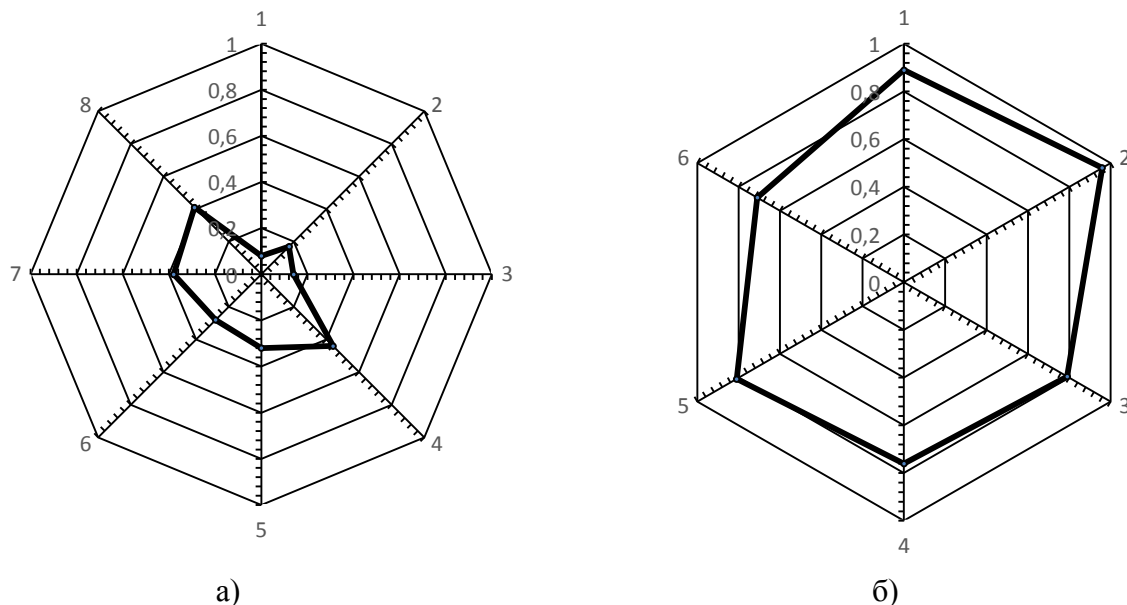


Рис. 5. Диаграммы корреляции ПВК «нетерпимость к любому нарушению закона» и обеспечению должной боевой готовности на основе различных мероприятий (а); решение коммуникативных задач (б)

Подобным образом можно построить диаграммы зависимости, выделяя отношение конкретной функциональной задачи к группам профессионально важных качеств и компетенций. На рис. 6 изображена зависимость функциональной задачи «планирование текущее» и группы компетенций «общекультурные компетенции» (способность действовать в соответствии с Конституцией Российской Федерации – 1; способность осуществлять научный анализ социально значимых явлений и процессов – 2; способность понимать движущие силы и закономерности исторического и социального процессов – 3; способность к логическому мышлению – 4; способность к деловой коммуникации – 5; способность аргументированно и логично выстраивать свою речь на родном языке – 6; способность применять законодательные акты в профессиональной деятельности – 7; способность к физическому самосовершенствованию – 8) и затем с одной из подгрупп профессиональных компетенций – «организационно-управленческая деятельность» (способность управлять коллективом и принимать управленческие решения – 1; способность разрабатывать и реализовывать планы работы коллективов – 2; способность организовывать эксплуатацию автоматизированных систем специального назначения – 3; способность находить рациональные организационно-

технические решения – 4; способностью разрабатывать предложения по обеспечению информационной безопасности – 5; способность обеспечивать природоохранную деятельность – 6).



а) б)
 Рис. 6. Диаграммы корреляции функциональной задачи «планирование текущее» и группы компетенций:
 а – общекультурные компетенции; б – соответствующие организационно-управленческой деятельности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате вычисления корреляционной связи между профессионально-важными качествами, компетенциями и функциональными задачами удалось собрать данные, которые позволяют дать их количественную оценку и открывают возможность перейти к следующему этапу анализа требований к военным специалистам РЛС ДО – определению интегрального уровня готовности военного специалиста к выполнению своих задач по предназначению и, как следствие, к возможности определения наиболее рационального плана по повышению профессиональной подготовки военных специалистов в максимально короткие сроки в условиях динамически изменяющейся обстановки.

Список используемых источников

1. Горбунова М.В., Кирилюк Е.В. 333 современные профессии и специальности. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. – С. 71–75.
2. В. Жильцов Техника составления профессиограммы. – М.: Литературный совет, 2017 – С. 64–77.
3. Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – С. 68–71.
4. Багрецов С.А., Львов В.М., Колганов С.К. Диагностика и прогнозирование функциональных состояний операторов в деятельности // Вопросы проектирования и применения. – М.: Радио и связь, 2000.

5. *Львов В.М., Рахманова Т.Р., Сударик А.Н.* Методический подход к решению проблемы профессиографического описания управленческих воинских должностей // Проблемы психологии и эргономики. – 2004. – №1. – С. 14–18.

6. *Пророк В.Я.* Построение систем сопровождения процессов профессионального становления и деятельности военных специалистов – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского (филиал), 2004. – 154 с.

7. *Заде Л.А.* Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе: Классификация и кластер. – М.: Мир, 1986.

Н.А. Репях,
кандидат философских наук, доцент;
А.Н. Хрустова

ЦЕННОСТНОЕ ОТНОШЕНИЕ В АРХИТЕКТОНИКЕ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Публикация посвящена вопросу ценностного отношения к педагогической деятельности в военном вузе. Акцентируется внимание на ценностном отношении, являющемся в современных условиях своеобразным индикатором готовности к профессиональной деятельности преподавателя.

Ключевые слова: педагогическая деятельность, архитектуроника, ценностное отношение, мотивационно-целевой компонент, содержательно-процессуальный компонент, эмоционально-нравственный компонент, мотивация, направленность, ценности педагогической деятельности.

Ценностная проблематика привлекает в последние годы всё большее внимание не только философов, культурологов, но и людей других профессий, в том числе педагогов. И этому есть немало причин. Одной из главных среди них выступает детерминированность педагогической деятельности уровнем нравственной и профессиональной зрелости преподавателя, богатством и целостностью его внутреннего мира. Ценностное отношение к преподавательской деятельности у педагога выступает духовным стержнем профессиональной направленности. Оно находит свое выражение в понимании и оценке целей и задач педагогической деятельности, удовлетворенности ее результатами, ориентации на личное и профессиональное самосовершенствование, в признании особой ценности субъектно-субъектных отношений, осознании значимости психолого-педагогических знаний.

На современном этапе развития высшего образования новое звучание приобрела проблема формирования ценностного отношения преподавателей к педагогической деятельности. В военных учебных заведениях связано это прежде всего с изменениями, происходящими в Вооруженных силах Российской Федерации, и всевозрастающими требованиями к повышению качества подготовки преподавателей в вузах Министерства обороны. Они должны не только обладать полным набором качеств педагога высшей школы, но и иметь ярко выраженную мотивацию к выполнению своих профессиональных обязанностей. Поэтому в процессе подготовки преподавателей формированию ценностных отношений к педагогической деятельности надо уделять особое внимание.

Учитывая дискуссионный характер проблемы природы ценностей, ценностных отношений, авторы считают целесообразным сформулировать свои философские представления о природе ценностей, формировании ценностных отношений и ценностных суждений, которые будут определять и методологический инструментарий исследования заявленной темы.

Требуется пояснения обоснованность включения авторами статьи в понятийный аппарат термина «архитектоника», который чаще используется в искусстве, графике, архитектуре и т.д. Буквально с греческого (от «архи» – главный и «тектос» – строитель) он означает «основное устройство», а в широком смысле слова – это основа всего, что нас окружает.

В онтологическом плане понятие «архитектоника» (композиция, построение единого целого, соразмерность элементов и их сочетание в единое целое) органично соединяет части, компоненты предметов, явлений, обеспечивая их единство, целостность. Целостность композиций необходима не только для музыки, живописи, литературы, кино и т.д. Без нее невозможно творчество в любом виде деятельности, в том числе педагогической.

В методологическом ключе архитектуроника может быть использована в качестве инструмента социального познания. Такой подход к проблеме ценностных отношений позволяет

глубже понять их природу, место и роль в педагогической деятельности преподавателя высшей школы, противоречия и проблемы формирования.

Ценности в жизни человека реализуются посредством ориентации в деятельности на самостоятельно принятые им значимости, идеалы и нормы. Тогда ценностью выступает для человека то, что именно для него желаемо, значимо, то, чего он хочет и к чему устремлен.

Устанавливается ценность в процессе оценки, которая выступает единством оценочного отношения (эмоционально-процессуальный аспект) и оценочного суждения (рационально-логическая форма результата). При этом оценочное отношение осуществляется человеком через сопоставление объективных свойств предмета, явления с собственными потребностями. Результат оценочного отношения оформляется в оценочном суждении.

Следует отметить, что оценочные суждения отличаются от ценности тем, что первые порождаются субъектно-объектными и межсубъектными отношениями, а ценности являются субъективным образом объективного мира и формируются субъектно-объектными отношениями. Иными словами, ценность всегда объективна, а оценка субъективна.

Таким образом, при всей кажущейся субъективности основой ценностных суждений выступают свойства объектов и сформировавшаяся в конкретном обществе система экономических, политических, духовных и социальных отношений. Общественные отношения как основа социализации и выступают фундаментом формирования потребностей, интересов, целей, идеалов личности.

Личное и общественное выстраиваются в ценностях посредством предпочтения. Личное предпочтительнее, если не вступает в противоречие с социальной средой, а гармонично «вписывается» в нее. Впрочем, само формирование ценностного отношения не может идти иначе как через социализацию, процесс воспитания. По сути дела, воспитание и следует рассматривать прежде всего как формирование системы ценностей человека. В конечном итоге именно жизненная практика является источником ценностных отношений, формирует и корректирует их.

Однако формирование ценностных отношений не ограничивается только воспитанием. Оно сопровождается и самовоспитанием, роль которого значительно возрастает с приобретением личностью собственного жизненного опыта и знаний. Причем рефлексирование порой вступает в противоречие, а то и конфликт с существующей в обществе системой ценностей, традициями, обычаями и т. д.

Ценностное отношение имеет определенное содержание и форму его проявления. Содержательная сторона представляет собой осмысляющее отношение субъекта к объекту, что выражается определенной системой ценностей или мировоззрением. Иногда содержание ценностного отношения называют оценивающим осмыслением. Формами же, в которых данное духовное содержание обретает психическую реальность, являются элементы ее эмоционально-психологической структуры.

Как интегральный результат ценностного отношения человека к миру мировоззрение включает в себя мироощущение и миропонимание. Первое представляет собой эмоционально-психологическую сторону мировоззрения на уровне эмоций, чувств, настроений. Это эмоциональный мир человека. Миропониманием представлена познавательно-интеллектуальная сторона мировоззрения.

Зарождаясь в обыденно-практическом сознании, ценностное отношение становится для человека жизненным ориентиром. Это возможно потому, что заключенная в ценностном отношении оценка всегда содержательна. Притом отношение может быть как положительным, так и отрицательным. Однако бывают случаи отсутствия ценностного отношения к чему-либо. Такая ситуация может возникнуть в связи с незнанием объективных реалий, которые могли бы стать ценностными ориентирами, или в связи с тем, что данные моменты объективной реальности не вызывают у конкретного человека никакого эмоционального отношения, а следовательно, ценностной ориентации. Последнее ярко представлено в известном эпиграфе к произведению Б. Ясенского «Заговор равнодушных»: «Не бойся врагов, в худшем

случае они могут тебя убить, не бойся друзей, в худшем случае они могут тебя предать; бойся равнодушных, они не убивают и не предают, но только с их молчаливого согласия существуют на земле предательство и убийство».

Существует три феномена мира ценностей, формируемых человеческой деятельностью: мир людей, мир вещей и мир идей.

Первой (и основной) ценностью выступает сам человек. Здесь особо важна оценка других людей – родных, друзей, сослуживцев, коллег и т. д., а также самооценка – себя как личности, своего места и роли в жизни общества и т.д.

Второй феномен мира ценностей – вещи или природные явления, процессы (производимые человеком, приобретаемые, используемые им и т.д.). Это мир материальной культуры, создаваемый людьми для удовлетворения своих потребностей. Субъективным основанием ценностного отношения к миру вещей является познание объективных законов мира и его влияния на человека, на духовный мир личности.

Духовные ценности (мир идей) содержат ценности моральные и эстетические. Основными вопросами моральных ценностей выступают смысл жизни, долг, свобода и ответственность, природа счастья и справедливости, соотношение добра и зла, любви и ненависти и т.д.

В настоящее время значительное число педагогических работников военных учебных заведений составляют преподаватели, прошедшие обучение в адъюнктуре в рамках основной профессиональной образовательной программы высшего образования или получившие квалификацию в результате освоения дополнительной профессиональной программы профессиональной переподготовки военных специалистов для выполнения нового вида профессиональной деятельности в сфере педагогики высшей школы. Получение соответствующей квалификации свидетельствует о том, что преподаватель не только имеет право ведения преподавательской деятельности, но и предполагает наличие у него способности и готовности к этой деятельности. Однако, как показывает практика, часто присвоение квалификации не означает готовности, действительной способности и стремления преподавателя к педагогической деятельности, что, несомненно, значительно снижает ее успешность. В связи с этим приобретает большое значение качество подготовленности к педагогической деятельности данной категории преподавателей.

Е.М. Иванова в своем научном труде «Основы психологического изучения профессиональной деятельности» говорит, что «...объяснение поведения субъекта труда в профессиональной деятельности требует знания закономерности и тенденций формирования и изменения его профессиональной направленности и определяющих ее факторов: интересов, мотивов, ценностных отношений, личных установок, воли и т.п...» [1].

В педагогической деятельности, как отмечал А.С. Макаренко, «мы имеем дело всегда с отношением... Именно отношение составляет истинный объект нашей педагогической работы» [2], а ценностное отношение к этой деятельности является центральным звеном в сложном синтезе структур [3], составляющем профессиональную готовность преподавателей.

Под ценностным отношением к педагогической деятельности военного преподавателя следует понимать внутреннее убеждение педагога, которое опирается на осознание представлений, смысла воинского долга и офицерской чести, их значимости [4]. Это отношение проявляется в убеждениях и взглядах, эмоциональных переживаниях, действиях, которые направлены на передачу обучающимся знаний, навыков и умений, формирование компетенций, совершенствование личностных качеств.

Ценностное отношение несет в себе определенное смысловое и эмоциональное наполнение, инициирует направленность и активность действий педагога, поскольку в нем скрыты внутренние источники воли и мотивации, нравственного и профессионального развития личности преподавателя.

По сути, ценностное отношение преподавателя военного вуза является своеобразным параметром, показателем его профессиональной готовности к педагогической деятельности.

Оно проявляется как сложная система на субъективном уровне, соединяя мотивационно-целевой, содержательно-процессуальный и эмоционально-нравственный компоненты.

В системе ценностного отношения к педагогической деятельности преподавателей главными элементами являются ценности-цели, ценности-знания, ценности-навыки, ценности-умения, ценности-убеждения и ценности-взгляды. Так, ценности-цели на репродуктивном и продуктивном уровне обеспечивают системность и комплексность в организации содержательной части образовательной среды. Они объединяются в мотивационно-целевой компонент «ядра» личности преподавателя, психолого-педагогические установки, определяют методы, формы и средства в достижении целей образования. Ценности-знания, ценности-навыки и ценности-умения объединяются в единый блок ценностей качества обучения и определяют направленность личности педагога, тесно связаны с содержательно-процессуальным компонентом «ядра» личности. Ценности-взгляды и ценности-убеждения относятся к лидирующему виду ценностно-значимой деятельности (например, понимание верности Отечеству и готовности к его защите) и характеризуются стремлением к нравственным и эмоциональным проявлениям.

Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» определяет государственную политику в области образования, которая основывается на приоритете общечеловеческих ценностей [5]. Ценности педагогической деятельности имеют гуманистическую природу и сущность. Гуманистические же параметры выступают «вечными» ориентирами, позволяют фиксировать расхождение между идеалом и действительностью, стимулируют к творческому преодолению этих расхождений, побуждают к самосовершенствованию и обуславливают самоопределение преподавателя.

Взяв за основу характерные потребности личности и соотнеся их с профессией преподавателя, ее социальным смыслом, ряд авторов отмечает соответствующие ценности педагогической деятельности [6]:

– ценности, относящиеся к утверждению положения в обществе, профессиональной среде (общественная значимость деятельности преподавателя, престиж педагогической деятельности, ее признание и др.);

– ценности, связанные с удовлетворением потребности в общении (постоянное общение с обучающимися, возможность общения с коллегами, обмен духовными ценностями и др.);

– ценности, связанные с саморазвитием (занятие любимым делом, постоянное самосовершенствование, возможность постоянно пополнять свои знания, приобщение к культуре и др.);

– ценности, связанные с самореализацией (вариативный, творческий характер деятельности преподавателя, соответствие деятельности преподавателя его способностям и интересам, увлекательность педагогической деятельности и др.);

– ценности, связанные с прагматическими потребностями (возможности профессионального роста, самоутверждения и др.).

Особенно следует подчеркнуть, что ценностное отношение к педагогической деятельности представляет многоуровневый, достаточно сложный смысловой компонент, который сигнализирует об усвоении преподавателем аксиологических норм, обеспечивающих способность к особому восприятию социальных процессов, рефлексии, непрерывно формирующейся и развивающейся личности педагога, обеспечивающих относительно устойчивую направленность его потребностей, интересов и поведения, определяющих жизненную позицию, мнение о долге, чести и ответственности в избранной профессии. Это отношение проявляется во взглядах и убеждениях, эмоциональных переживаниях, стремлениях к действию и в самих последовательных действиях.

Опыт показывает, что педагогическая деятельность часто вызывает определенный интерес у молодых преподавателей, прежде всего с точки зрения получения материальных преимуществ. Другими словами, привлекает она не профессиональными побуждениями, а совершенно иными мотивами. В соответствии с этими мотивами формируется целеполагание педагогической деятельности, в значительной степени расходящееся с целями педагогов-

профессионалов. Данное положение отражается на результативности деятельности преподавателя во всех сферах подготовки обучающихся, приводя в конечном итоге к ее снижению.

Исследование, проведенное авторами статьи в ходе реализации программ подготовки и переподготовки научно-педагогических кадров в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, позволяет сделать вывод, что в настоящее время у значительной части молодых преподавателей складывается достаточно противоречивое отношение к педагогической деятельности. Это обстоятельство представляет особый интерес, поскольку показывает недостаточную ориентацию на педагогическую деятельность, а соответственно, и на ценностное отношение к данной деятельности. Данный факт, безусловно, негативно сказывается на качестве образовательного процесса, а также на уровне морально-психологического состояния в военных учебных заведениях.

Авторы в течение 2017–2019 годов проанализировали ориентацию на педагогическую деятельность слушателей, обучавшихся по программе профессиональной переподготовки военных специалистов для выполнения нового вида профессиональной деятельности в сфере педагогики высшей школы. Так, важными показателями ориентации на педагогическую деятельность являлись оценка желания осуществлять педагогическую деятельность, интереса к педагогической деятельности, самооценка способности стать преподавателем, уверенности в успешном осуществлении педагогической деятельности и желание стать отличным педагогом.

Полученные данные показали, что у молодых преподавателей недостаточно высока ориентация на педагогическую деятельность. Слушатели полагают, что они смогут успешно преподавать, поэтому особенно высоко оценили собственную уверенность в осуществлении педагогической деятельности (48,3%). Вместе с тем желание стать отличным педагогом как один из существенных показателей оценен несколько ниже (36,1%).

Наиболее актуальным было выяснение мнения о желании слушателей осуществлять педагогическую деятельность. Следует отметить, что этот показатель, к сожалению, оказался наиболее низким (18,1%), так же как и интерес к педагогической деятельности, который составил всего лишь 11,4%.

Изменить такое отношение молодых преподавателей при их подготовке к педагогической деятельности, как считают авторы статьи, может акцентирование внимания на определенных факторах, позволяющих добиться формирования необходимого ценностного отношения. Такими факторами могут служить и уровень мотивации, и наличие профессионально-значимых качеств, которые обуславливают склонность к педагогической деятельности. Важными факторами являются привлекательность профессии педагога как с эмоциональной стороны и со стороны творческого самовыражения, так и с точки зрения карьерного роста, уровня материального благополучия и др.

В современных условиях необходимо обратить большее внимание на формирование психологической готовности к профессиональной деятельности, как глубоко специфической, требующей ценностного отношения, и в целом совершенствовать психолого-педагогическую подготовку преподавателей. Это позволит удовлетворить потребность военных учебных заведений не только в компетентных, но и в мотивированных на педагогическую деятельность преподавателях. Таким образом, ценностное отношение является обязательным условием профессиональной готовности преподавателя к педагогической деятельности.

Список используемых источников

1. *Иванова Е.М.* Основы психологического изучения профессиональной деятельности: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 207 с.
2. *Макаренко А.С.* Сочинения. – М., 1985. – Т. V. – 558 с.

3. *Ершова Е.М.* Проблема воспитания ценностного отношения к профессиональной деятельности у студентов педвуза. – URL: http://shgpi.edu.ru/files/nauka/vestnik/2016/4_32/5. (дата обращения: 23.02.2019).

4. *Савич И.И.* Формирование ценностного отношения курсантов военно-учебных заведений к педагогической деятельности офицера: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата педагогических наук: 13.00.08 / Савич Игорь Иванович; Урал. гос. пед. ун-т. – Екатеринбург, 2006. – 23 с. – URL: <http://elar.uspu.ru/handle/uspu/179> (дата обращения: 23.02.2019).

5. Об образовании в Российской Федерации: федеральный закон. – Москва: Проспект, 2013. – 160 с.

6. *Сластенин В.А., Исаев И.Ф., Шиянов Е.Н.* Педагогика: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / под ред. В.А. Сластенина. – 11-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 608 с.

Н.Н. Гусев,
доктор техн. наук, профессор;
А.О. Кучеренко

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО СПОСОБА ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ИМПУЛЬСА В ФОРМЕ ПОЛУСИНУСОИДЫ

Речь идет о совершенствовании импульсного способа возбуждения колебаний струн струнных преобразователей. В публикации рассмотрены общие принципы построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния на основе применения струнных преобразователей. Описаны применяемые в настоящее время способы возбуждения колебаний струн струнных преобразователей. Приведены решения волновых уравнений для возбуждения колебаний струн одиночными импульсами силы прямоугольной и трапецеидальной формы во времени, а также бесконечной серией импульсов трапецеидальной формы во времени. Указаны недостатки приведенных форм импульсов возбуждения и описаны пути устранения недостатков. На основе общего решения волнового уравнения колебаний струны решено волновое уравнение для амплитуды колебаний струны, возбуждаемой импульсом силы в форме полусинусоиды во времени. Определен момент времени для возбуждения очередного импульса силы, и решено волновое уравнение для определения амплитуды колебаний струны, возбужденной бесконечной серией импульсов силы в форме полусинусоиды во времени. На основании полученных результатов в статье предложено усовершенствовать вторичную аппаратуру для возбуждения колебаний струн струнных преобразователей.

Ключевые слова: струнный преобразователь, устройство для возбуждения колебаний струны, свободные колебания, импульс «запроса», гармоника, амплитуда колебаний, сдвиг фазы.

ВВЕДЕНИЕ

Общие принципы построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния на основе применения струнных преобразователей освещаются в научно-технической литературе с середины 50-х годов [1–4]. Обзор указанной литературы показывает, что комплекс средств, обеспечивающих измерение и регистрацию динамических величин с помощью струнных преобразователей, должен включать в себя следующие компоненты:

- струнные преобразователи;
- устройства для возбуждения колебаний струны;
- устройства усиления, преобразования, измерения и регистрации выходных сигналов струнных преобразователей;
- кабельную сеть;
- устройства математической обработки результатов измерения.

Среди струнных преобразователей в практике контроля напряженно-деформированного состояния как специальных сооружений Министерства обороны, так и гидротехнических сооружений наибольшее распространение получили струнные преобразователи с электромагнитным импульсным способом возбуждения колебаний струны [1–6], отличающиеся значительными сроками службы (более 10 лет).

Известные в настоящее время устройства для возбуждения колебаний струн струнных преобразователей способны вызвать колебания струн в трех режимах: вынужденных колебаний, автоколебаний и свободных колебаний [2, 5, 6].

В устройствах, реализующих режим вынужденных колебаний, струнный преобразователь питается переменным током от внешнего генератора, частота которого регулируется таким образом, чтобы обеспечить явление резонанса – получить максимальную скорость изменения амплитуды колебаний. Этот способ возбуждения колебаний струны применяется в настоя-

щее время только в процессе сборки струнных преобразователей, так как при определении частоты струны в режиме вынужденных колебаний возникает эффект «затягивания» [5].

В устройствах, реализующих режим автоколебаний, струнный преобразователь включается в автоколебательный контур. Самовозбуждение таких замкнутых систем происходит в том случае, когда выполняется условие баланса амплитуд (произведение коэффициента усиления усилителя на коэффициент передачи цепи обратной связи больше единицы) и условие баланса фаз (суммарный фазовый сдвиг всех звеньев равен нулю или целому числу периодов) [5]. К их основным недостаткам относятся: технические трудности, связанные с обеспечением режима автоколебаний при наличии в струнном преобразователе только одной электромагнитной катушки возбуждения [2]; возможность возникновения эффекта затягивания частоты [5].

Наибольшее же распространение получили устройства, реализующие режим свободных колебаний – колебания струны возбуждаются импульсами «запроса», поступающими от генератора импульсов. Причем амплитуда, длительность и период следования импульсов принимают постоянные значения ($F=\text{const}$, $\tau_u=\text{const}$, $T_0=\text{const}$) [1], и, как показали исследования А.П. Северова, гармонический состав пространственной формы колебаний струны в таком случае не оказывает существенного влияния на точность определения значений измеряемой физической величины, имеющей статический характер.

В случае измерения и регистрации динамических процессов гармонический состав пространственной формы колебаний струны начинает существенно влиять на точность измерения периода колебания струны, а следовательно, физической величины и ее динамической составляющей.

В данной публикации описано совершенствование импульсного способа возбуждения струнных преобразователей в целях повышения помехоустойчивости, непрерывности и точности измерения.

АНАЛИЗ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ СТРУНЫ, ВОЗБУЖДЕННОЙ ИМПУЛЬСАМИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ

При импульсном способе возбуждения колебаний струн импульсы могут иметь самые различные формы: прямоугольную, трапецеидальную, экспоненциальную, синусоидальную и др. [7]. Однако современные технические средства способны возбуждать колебания струны только импульсом силы прямоугольной формы, выражение для амплитуды колебания струны во времени которого известно [6] и имеет следующий вид:

$$y(x, t) = \frac{2}{\pi \times \varepsilon \cdot c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin K_n \cdot x_0 \cdot \sin K_n \cdot x \cdot \frac{2F}{\omega_n} \cdot \exp \left[-\varepsilon_n \left(t - \frac{t_1 - t_2}{2} \right) \right] \cdot \sin \left[\omega_n \left(t - \frac{t_1 - t_2}{2} \right) \right] \times \sin \frac{\omega_n \cdot \tau_{1/2}}{2}, \quad (1)$$

- где (x, t) – скорость распространения поперечной волны по струне;
 c – плоскость, в которой происходят колебания струны;
 ω_n – круговая частота n -й гармоники;
 K_n – волновое число n -й гармоники;
 t – текущий момент времени;
 x_0 – точка приложения импульса силы $F(x, t)$;
 F – амплитуда силы (рис. 1,а);
 t_1, t_2 – моменты времени, соответствующие началу и окончанию действия импульса $F(t)$;
 $\tau_u = \tau_{1/2}$ – длительность импульса силы $F(t)$;
 ε_n – скорость затухания n -й гармоники.

Анализ выражения (1), проведенный в ряде работ [6, 8], показывает, что при возбуждении колебаний струны импульсом силы $F(x, t)$ гармонический состав является функцией распределения силы вдоль струны, длительности и импульса формы во времени. Поскольку содержание в пространственной форме колебаний струны высших гармоник приводит к бесполезной затрате энергии возбуждающего импульса $F(x, t)$, что уменьшает энергию первой гармоники и снижает помехоустойчивость измерительной системы [9], определение значения амплитуды колебаний струны при измерении динамических физических величин является актуальной задачей. Выражение (1) справедливо только при $\tau_{ii} = \tau_{1/2} < \pi/\omega_1$, где ω_1 – частота основного тона ($n = 1$) [8, 10]. Также подразумевается, что в момент генерации очередного импульса возбуждения струна находится в состоянии покоя, т.е. период следования импульсов возбуждения T_0 превышает время T^* затухания амплитуды y до пренебрежительно малой величины Δ (рис. 2). При регистрации динамических процессов колебания струны должны возбуждаться непрерывно, для этого необходимо соблюдать условие, когда $T_0 < T^*$.

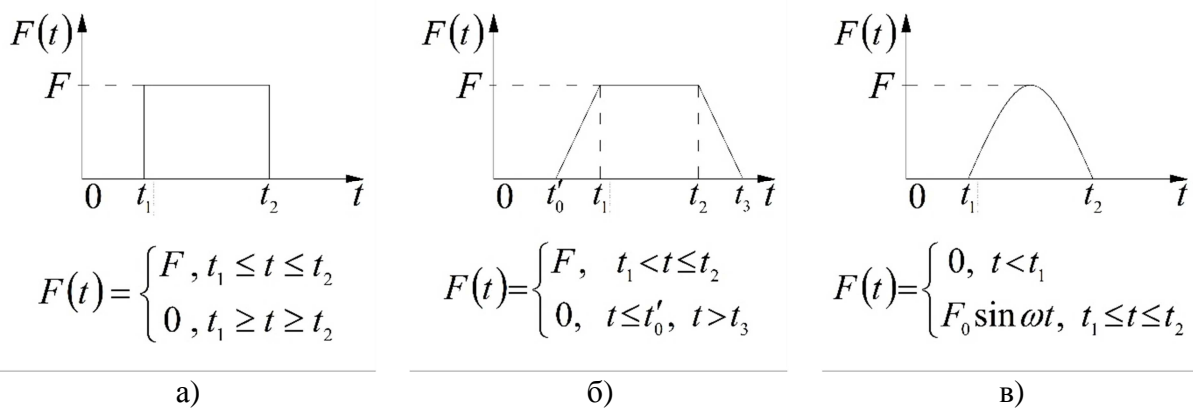


Рис. 1. Импульс силы:
а – прямоугольной формы; б – трапецидальной формы;
в – в форме полусинусоиды

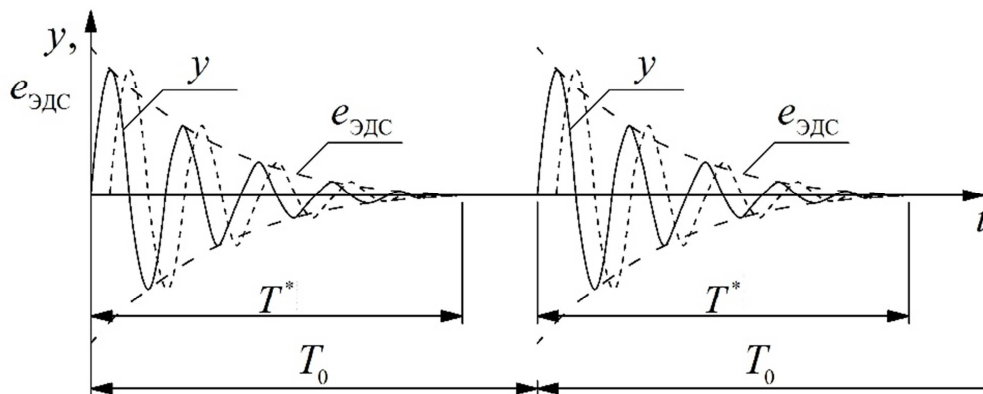


Рис. 2. Возбуждение колебаний струны струнного преобразователя во времени

Отчасти решить указанную выше проблему удалось в исследованиях, проведенных Н.Н. Гусевым [11], который решил общее волновое уравнение колебаний струны, получив выражение для амплитуды колебаний струны, возбужденной одиночным импульсом трапецидальной формы (см. рис. 1,б):

$$y(t) = \frac{2}{\pi \times \varepsilon \cdot c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2F}{n \cdot \omega_n} \cdot K_B \cdot \exp \left[-\alpha_n \left(t - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right] \cdot \sin \frac{\omega_n \cdot \tau_{1/2}}{2} \cdot \sin \omega_n \left(t - \frac{t_1 + t_2}{2} \right), \quad (2)$$

где K_B – коэффициент возбуждения n -й гармоники, $K_B = \frac{2}{\omega_n \cdot \tau_{\phi}} \cdot \sin \frac{\omega_n \cdot \tau_{1/2}}{2}$.

Как показали расчеты, проведенные в исследовании [11], значения амплитуды y_1 , найденные из выражения (1), а затем из выражения (2), при одинаковых значениях F и $\tau_u = \tau_{1/2}$, но разных τ_{ϕ} могут существенно отличаться, вплоть до десятков раз. А так как большинство составляющих δ_i погрешности δ метода имеют амплитудную зависимость, уточнение значения y_1 имеет существенное значение для повышения точности измерения динамических величин.

Полученное в исследованиях [11] выражение (2) для амплитуды колебаний струны более точно учитывает реальные условия возбуждения колебаний, а именно, учитывает отличие формы импульса возбуждения от прямоугольной.

Также в исследованиях [11] было определено выражение для амплитуды колебаний струны при уменьшении периода следования импульсов возбуждения до значения $T_0 < T^*$. Так, выражение для определения амплитуды колебаний струны, возбужденных бесконечной серией импульсов силы трапецеидальной форм во времени, следующих с периодом $T_0 < T^*$, имеет вид

$$y(t) = \frac{2}{\pi \times \varepsilon \cdot c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2F}{n \cdot \omega_n} \cdot K_B \cdot \exp \left[-\alpha_n (t - t_0) \right] \cdot R_p \cdot \sin \frac{\omega_n \cdot \tau_{1/2}}{2} \cdot \sin \left[\omega_n (t - t_0) + \theta \right], \quad (3)$$

где R_p – резонансный множитель колебаний струны относительно последнего импульса возбуждения (t_0);

θ – сдвиг фазы колебаний струны относительно последнего импульса возбуждения (t_0).

В своих исследованиях А.Ю. Петров [12], рассмотрев различные варианты отклика активирующих воздействий, выяснил, что энергия высших гармоник практически сводится к нулю при ограниченном времени синусоидальном воздействии на струну.

Таким образом, условия возбуждения колебаний струны при динамических измерениях, для которых было получено выражение (3), требуют своего дальнейшего совершенствования.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ СТРУНЫ

Выражение для амплитуды колебаний струны, возбужденной одиночным импульсом силы в форме полусинусоиды во времени, находится авторами из общего решения волнового уравнения колебаний струны [6, 8, 10]:

$$y(x, t) = \frac{2}{\pi \times \varepsilon \cdot c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin K_n x_0 \sin K_n x \cdot \int_{-\infty}^t F(\tau) \sin \omega_n (t - \tau) d\tau, \quad (4)$$

где τ – текущий момент времени.

Импульс $F(t)$ описывается выражением (см. рис. 1,в)

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ F_0 \sin \omega t, & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega}, \\ 0, & t > \frac{\pi}{\omega}. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда волновое уравнение для амплитуды колебаний струны, возбуждаемой импульсом силы $F(x, t)$ в форме полусинусоиды во времени будет иметь следующий вид:

$$y(x, t) = \frac{2F_0}{\pi \times \varepsilon \cdot c} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin K_n x_0 \sin K_n x \cdot \frac{\omega}{\omega^2 - \omega_n^2} \cdot 2 \sin \left(\omega_n t + \frac{\pi \omega_n}{2 \omega} \right) \cos \left(\frac{\pi \omega_n}{2 \omega} \right) \exp(-\alpha_n t) \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) для амплитуды колебаний струны, в отличие от выражения (2), еще более точно учитывает реальные условия возбуждения колебаний.

Следующим этапом исследования являлось определение выражения для амплитуды колебаний струны при уменьшении периода следования импульсов возбуждения до значения $T_0 < T^*$.

Исходным уравнением для определения амплитуды колебаний струны, возбужденных бесконечной серией импульсов силы в форме полусинусоиды во времени, следующих с периодом $T_0 < T^*$ в моменты времени $t_s = t_0 - sT_0$, где s – номер импульса, является выражение

$$y(x, t) = \frac{2F_0}{\pi \times \varepsilon \cdot c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin K_n x_0 \sin K_n x \cdot \frac{\omega}{\omega^2 - \omega_n^2} \left[\sin(\omega_n t) + \sin \left(\omega_n t - \pi \frac{\omega_n}{\omega} \right) \right] \exp(-\alpha_n t). \quad (7)$$

Решение выражения (7), полученное авторами, имеет вид

$$y(x, t) = \frac{4F_0}{\pi \times \varepsilon \cdot c} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin(K_n x_0) \cdot \sin(K_n x) \cdot \frac{\omega}{\omega^2 - \omega_n^2} \cdot \cos \left(\frac{\pi \omega_n}{2 \omega} \right) \cdot \exp(-\alpha_n (t - t_0)) \cdot R_n \times \right. \\ \left. \times \sin \left(\omega_n \left(t - t_0 - \frac{\pi}{2\omega} \right) + \theta_n \right) \right]. \quad (8)$$

В качестве частного случая общего решения волнового уравнения колебаний струны полученное выражение для амплитуды колебаний струны при непрерывном возбуждении колебаний импульсами силы в форме полусинусоиды во времени позволяет более точно учитывать реальные условия возбуждения струнных преобразователей при измерениях динамических величин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При применении систем мониторинга на основе струнных преобразователей для измерения динамических величин необходимо обеспечить непрерывность получения информации. Основную проблему при этом представляют искажения формы импульсов, вызванные возникающими гармониками.

В ходе анализа исследований [11, 12] было получено выражение (8), при котором энергия, затрачиваемая на возбуждение высших гармоник, практически сводится к нулю. В связи с этим очевидно, что использование импульса в форме полусинусоиды является предпочтительным при измерении динамических величин.

Также частичное ослабление и подавление гармоник происходит от применения эффекта сдвига фаз колебаний струны относительно последнего импульса возбуждения.

Однако стоит заметить, что при совершенствовании формы импульсов возбуждения колебаний струны требует совершенствования и вторичная аппаратура. С этой целью авторами было разработано устройство диагностики и контроля и реализованное в нем устройство возбуждения непрерывных колебаний струны, новизна технических решений которого подтверждена патентом на изобретение Российской Федерации [13]. Названное устройство позволяет повысить стабильность колебания струны за счет автоматического поддержания оптимальных параметров импульсов возбуждения колебаний струны и обеспечить постоянство относительной погрешности струнного преобразователя по частоте в зависимости от амплитуды колебаний струны.

Список используемых источников

1. Технические средства диагностики. – М.: АО «НИИЭС», 2009–2019. – URL: http://www.niies.rushydro.ru/works_services/diagnostic_tools/ (дата обращения: 27.01.2020).
2. Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. Адаптация систем испытаний и долговременного контроля к условиям аварийных ситуаций на стартовых сооружениях наземной космической инфраструктуры // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 71–75.
3. СТО 70238424.27.140.004-2008. Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений ГЭС. Условия создания. Нормы и требования. – М.: ОАО РАО «ЕЭС России», 2019. – 58 с.
4. Северов А.П. Методика контроля электрических параметров струнных датчиков для исследований гидротехнических сооружений // Изыскания и проектирование в водохозяйственном строительстве. – 1967. – Вып. 3, сер. 7. – С. 40–42.
5. Шерстобитова А.С. Датчики физических величин. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 58 с.
6. Северов А.П. Импульсное возбуждение струн в струнных датчиках // Приборы и системы управления. – 1968. – № 3. – С. 9–11.
7. Коноплев К.Г., Олейниченко Н.Н. Новый метод расчета высших гармоник при импульсном регулировании синхронных генераторов // Электротехника и электроэнергетика. – 2010. – № 3. – С. 4–6.
8. Рожанский Д.А. Курс физики. Колебания и волны. Звук. Свет / под ред. А.Ф. Иоффе. – М.: URSS, 2012. – 248 с.
9. Северов А.П. Исследование параметров системы возбуждения струнных датчиков для гидротехнических сооружений // Молодые ученые-мелиораторы и гидротехники – сельскому хозяйству. – 1968. – Вып. 4. – С. 20–26.
10. Динамический расчет объекта «Спортивно-оздоровительный комплекс» Технопарка РГСУ / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Е.О. Шутенко и др. // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3279> (дата обращения: 27.01.2020).
11. Гусев Н.Н. Методология создания и эксплуатации информационной системы мониторинга безопасности зданий и сооружений опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений: дис. ... д-ра техн. наук: 05.25.05 / Гусев Николай Николаевич. – СПб., 2008. – 472 с.
12. Петров А.Ю. Исследование и развитие методов измерительного преобразования параметров струнных датчиков: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / Петров Алексей Юрьевич. – СПб., 2004. – 472 с.
13. Устройство для возбуждения непрерывных колебаний струны: пат. 2689283 РФ : МПК G01L 1/10 (2006.01) / Гусев Н.Н. и Кучеренко А.О.; заявители и патентообладатели Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. – № 2018105219/28 ; заявл. 12.02.2018 ; опубл. 24.05.2019, Бюл. № 15. – 3 с.

О.А. Ерохин;
С.А. Мачнев,
кандидат техн. наук;
Д.В. Сурин,
доктор техн. наук, профессор;
А.М. Шевчук,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПОРАЖАЮЩЕГО ПОПАДАНИЯ ОБЫЧНЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ ПРОТИВНИКА В СТАЦИОНАРНЫЕ ОБЪЕКТЫ-ЦЕЛИ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В работе излагается новая общая теория и методы аналитического решения задачи по оценке вероятности поражающего попадания обычных средств поражения противника в защитные конструкции покрытий стационарных объектов-целей военной инфраструктуры в условиях ведения современной войны.

Ключевые слова: обычные средства поражения, высокоточное оружие, специальные фортификационные сооружения, рикошет, вероятность поражения.

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от известных работ [1, 2], посвященных прониканию твердых тел и снарядов в изотропные среды, в настоящей работе использована авторская теория Д.В. Сурина по оценке проникания современных обычных средств поражения (ОСП) в анизотропные грунтовые среды с вязким сопротивлением [3, 4]. Наиболее значимая научная новизна работы состоит в возможности оценки вероятности поражающего попадания современных ОСП в объекты-цели (ОЦ) с учетом влияния следующих факторов:

- наличия сложной геометрической формы плановой проекции и защитных конструкций покрытий ОЦ;
- наличия равной вероятности подлета ОСП к ОЦ по направлениям азимута (фронт, тыл и фланги);
- возникновения возможного рикошета ОСП от поверхности защитной толщи грунта над специальными и войсковыми фортификационными сооружениями и от поверхности различных защитных конструкций покрытий по назначению ОЦ;
- формирования систематической ошибки прицеливания ОСП относительно их центра прицеливания при наличии противодействия различными способами (применения инженерно-технических средств маскировки – скрытия и имитации, а также при фортификационном усилении – устройства над специальными фортификационными и войсковыми сооружениями защитной толщи грунта);
- возникновения дополнительного разворота ОСП при проникании в защитную толщу грунта специальных и войсковых фортификационных сооружений при условии наличия наклона от вертикали угла подлета ОСП к ОЦ;
- наличия широкой номенклатуры ОЦ военной инфраструктуры, отличающихся по функциональному назначению: специальные фортификационные сооружения (СФС), войсковые фортификационные сооружения (ВФС), специальные сооружения (СС), здания и сооружения общевойскового назначения и образцы вооружения и военной техники, находящиеся на стоянках вне защитных укрытий.

Под вероятностью поражающего попадания, таким образом, понимаем вероятность попадания ОСП в защитную конструкцию (ЗК) покрытия объекта-цели с учетом возможного ricoшета, образующегося за счет защитной толщи грунта (при его наличии) и защитной конструкции покрытия.

По конструктивному решению объекты-цели подразделяются на следующие типы поверхностей защитных конструкций покрытий: плоские горизонтальные, плоские скатные, арочные, купольные и смешанного типа. Например, имеются следующие виды геометрической формы ЗК покрытий:

- плоские двухскатные для СС и ЗС ОВН;
- плоские, арочные и купольные для СФС и ВФС;
- плоские горизонтальные и смешанной геометрической формы для образцов ВВТ.

Кроме того, СФС обсыпного арочного типа имеют крутую (под 30°) трехскатную обсыпку грунтовой защиты (ГЗ).

Отметим, что из состава ОЦ военной инфраструктуры наиболее значимыми и наиболее сложными для проводимого исследования являются СФС командных пунктов управления войсками и защитные укрытия с образцами ВВТ различного уровня по рангу военной важности. СФС подразделяются по объемно-конструктивному решению и по условиям посадки в грунт на следующие типы: обсыпные арочные, котлованные рамные, купольные и сферические, а также шахтного типа [4, 5].

Актуальность представляемых в работе исследований обусловлена их направленностью на применение в последующей оценке живучести объектов военной инфраструктуры в условиях ведения современной войны с потенциальным противником при расчетном воздействии его ОСП. Понятие «расчетное воздействие» ОСП или других средств поражения противника на ОЦ является синонимом понятия «научно-обоснованное воздействие», то есть обоснованное с использованием соответствующих теорий моделирования военных конфликтов и оптимизации целераспределения средств поражения по объектам военных и экономических потенциалов противоборствующих сторон [6, 7].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ПОРАЖАЮЩЕГО ПОПАДАНИЯ ОБЫЧНЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ ПРОТИВНИКА В СТАЦИОНАРНЫЕ ОБЪЕКТЫ-ЦЕЛИ

Рассмотрим расчетные предпосылки теории оценки вероятности поражающего попадания ОСП противника в ОЦ военной инфраструктуры. Предполагается, что планируемое противником прицеливание ОСП осуществляется по центрам плановых проекций (относительно поверхности земли) рассматриваемых ОЦ (рис. 1) в условиях равной вероятности их подлета к ОЦ по четырем направлениям азимута (в направлении фронта, тыла, левого и правого флангов).

Предполагается, что предварительно должны быть определены основные исходные данные: тактико-технические характеристики расчетных ОСП проникающего типа противника; конструктивные особенности объектов-целей и их геометрические размеры. Также предполагается, что известны физико-механические характеристики конструкционных материалов защитных конструкций покрытий ОЦ и грунтовой защитной толщи над СФС и ВФС, включая известную статистику формирования углов ricoшета соответствующих расчетных ОСП противника. Углы ricoшета, в свою очередь, зависят от механической прочности конструкционных материалов защитных конструкций (ЗК) покрытий ОЦ. Возникновение углов ricoшета в отношении современных ОСП класса высокоточного оружия (ВТО) в настоящее время недостаточно исследовано экспериментально и не подкреплено соответствующей теорией.

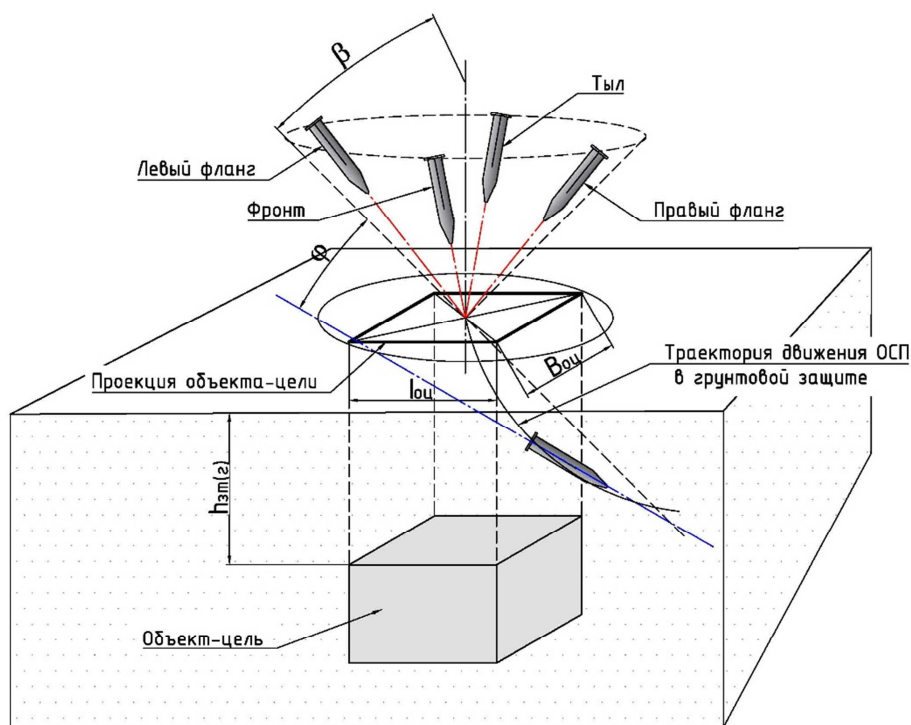


Рис. 1. Расчетная модель поражающего попадания ОСП в объект-цель

В данной работе предполагается, что углы рикошета ОСП от ЗК покрытий рассматриваемых в работе ОЦ считаются известными. В первом приближении можно воспользоваться усредненной статистикой углов рикошета ОСП предыдущих поколений от некоторых защитных преград, полученных в полевых экспериментальных испытаниях, проведенных на полигонах во время стрельб с применением авиационных ОСП [2]. По имеющейся статистике этих полевых испытаний средние углы рикошета авиационных ОСП от различных преград имеют следующие значения углов рикошета от плоских поверхностей: $\beta_{p(zk)} = 58^\circ$ – мягкий грунт типа суглинков; 47° – бетон марки класса В-60; 43° – обычный железобетон класса В-30; 40° – фортификационный железобетон; 28° – листовая сталь класса С-7; 17° – танковая броня.

Отметим, что методологически в настоящей работе системно используется функция распределения Рэлея [8] для круговой области попадания и предложенный в работе [3] прием вычисления «геометрической вероятности попадания» для площадных ОЦ.

Вероятность поражающего попадания одного расчетного ОСП противника в соответствующий ОЦ определяется как вероятность осуществления двух совместных независимых событий, состоящих в попадании ОСП в плановую проекцию ОЦ и возможного рикошета ОСП от поверхности защитных конструкций (ЗК) покрытия ОЦ, по формуле следующего вида:

$$P_{(1)оц} = 1 - (1 - P_{п(оц)}) (1 - P_{p(оц)}), \quad (1)$$

где $P_{п(оц)}$ – вероятность попадания ОСП в плановую проекцию ОЦ;

$P_{p(оц)}$ – вероятность рикошета ОСП от поверхности ЗК покрытия ОЦ.

Отметим, что оценка вероятности попадания ОСП в плановую проекцию ОЦ в методическом отношении принципиально отличается для круговой и прямоугольной геометрической форм плановых проекций вследствие необходимости преобразования функции распределения Рэлея для круговой области попадания в прямоугольную область попадания. Кроме того,

при оценке вероятности попадания ОСП в круговую или прямоугольную плановую проекцию ОЦ необходим учет формирования систематической ошибки прицеливания ОСП, которая будет обусловлена применением средств скрытия, а также наличием защитной толщи грунта над СФС и ВФС. В свою очередь, далее методы оценки вероятности попадания ОСП в плановую проекцию ОЦ методически имеют два варианта построения – формирование малой систематической ошибки прицеливания и большой систематической ошибки прицеливания ОСП.

Далее представим последовательность действий при применении метода оценки вероятности поражающего попадания обычных средств поражения противника в стационарные объекты-цели.

1. Оценка вероятности попадания ОСП в круговые плановые проекции ОЦ.

1.1. Малая относительная систематическая ошибка прицеливания ОСП ($\bar{\Delta}_{пр} < 1$) определяется выражением

$$P_{(п)оц} = 1 - \exp\left\{-\alpha_{оц} \left(1 - \bar{\Delta}_{пр}\right)^2\right\} + \left[\exp\left\{-\alpha_{оц} \left(1 - \bar{\Delta}_{пр}\right)^2\right\} - \exp\left\{-\alpha_{оц} \left(1 + \bar{\Delta}_{пр}\right)^2\right\}\right] (2 - \bar{\Delta}_{пр}) / 4. \quad (2)$$

Здесь $\alpha_{оц}$ – показатель попадаемости ОСП в круговую плановую проекцию ОЦ в виде функции распределения Рэлея:

$$\alpha_{оц} = (\rho R_{оц} / E_{осп})^2, \quad (3)$$

где ρ – постоянная величина в функции Лапласа нормального закона распределения, $\rho=0,467$;

$R_{оц}$ – радиус круговой плановой проекции ОЦ, м;

$E_{осп}$ – круговое вероятное отклонение ОСП (точность прицеливания), м.

1.2. Большая относительная систематическая ошибка прицеливания ОСП ($\bar{\Delta}_{пр} \geq 1$) определяется выражением

$$P_{ин(оц)} = \left[\exp\left\{-\alpha_{оц} \left(1 - \bar{\Delta}_{пр}\right)^2\right\} - \exp\left\{-\alpha_{оц} \left(1 + \bar{\Delta}_{пр}\right)^2\right\}\right] / 4\bar{\Delta}_{пр}. \quad (4)$$

Относительная систематическая ошибка прицеливания ОСП определяется по следующему алгоритму декомпозиции расчетных операций:

$$\Delta_{пр} = \left(\Delta_{пр(мс)}^2 + \Delta_{пр(зт)}^2\right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$\bar{\Delta}_{пр} = \Delta_{пр} / L_{оц}, \quad (6)$$

$$\Delta_{пр(мс)} = L_{оц} \left(P_{об(оц)} - 1\right), \quad (7)$$

$$\Delta_{пр(зт)} = h_{зт} \left[tn\left(\beta_{осп} + \Phi_{осп(зт)}\right)\right], \quad (8)$$

где $\Delta_{пр}$ – абсолютная систематическая ошибка прицеливания ОСП в плановую проекцию ОЦ;

$\Delta_{пр(мс)}$ – систематическая ошибка прицеливания ОСП в плановую проекцию ОЦ, обусловленная применением средств скрытия;

$\Delta_{пр(зт)}$ – относительная систематическая ошибка прицеливания ОСП ВТО в плановую проекцию ОЦ, обусловленная наличием над СФС (ВФС) защитной толщи грунта [9];

$L_{оц}$ – наибольший размер плановой проекции ОЦ (длина или диаметр);

- $P_{об(оц)}$ – вероятность обнаружения ОЦ техническими средствами разведки противника или средствами наведения ОСП [10] непосредственно в момент их атаки;
- $h_{зт}$ – расчетная величина слоя защитной толщи грунта над СФС, м;
- $\beta_{осп}$ – угол подлета ОСП к ОЦ, отсчитываемый относительно вертикали, град;
- $\Phi_{осп(зт)}$ – угол дополнительного разворота ОСП в защитной толще грунта над СФС (ВФС) на уровне ЗК покрытия, обусловленный вращением ОСП вследствие влияния горизонтальной составляющей сопротивления грунта, а также увеличением его сопротивления с учетом уплотнения по глубине, прониканию ОСП [11].

Метод оценки дополнительного угла разворота ОСП в защитной толще грунта на уровне ЗК покрытия СФС или ВФС с учетом вращения ОСП в анизотропном грунте заключается в следующем. Дифференциальное уравнение вращения ОСП в анизотропном грунте имеет вид

$$J_{осп(зт)} \times \ddot{\Phi}_{осп(зт)} + R_{осп(зт)} \times \dot{\Phi}_{осп(зт)} = 0, \quad (9)$$

- где $J_{осп(зт)}$ – момент инерции вращения корпуса ОСП относительно центра масс в грунтовой защите;
- $R_{осп(зт)}$ – момент сопротивления защитной толще грунта вращению ОСП;
- $\ddot{\Phi}_{осп(зт)}, \dot{\Phi}_{осп(зт)}$ – соответственно вторая и первая производные дополнительного угла разворота ОСП в грунтовой защите.

Решение дифференциального уравнения (9) для дополнительного угла разворота ОСП в грунтовой защите имеет вид

$$\Phi_{осп(зт)} = \arctg \left(\frac{2}{1_{осп}} + \left[\pi g d_{осп} 1_{осп} a_{I(гр)} \rho_{гр} \right] \frac{\left[1 + (h_{зт} \times \varepsilon_{гр})^{1/2} \right] \sin(\beta_{осп})}{(2P_{осп} \times V_{осп})} h_{зт} \right), \quad (10)$$

- где $d_{осп}, 1_{осп}$ – соответственно средний диаметр и длина корпуса ОСП, м;
- $V_{осп}$ – скорость подлета ОСП к ОЦ, м/с;
- $h_{зт}$ – толщина слоя грунтовой защиты, м;
- $\varepsilon_{гр}$ – относительное уплотнение грунта на один метр глубины, $\varepsilon_{гр} \approx 0,00011$ для грунта типа суглинка.

2. Метод оценки вероятности попадания ОСП в плановую проекцию ОЦ прямоугольной формы определяется по аналогии с круговой плановой проекцией ОЦ также с учетом наличия малой или большой относительной систематической ошибки прицеливания ОСП.

2.1. Малая относительная систематическая ошибка прицеливания ОСП ($\bar{\Delta}_{пр} < 1$) определяется выражением

$$P_{ин(оц)} = \left\{ \begin{array}{l} 1 - \exp \left\{ -\alpha_{оц(L)} \times (1 - \Delta_{пр})^2 \right\} + \\ + \left[\exp \left\{ -\alpha_{оц(L)} \times (1 - \Delta_{пр})^2 \right\} - \right. \\ \left. - \exp \left\{ -\alpha_{оц(L)} \times (1 + \Delta_{пр})^2 \right\} \right] \times \left(2 - \Delta_{пр} \right) / 4 \end{array} \right\} / \gamma_{оц}. \quad (11)$$

Здесь $\alpha_{оц(L)}$ – показатель попадаемости ОСП ВТО в вписанный по длине ОЦ круг в форме представления в виде функции распределения Рэлея:

$$\alpha_{\text{оц}(L)} = (\rho L_{\text{оц}} / E_{\text{осп}})^2 / 4, \tag{12}$$

где $L_{\text{оц}}$ – длина прямоугольной плановой проекции ОЦ, м;

$\Upsilon_{\text{оц}}$ – соотношение размеров длины и ширины плановой проекции ОЦ,
 $\Upsilon_{\text{оц}} = L_{\text{оц}} / B_{\text{оц}}$.

2.2. Большая относительная систематическая ошибка прицеливания ОСП ($\Delta_{\text{пр}} \geq 1$) определяется выражением

$$P_{\text{пр(оц)}} = \left(\exp\{-\alpha_{\text{оц}(L)}(1-\Delta_{\text{пр}})^2\} - \exp\{-\alpha_{\text{оц}(L)}(1+\Delta_{\text{пр}})^2\} \right) / (4\phi_{\text{оц}} \times \Delta_{\text{пр}}). \tag{13}$$

Вероятность рикошета ОСП рассматривается в условиях непосредственного их контакта с поверхностью ЗК покрытия ОЦ и имеет следующий вид:

$$P_{\text{р(оц)}} = 1 - (1 - P_{\text{р(зт)}})(1 - P_{\text{р(зк)}}), \tag{14}$$

где $P_{\text{р(зт)}}$, $P_{\text{р(зк)}}$ – соответственно вероятность рикошета ОСП от поверхности защитной толщи грунта (при ее наличии, например, над СФС или ВФС) и от поверхности непосредственно ЗК покрытия ОЦ.

Указанные выше вероятности рикошета ОСП рассматриваются как вероятность двух совместных и зависимых событий, состоящих в рикошете ОСП от защитной толщи грунта и защитной конструкции покрытия ОЦ в зависимости от азимутального направления полета ОСП к ОЦ в предположении равной вероятности этих направлений.

Вероятность рикошета ОСП от поверхности ЗТ грунта и ЗК покрытия ОЦ с учетом вышесказанного определяется по формуле вида

$$P_{\text{р(зт)}} = P_{\text{р(зт-пл)}} P_{\text{р(зт-кр)}}, \tag{15}$$

где $P_{\text{р(пл)}}$, $P_{\text{р(кр)}}$ – соответственно вероятность рикошета ОСП от плоской поверхности ЗК покрытия и с учетом наклона или кривизны поверхности ЗК покрытия ОЦ.

3. Конечные решения по оценке вероятности рикошета ОСП от ЗК покрытий типовых ОЦ.

3.1. Для СФС обсыпного арочного типа (с трехскатной обсыпкой грунтом под углом $\beta_{\text{ск(обс)}} = 30^\circ$ к горизонту)

$$P_{\text{р(оц)}} = 1 - \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} 1 - 0,25 \left[\exp\{-4(\beta_{\text{осп}} - \beta_{\text{ск(обс)}}) / \beta_{\text{р(зт)}}\}^4 + \right. \\ \left. + \exp\{-4(\beta_{\text{осп}} - \beta_{\text{ск(обс)}}) / \beta_{\text{р(зс)}}\}^4 \right] + \right. \\ \left. + 2 \exp\{-4(\beta_{\text{осп}} / \beta_{\text{р(зт)}})^4\} \right] \times \\ \left[1 - \left[\exp\{-4(\beta_{\text{осп(зт)}} / \beta_{\text{р(зк)}})^4\} \right] \times 2(2\beta_{\text{р(зк)}} / \pi + 1) \right] \end{array} \right\}. \tag{16}$$

Здесь $\beta_{\text{ск(обс)}}$ – угол ската относительно горизонтальной поверхности грунтовой обсыпки сооружения;

$\beta_{\text{осп(зт)}}$ – угол полета ОСП на уровне контакта с поверхностью ЗК покрытия сооружения, формируемый с учетом разворота ОСП в ЗТ грунтовой обсыпки, определяемый по формуле вида

$$\beta_{\text{осп(зт)}} = \beta_{\text{осп}} + \varphi_{\text{осп(зт)}}, \quad (17)$$

где $\varphi_{\text{осп(зт)}}$ – угол разворота ОСП в ЗТ грунтовой обсыпке сооружения;

$\beta_{\text{р(зт)}}$, $\beta_{\text{р(зк)}}$ – соответственно угол рикошета ОСП от поверхности ЗТ грунта и от поверхности ЗК покрытия сооружения.

3.2. Для СФС и ВФС котлованного рамного типа

$$P_{\text{р(оц)}} = 1 - \left\{ \left[1 - \exp \left\{ -4 \left(\beta_{\text{осп}} / \beta_{\text{р(гз)}} \right)^4 \right\} \right] \times \left[1 - \exp \left\{ -4 \left(\beta_{\text{осп(зт)}} / \beta_{\text{р(зк)}} \right)^4 \right\} \right] \right\}. \quad (18)$$

3.3. Для СФС котлованного купольного и сферического типа

$$P_{\text{р(оц)}} = 1 - \left\{ \left[1 - \exp \left\{ -4 \left(\beta_{\text{осп}} / \beta_{\text{р(гз)}} \right)^4 \right\} \right] \times \left[1 - \exp \left\{ -4 \left(\beta_{\text{осп(зт)}} / \beta_{\text{р(зк)}} \right)^4 \right\} \right] \times \left[1 - 2\beta_{\text{з(зк)}} / \pi \right] \right\}. \quad (19)$$

3.4. Для СФС шахтного типа

$$P_{\text{р(оц)}} = 1 - \exp \left\{ -4 \left(\beta_{\text{осп}} / \beta_{\text{р(зк)ср}} \right)^4 \right\}. \quad (20)$$

Здесь $\beta_{\text{р(зк)ср}}$ – осредненный угол рикошета ОСП от поверхностей круговой защитной крыши и кольцевой ЗК покрытия оголовка сооружения, определяемый по формуле вида

$$\beta_{\text{р(зк)}} = \rho_{\text{кр/пок}} \beta_{\text{р(зк)ср}} + (1 - \rho_{\text{кр/пок}}) \beta_{\text{р(зк)пок}}, \quad (21)$$

где $\beta_{\text{р(зк)кр}}$, $\beta_{\text{р(зк)пок}}$ – соответственно угол рикошета ОСП от поверхности защитной крыши и поверхности покрытия оголовка сооружения;

$\rho_{\text{кр/пок}}$ – соотношение площадей поверхности защитной крыши и поверхности оголовка сооружения, определяемое по формуле вида

$$\rho_{\text{кр}} = 1 / \left[\left(R_{\text{ог}} / R_{\text{зк}} \right)^2 - 1 \right], \quad (22)$$

символами $R_{\text{ог}}$, $R_{\text{зк}}$ обозначены соответственно радиус оголовка и защитной крыши, м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящей работе исследования по оценке вероятности поражающего попадания ОСП класса ВТО в объекты-цели военной инфраструктуры существенно уточняют влияние мероприятий маскировки (скрытия) и фортификации (грунтовая защита и рикошетирующие устройства) на их живучесть. Применение разработанных методов на этапе проектирования СФС как объектов-целей позволит проводить объективное обоснование степеней защиты сооружений в условиях воздействия расчетных средств поражения противника.

Список используемых источников

1. СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны: актуализированная редакция СНиП II-11-77. Утверждены 18.02.2014 и введены 01.06.2014. – М.: Минстрой России, 2014. – 156 с.
2. Шульгин В.Н., Калайдов А.Н., Пономарев Р.А. Основы расчета устойчивости убежищ гражданской обороны при воздействии обычных средств поражения // Академия государственной противопожарной службы МЧС России. – 2012. – № 3. – С. 37–43.
3. Сурин Д.В. Аналитические методы оценки защищенности и живучести объектов и комплексов. – СПб., 1997. – 145 с.
4. Сурин Д.В. Специальные фортификационные сооружения: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 429 с.
5. Метод определения оптимального объемно-конструктивного решения специального сооружения на этапе предварительного проектирования / Ю.А. Загруддинов, С.Ю. Карасев, С.А. Мачнев и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 663. – С. 38–42.
6. Сурин Д.В., Стахно Р.Е., Шевчук А.М. Теория моделирования воздействия обычных средств поражения противника на объекты наземных комплексов // Информационный сборник АВН (Санкт-Петербургское отделение). – 2005. – № 3. – С. 58–67.
7. Калгин А.В., Шевчук А.М. Методы выбора средств поражения объектов и средств активного противодействия воздействию противника на основе математической теории игр // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 642. – С. 83–89.
8. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
9. Ладышкин Г.С., Федоренко А.В. Методика оценки эффективности мероприятий маскировки // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 669. – С. 71–77.
10. Меньшаков Ю.А. Виды и средства иностранных технических разведок. – М.: МГТУ, 2009. – 656 с.
11. Бивин Ю.К., Симонов И.В. Механика динамического проникания в грунтовую среду // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2010. – № 6. – С.157–191.

Е.В. Калмыков;
В.В. Пудиков,
кандидат техн. наук

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Приводятся требования к управлению подсистемой нагрева воздуха в системах кондиционирования воздуха, применяемые в ходе реализации энергосберегающих режимов обработки воздуха при строительстве новых и реконструкции существующих зданий и сооружений. Приводится концептуальный и функциональный алгоритм управления подсистемой нагрева воздуха.

Ключевые слова: энергосбережение в строительстве, теплообменные аппараты, энергосберегающие режимы обработки воздуха, подсистема нагрева воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство новых и реконструкция существующих военно-строительных комплексов требуют огромных затрат материальных ресурсов. Важную составляющую при строительстве и реконструкции зданий и сооружений составляют технические системы, в частности системы кондиционирования воздуха (СКВ).

Положения, указанные в [1], требуют при строительстве новых и реконструкции существующих сооружений применять энергоэффективные и энергосберегающие технологии. Одним из способов реализации указанных в [1] требований является применение в СКВ энергосберегающих режимов обработки воздуха. Такие режимы подробно описаны в [2] и [3]. Подсистема нагрева воздуха является неотъемлемой частью любой СКВ. Существующие алгоритмы управления нагревом воздуха в СКВ не отвечают критериям, предъявляемым к подсистеме нагрева воздуха в [3]. Налицо противоречие, заключающееся в несоответствии существующих алгоритмов управления нагревом воздуха в СКВ и энергосберегающих режимов обработки воздуха.

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМОЙ НАГРЕВА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА

Подсистемы первого нагрева СКВ по сравнению с подсистемами политропной обработки воздуха имеют более широкий диапазон условий функционирования, если под этим понимается разнообразие начальных и конечных параметров обрабатываемого воздуха, его расходов, сочетаний требуемой теплопроизводительности, температурного графика отпуска теплоты и т.д. Принимаемые решения далеко не всегда согласуются с возможностями поверхностных теплообменных аппаратов (калориферов), подобранных на максимальную расчетную производительность.

Такое положение частично объясняется тем, что большие усилия крупных специалистов были направлены на совершенствование конструкций теплообменников, повышение их теплофизической эффективности, создание методов, обеспечивающих подбор теплообменников на расчетную производительность, модернизацию технологии производства.

Однако для выбора алгоритма управления и соответствующих технических средств требуется систематизировать условия функционирования данной подсистемы с тем, чтобы при

учете определяющих технических характеристик теплообменников концентрировать их связь с методами управления.

Основные особенности, характеризующие условия функционирования подсистем нагрева воздуха демонстрируются на расчетных схемах термодинамической модели (рис. 1).

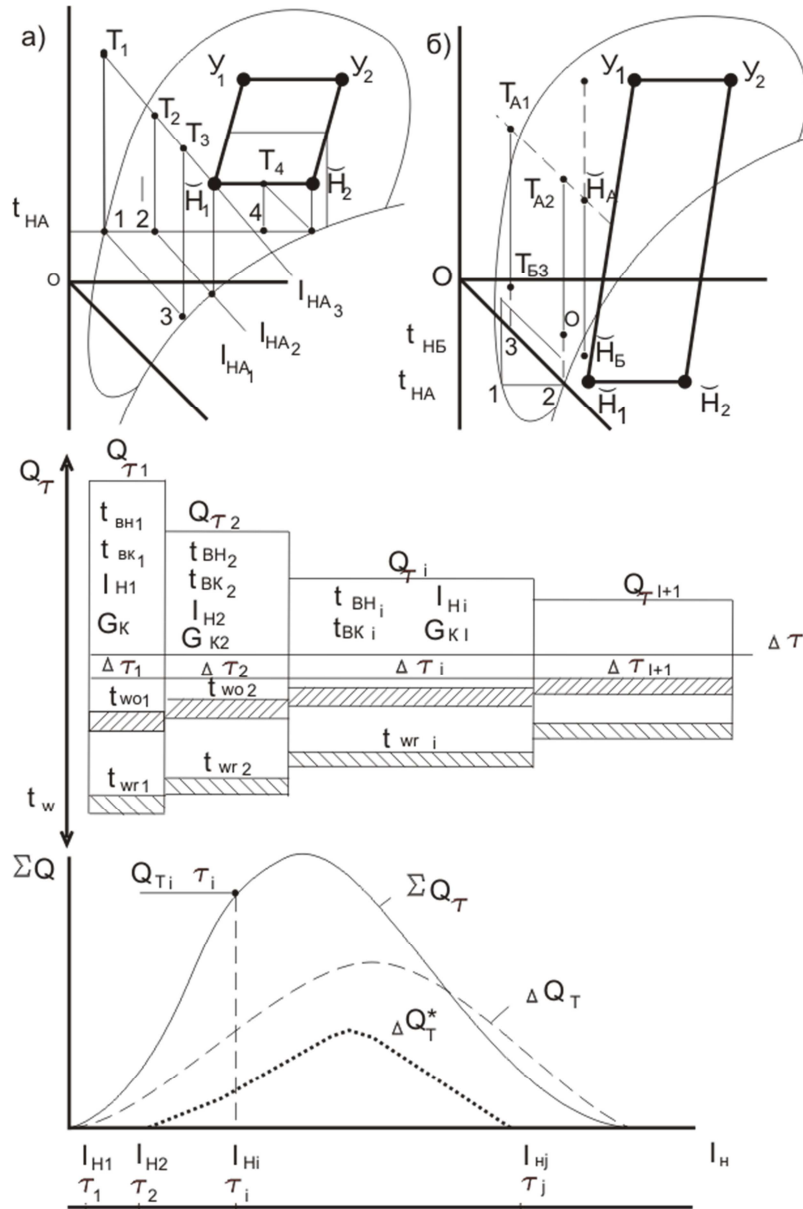


Рис. 1. Расчетные схемы и технологические карты подсистемы нагрева воздуха:
 Q – теплота, расходуемая на нагрев воздуха; t – температура воздуха;
 G – расход воздуха; I – энтальпия воздуха; τ – время работы подсистемы нагрева воздуха

На рис. 1 рассматривается характер связи начальных и конечных параметров обрабатываемого воздуха и теплопроизводительности при неизменных значениях $Q_{п}$ и $W_{п}$, т.е. при неизменных границах расчетных режимов потребления теплоты. Такие условия имеют место при компенсации теплотерь систем отопления.

Из сопоставления векторов $\overrightarrow{1T_1}$, $\overrightarrow{2T_2}$ и $\overrightarrow{4T_4}$ видно, что при одинаковой температуре наружного воздуха t_{HA} теплопроизводительность подсистемы зависит от второй координаты

состояния воздуха – его энтальпии, которая не используется при теплофизическом расчете теплообменника. В другом случае теплопроизводительность одинакова, но различны начальные и конечные состояния воздуха (см. векторы $\overrightarrow{1T_1}$ и $\overrightarrow{3T_3}$ на рис. 1).

Для 3-го класса нагрузок возникают те же условия, что и в предыдущем случае, но с той разницей, что конечное состояние воздуха может характеризоваться температурой ниже нуля (см. векторы $\overrightarrow{1T_{A1}}$ и $\overrightarrow{2T_{A2}}$ на рис. 1).

При учете теплопотерь в качестве нагрузки на СКВ граница зоны потребления теплоты, проходящая через энтальпию точки \check{H}_1 , будет изменять свое положение, например для теплопотерь, соответствующих температуре наружного воздуха t_{HA} , граница будет проходить через $(\cdot)\check{H}_A$, а конечное состояние воздуха будет иметь температуру выше нуля. Однако и здесь при одинаковой теплопроизводительности с первым классом нагрузок начальные и конечные параметры воздуха существенно отличаются.

При расчетной температуре наружного воздуха t_{HB} расчетная граница режима потребления теплоты может проходить через $(\cdot)\check{H}_B$. Тогда теплопроизводительность будет изменяться от величины, соответствующей вектору $\overrightarrow{3T_{B3}}$, до нуля (см. точку O на рис. 1). Отсюда следует, что подсистема должна быть критична к малым изменениям потребления теплоты, иначе возникают нарушения параметров и перерасход теплоты.

Для правильного выбора теплообменников, методов и средств управления теплопроизводительностью расчетная информация данной подсистемы должна быть представлена технологическими картами (рис. 1,б). В верхнем квадранте представляется тепловая нагрузка с указанием продолжительности ее повторяемости Δt за расчетный годовой цикл эксплуатации системы. Для каждой теплопроизводительности определяются те значения температур t_{BH} и t_{BK} , которые установлены на основании расчетной схемы термодинамической модели.

В нижнем квадранте показан температурный график отпуска теплоты системой теплоснабжения. Особо следует отметить, что поддержание температуры обратной воды t_{WQ} на оптимальном уровне для источника теплоты является одной из важнейших задач систем автоматического управления (САУ).

Выбрать алгоритм и технические средства САУ при столь больших степенях свободы определяющих параметров функционирования достаточно трудно. Несогласованность технических характеристик теплообменного оборудования с САУ, как правило, имеет такие последствия, как:

- перерасход теплоты вследствие перегрева приточного воздуха;
- отклонение температуры обратной воды от оптимальных значений, что влечет за собой штрафные санкции;
- опасность замерзания воды в теплообменнике.

В связи со сказанным каждое решение по управлению рассматриваемой подсистемы должно оцениваться обобщенными сведениями типа таких, которые представлены на рис. 1

В системе координат $\Sigma Q_T - I_T$ строятся линии:

$\Sigma \overline{Q}_T$ – минимально неизбежные расходы теплоты, которые соответствуют полному согласованию ФТХ подсистемы и принятому решению САУ;

ΔQ_T – перерасходы теплоты при анализируемом решении подсистемы нагрева и САУ;

ΔQ_T^* – условный перерасход (экономия) теплоты, эквивалентный штрафным (льготным) санкциям, зависящим от температуры воды, возвращаемой данной подсистемой.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМОЙ НАГРЕВА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА

Управляющей величиной является уставочная температура воздуха $t_{уст}$ после воздухонагревателя (рис. 2).

Алгоритм управления подсистемой нагрева воздуха представлен на рис. 3. Функциональные схемы САУ подсистемой нагрева воздуха для различных классов нагрузок приведены в [4] и [5].

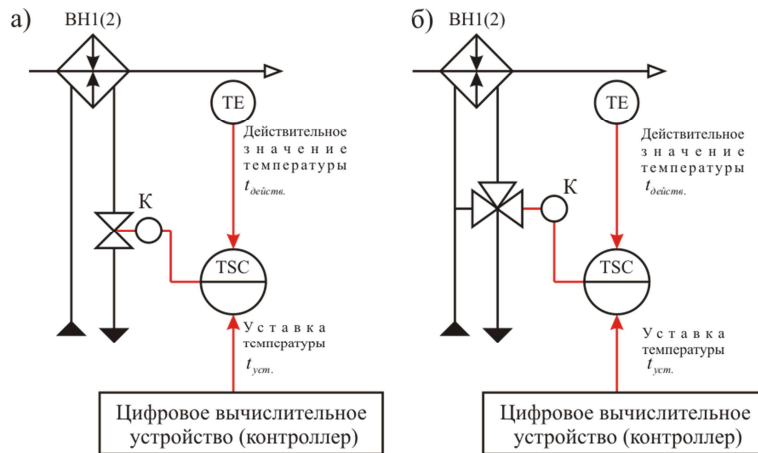


Рис. 2. Управляющие воздействия на подсистему нагрева воздуха: а – при количественном регулировании; б – при качественном регулировании; TSC – регулятор температуры; K – исполнительный механизм; TE – датчик температуры; ВН1(2) – воздухонагреватели

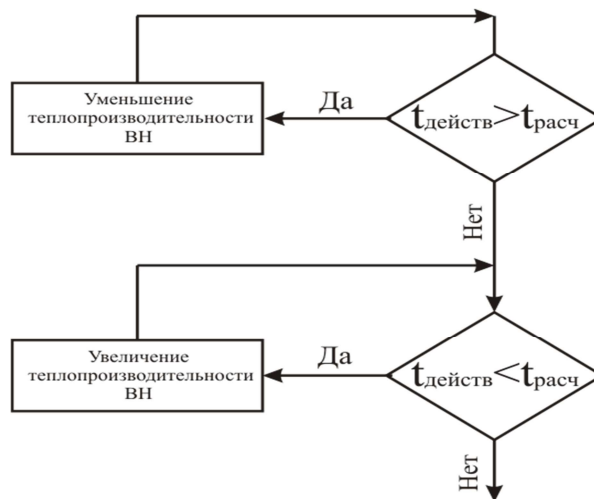


Рис. 3 Алгоритм управления подсистемой нагрева воздуха

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в публикации описаны разработанные энергосберегающие мероприятия, которые могут быть реализованы в СКВ при строительстве новых и реконструкции существующих зданий и сооружений. Выбран наиболее оптимальный способ управления подси-

стемой нагрева воздуха. Обосновано, что для реализации алгоритма управления подсистемой нагрева воздуха на основе энергосберегающих режимов обработки воздуха необходимо применение программируемых логических контроллеров.

Список используемых источников

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон от 23.11.2009 г № 261-ФЗ. – URL: <https://base.garant.ru/12171109/> (дата обращения: 05.11.2019).
2. *Рымкевич А.А.* Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. – СПб.: Арктика, 2003. – 272 с.
3. *Коченков Н.В.* Энергосберегающие режимы систем кондиционирования воздуха: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 399 с.
4. *Пудиков В.В.* Система автоматического управления системами кондиционирования воздуха для первого класса нагрузок специальных объектов наземной космической инфраструктуры // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 202–206.
5. *Пудиков В.В., Жабровец Е.И.* Термодинамическая модель обработки воздуха в прямоточно-рециркуляционных системах кондиционирования воздуха // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 669. – С. 229–235.

А.Н. Атарщиков,

кандидат военных наук;

А.П. Данелян,

кандидат военных наук;

Б.Д. Казахов,

доктор военных наук, профессор;

А.А. Степанников

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ПРИМЕНЕНИЯ АРСЕНАЛА ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ

Представлен методический подход к выбору рациональных способов применения арсенала Воздушно-космических сил (ВКС). Использован метод прямого перебора и построения множеств, оптимальных по Парето, способов для различных интервалов планирования применения арсенала. Для фильтрации полученных результатов использован принцип проведения сравнительного анализа. Обосновано применение методического подхода для решения задачи выбора рационального способа применения арсенала ВКС в период непосредственной угрозы агрессии и военное время.

Ключевые слова: методический подход, способ применения, решение многокритериальных задач, арсенал ВКС.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи по хранению, проведению технического обслуживания (ТО), ремонту, доработке и доставке на 1 Государственный испытательный космодром (ГИК) МО РФ ракет-носителей, космических аппаратов и других космических средств (КСр) возложены на арсенал ВКС (далее по тексту – арсенал). При этом в настоящее время сложилась следующая ситуация: во-первых, отсутствуют нормативные документы, определяющие организацию применения арсенала; во-вторых, не существует научно-методического аппарата, позволяющего определить рациональный способ применения арсенала в различных условиях обстановки.

Для того чтобы снять вторую выявленную проблему, авторами предлагается разработанный ими методический подход к выбору рациональных способов применения арсенала, который позволяет посредством многократного моделирования осуществить выбор рационального способа применения арсенала в период непосредственной угрозы агрессии и военное время.

МОДЕЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ АРСЕНАЛА

Анализ наиболее известных подходов к изучению сложных организационно-технических систем, к которым, несомненно, относится арсенал, дает однозначный вывод – изучение всегда следует начинать с объекта управления [1]. Итак, под объектом управления будем понимать арсенал, а если более конкретно – наземную инфраструктуру, служащую для хранения, обслуживания и доставки космических средств на 1 ГИК МО РФ.

На рис. 1 представлена модель применения арсенала, разработанная авторами на основе теории массового обслуживания [2]. Результаты моделирования в последующем позволят выбрать рациональный способ применения арсенала в сложившихся условиях обстановки. На рис. 1 отображены входящие потоки, которые содержат исходные данные, и выходные потоки, представляющие совокупность параметров применения арсенала. Особенностью по-

лученной модели является учет суммарных затрат на реализацию выбранного способа применения объекта управления по предназначению в различных условиях обстановки.

Поток (1) представляет собой вложение ресурсов, выраженных в условных единицах, для решения объектом задач по предназначению. В отсутствии угроз возникновения военных конфликтов этот поток имеет постоянную (заранее известную) величину и полностью определяет количество доставленных КСр (поток 5). Данный поток включает затраты на проведение комплекса работ по доставке КСр.

Поток (2) представляет собой отрицательное воздействие на объект и подразумевает сокращение ресурсов, что в конечном итоге приводит к уменьшению положительного выходного эффекта (поток 5). Он включает в себя затраты на защиту инфраструктуры от воздействия противника.

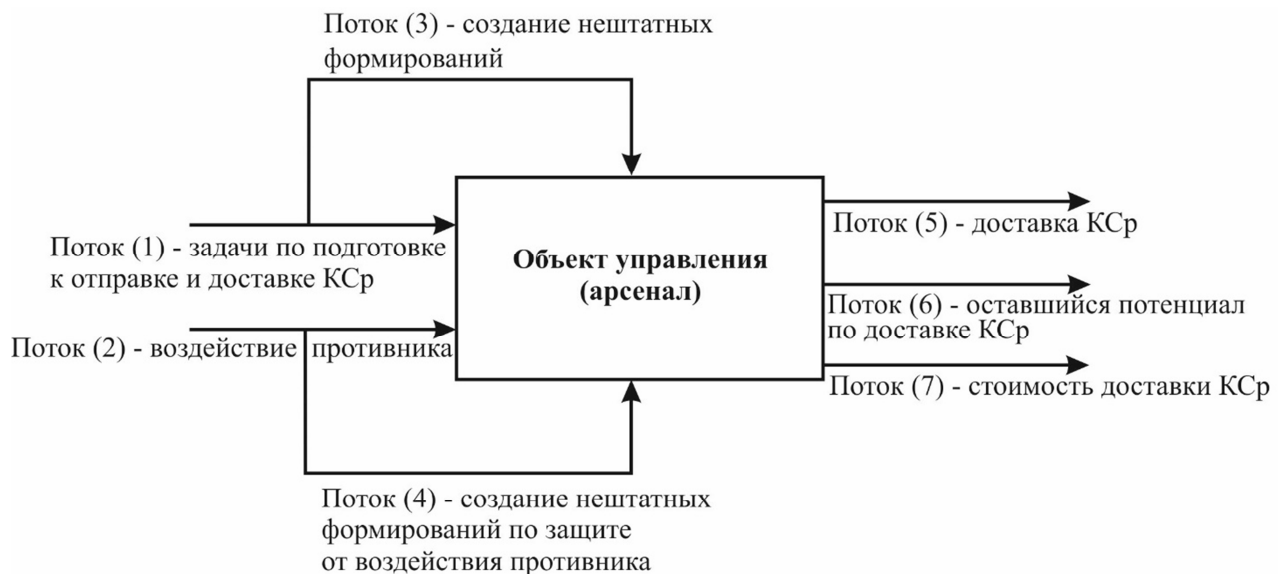


Рис. 1. Модель применения арсенала

В условиях непосредственной угрозы агрессии спектр задач, направленных на достижение конечной цели, возрастает за счет необходимости создания дополнительных нештатных формирований по доставке КСр [поток (3)]. Данный поток включает в себя затраты на содержание подразделений по подготовке к доставке КСр.

Поток (4) обусловлен воздействием противника и включает в себя затраты ресурсов на обучение и содержание нештатных формирований по защите инфраструктуры от воздействия противника.

При реализации алгоритма управления потоки с (1) по (4) преобразуются функционалом объекта в последствия, для оценки которых введем три выходных потока.

Поток (5) – доставка КСр. Результаты применения арсенала, выражающие положительный эффект, – количество доставленных КСр. Следствием доставки КСр являются:

- выполнение (потенциальное выполнение) целевых задач, которое обеспечивается построенными орбитальными группировками космических аппаратов;
- положительный рост опыта подразделений арсенала;
- обеспечение обслуживания составляющих объекта с целью увеличения наработок на отказ.

Поток (6) – оставшийся потенциал по доставке КСр. Он характеризует следующие величины:

- остаток технического ресурса наземного технологического оборудования (НТО) вследствие его частичного износа;
- уровень накопления «усталости» подразделениями;

– оставшийся потенциал подразделений после частичного или полного разрушения НТО вследствие воздействия противника.

Поток (7) – суммарные затраты. Этот поток включает:

- ресурсы, затраченные на проведение цикла работ по доставке КСр, включая затраты на реализацию фондов ТО и ремонт оборудования (РО);
- ресурсы, затраченные на защиту инфраструктуры от воздействия противника;
- ресурсы, затраченные на обучение боевого расчета (БР);
- ресурсы, затраченные на содержание организационно-штатной структуры.

Возможности арсенала в произвольно выбранный момент времени могут быть описаны набором n параметров f_1, f_2, \dots, f_n , которые однозначно определяют его состояние.

К параметрам, определяющим состояние арсенала, можно отнести следующие:

- параметр, характеризующий обученность БР;
- параметр, определяющий «усталость» БР;
- параметр, определяющий максимальную обобщенную оценку надежности НТО;
- параметр, определяющий затраты на проведение цикла работ по доставке КСр и др.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ПРИМЕНЕНИЯ АРСЕНАЛА

Введем понятие вектора состояния НТО \bar{F} , представляющего собой вектор-строку, элементами которой являются параметры $f_i, i = 1 \dots n$:

$$\bar{F} = [f_1, f_2, \dots, f_n]. \quad (1)$$

Некоторую последовательность мероприятий, например проведение технического обслуживания и доставки КСр, назовем способом применения арсенала, а отдельное мероприятие в этой последовательности – шагом.

Таким образом, применение арсенала представляет собой алгоритм пошагового изменения вектора-строки способа применения арсенала следующего вида:

$$\bar{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m], \quad (2)$$

где μ_m – шаг.

Шаги выполняются последовательно и после выполнения очередного шага (например, выполнения технического обслуживания) соответствующим образом изменяются параметры арсенала (повышается технический ресурс объекта, увеличивается вероятность успешной доставки $P_{КСр}$, увеличиваются суммарные затраты ресурсов $A_{общ}$ на реализацию данного способа и т.д.).

Таким образом, каждый шаг μ_i показывает, как изменяется функциональная зависимость параметра, определяющего состояние арсенала, от определенного способа применения арсенала. Данная система функциональных зависимостей и будет представлять собой методический подход к выбору рациональных способов применения арсенала (рис. 2).

После реализации вектора-строки способа применения арсенала $\bar{\mu}$ он перейдет в конечное состояние, описываемое вектором:

$$\bar{F}_k = [f_{1k}, f_{2k}, \dots, f_{nk}]. \quad (3)$$

Методический подход к выбору рациональных способов применения арсенала может включать в себя комбинации некоторого ограниченного числа обобщенных видов мероприя-

тий, проводимых на арсенале (в рамках рассматриваемого подхода принято пять обобщенных видов мероприятий):

- 1) комплекс мероприятий по доставке КСр – $\mu_i = 1$;
- 2) комплекс мероприятий по поддержанию технической готовности НТО (ТО и РО) – $\mu_i = 2$;
- 3) проведение занятий по специальной, технической и комплексной подготовке БР с целью повышения его квалификации – $\mu_i = 3$;
- 4) проведение занятий с нештатными формированиями по защите инфраструктуры от воздействия противника – $\mu_i = 4$;
- 5) комплекс мероприятий по защите НТО и другой инфраструктуры арсенала от воздействия противника (наземный и воздушный противник) – $\mu_i = 5$.

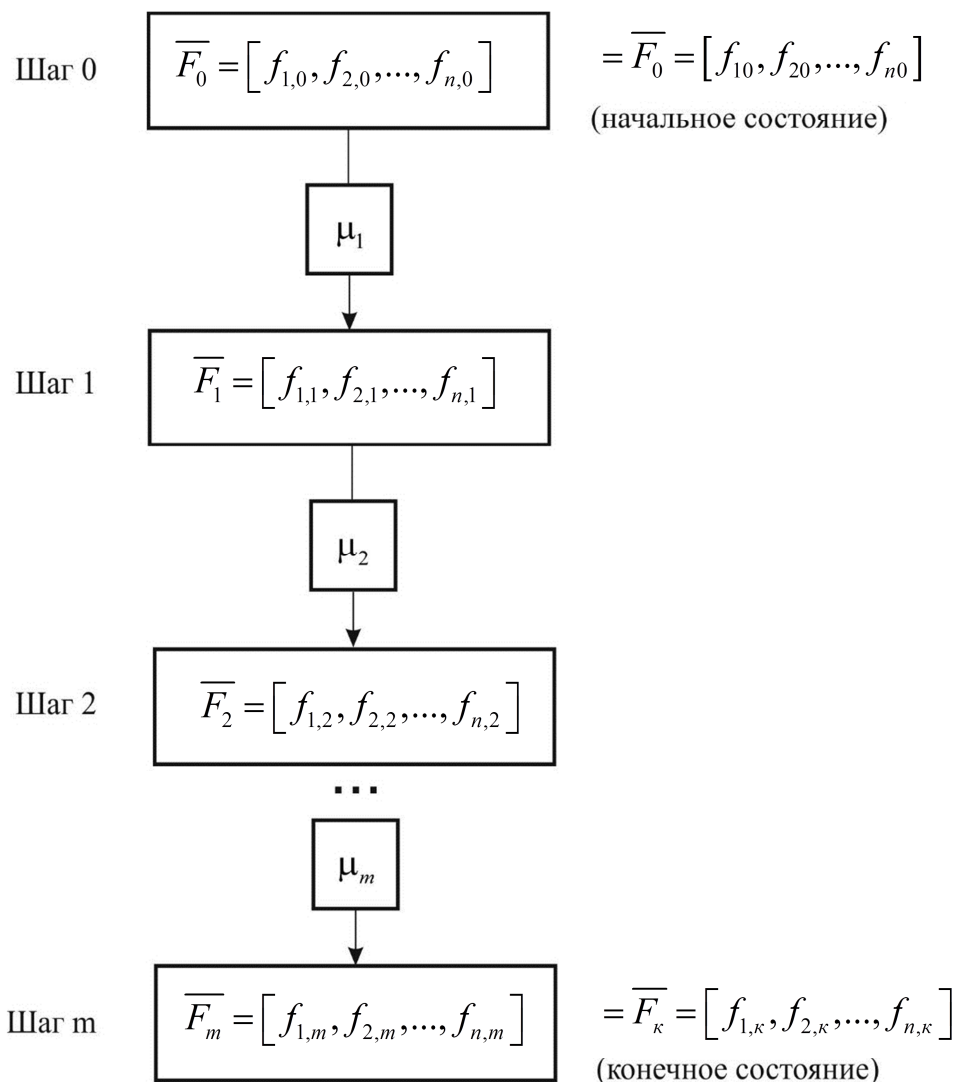


Рис. 2. Методический подход к выбору рациональных способов применения арсенала

В итоге вектор-строка способа применения арсенала, например вида $\bar{\mu}_i = [3, 4, 5, 2, 2, 1]$, будет предлагать следующую последовательность мероприятий:

– проведение занятий по специальной, технической и комплексной подготовке БР с целью повышения его квалификации;

- проведение занятий с нештатными формированиями по защите инфраструктуры от воздействия противника;
- комплекс мероприятий по защите НТО и другой инфраструктуры арсенала от воздействия противника (наземного и воздушного противника);
- проведение двух циклов комплекса мероприятий по поддержанию технической готовности НТО (ТО и РО);
- комплекс мероприятий по доставке КСр.

СУТЬ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ПРИМЕНЕНИЯ АРСЕНАЛА

В процессе моделирования применения арсенала в период непосредственной угрозы агрессии и военное время и с целью фильтрации полученных результатов использован принцип проведения сравнительного анализа различных способов применения по векторному показателю качества [3]. Использован метод прямого перебора и построения множеств, оптимальных по Парето [4], способов для различных интервалов планирования применения арсенала.

Метод поиска оптимальных по Парето решений многокритериальных задач, несмотря на многообразие известных методов, выбран потому, что:

- данный метод позволяет гарантированно избежать заведомо неоптимальных решений;
- обладает достаточными достоверностью и доступностью реализации;
- предоставляет лицу, принимающему решения, возможность гибкого управления сложными техническими системами.

В качестве векторного показателя использован двухмерный вектор $\{P_{\text{жср}}, A_{\text{общ}}\}$, так как множество векторных оценок способов ограничено и замкнуто, то существование оптимальных по Парето альтернатив гарантировано.

В качестве исходных данных рассматриваются результаты, полученные при многократном моделировании применения Арсенала:

$M_{\text{жср}}$ – математическое ожидание числа доставленных космических средств;

$A_{\text{общ}}$ – суммарные затраты на реализацию способа μ_i ;

μ_j – соответствующий способ применения арсенала;

$j = 1 \dots j_{\text{max}}$ – интервал изменения параметра j , где j_{max} – параметр, определяющий полноту полученного множества решений;

τ_i – максимальное время на реализацию соответствующего способа, что соответствует планируемому временному интервалу реализации способа. В качестве примера в табл. 1 представлена выборка значений исходных данных.

Суть методического подхода сводится к формированию множества $\Delta\{j\}$ оптимальных по Парето способов применения арсенала в период непосредственной угрозы агрессии и военное время для выбранного интервала времени планирования. Основу используемого принципа построения областей эффективных решений для задачи с векторной целью управления составляют перечисленные ниже свойства оптимальных по Парето решений.

1) Для любого решения, в него входящего, не существует никакого другого доминирующего решения (лучшего по всем показателям):

$$\forall j \in A_{\{j\}} \rightarrow j \in A_{\{j\}} : g_{\langle 2 \rangle}(j^*) > g_{\langle 2 \rangle}(j), \quad (4)$$

где $g_{\langle 2 \rangle}(j) = \{P_{\text{жср}}, A_{\text{общ}}\}$;

$\Delta_{\{j\}}$ – множество оптимальных по Парето решений;

$A_{\{j\}}$ – всё множество решений, в том числе и неоптимальных.

Таблица 1

Исходные данные при моделировании применения арсенала для интервала планирования 7 суток

Номер способа	Способ применения	Математическое ожидание числа доставленных космических средств	Суммарные затраты ресурсов, тыс. у.е.
№	μ_j	$M_{j_{\text{ксп}}}$	$A_{j_{\text{общ}}}$
1	45		800
2	455		1300
3	4554		1600
4	45544		1900
5	455441	0,836	19900
6	4554414	0,836	20200
7	45544143	0,836	20350
8	455441434	0,836	20650
9	4554414344	0,836	20950
10	45544143441	1,679	38950
11	455441434411	2,532	56950
12	4554414344111	3,392	74950
13	45544143441111	4,236	92950
14	455441434411111	5,056	110950
15	4554414344111111	5,853	128950
16	45544143441111111	6,627	146950
17	455441434411111113	6,627	147100
18	4554414344111111132	6,627	144454

2) При переходе от одного оптимального по Парето решения к другому по крайней мере один показатель должен улучшаться, а другой – ухудшаться (решения не доминируют друг над другом):

$$\forall j_q \in \Delta_{\{j\}} \text{ (and) } \forall j_p \in \Delta_{\{j\}} \rightarrow g_1(j_q) > g_1(j_p) \text{ (and) } g_2(j_q) < g_2(j_p) \text{ (or)} \quad (5)$$

$$g_1(j_q) < g_1(j_p) \text{ (и) } g_2(j_q) > g_2(j_p) = (\text{true}).$$

3) Решения, входящие в множество Парето, доминируют над остальными, в него не входящими:

$$\forall j \in A_{\{j\}} / \Delta_{\{j\}} \rightarrow \forall j^* \in \Delta_{\{j\}} : g_{(2)}(j^*) > g_{(2)}(j). \quad (6)$$

При формировании множества $\Delta_{\{j\}}$ оптимальных по Парето решений осуществляется равномерное зондирование множества всех решений $A_{\{j\}}$ с последующим выделением конечного подмножества эффективных альтернатив. Для этого выбирается альтернатива $g_{(2)}(x)$ и сравнивается попарно со всеми предыдущими $g_{(2)}(y)$, где $y < x$. При этом исключаются из множества $A_{\{j\}}$ худшие решения, т.е. решения, для которых выполняются следующие условия:

– исключается x :

$$P_{\text{ксп}} > P_{\text{уксп}} \text{ (and) } A_{\text{хобщ}} < A_{\text{уобщ}} ; \quad (7)$$

– исключается y :

$$P_{\text{ксп}} < P_{\text{уксп}} \text{ (and) } A_{\text{хобщ}} > A_{\text{уобщ}} . \quad (8)$$

Худшие альтернативы множества $A\{j\}$ помечаются. Затем из оставшихся альтернатив выбирается следующая и сравнивается со всеми предыдущими, в том числе и ранее помеченными альтернативами. После конечного числа шагов во множестве всех решений останутся только лучшие (не помеченные) альтернативы способов применения, оптимальные по Парето.

Из полученного множества оптимальных по Парето решений осуществляется выбор рационального способа применения арсенала лицом, принимающим решения, из области $\Delta_{\{j\}}$ в зависимости от конкретных обстоятельств и связанных с ними предпочтений.

Исходя из физического смысла построенной модели применения арсенала в период непосредственной угрозы агрессии и военное время размерность множества Парето $\Delta_{\{j\}}$ будет гораздо меньше размерности множества всех альтернатив $A_{\{j\}}$. Это существенно облегчает задачу выбора предпочтений лицом, принимающим решения.

Таким образом, разработанный авторами методический подход позволяет определять наилучшие способы применения арсенала для выбранного периода планирования, требуемой программы доставки или для располагаемых материальных ресурсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АРСЕНАЛА

Моделирование проведено с помощью программного продукта, реализующего представленную выше модель применения арсенала. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования применения арсенала для интервала планирования 7 суток

Номер способа, №	Способ применения	Вероятность успешной доставки КСр	Суммарные затраты ресурсов, тыс. у.е.
	μ_j	$P_{\text{ксп}}$	$A_{\text{общ}}$
1	45321	0,87	19400
2	32451	0,86	19200
3	4521	0,85	18900
4	3451	0,80	18750
5	521	0,78	18450
6	21	0,76	18150
7	1	0,74	18000

Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют, что наиболее эффективными способами применения арсенала в зависимости от вероятности успешной доставки КСр являются способы под № 1–7, при этом оптимальным способом по критерию $P_{\text{ксп}} \rightarrow \max$ является способ под номером один, а по критерию $A_{\text{общ}} \rightarrow \min$ – способ под номером семь. Очевидно, что вероятность успешной доставки КСр на 1 ГИК МО РФ существенно зависит от меро-

приятий по поддержанию технической готовности НТО и комплекса мероприятий по доставке КСр, что и приводит к ограничению исследуемого множества способов. Эти элементы в исследуемом факторном пространстве являются критическими и, следовательно, требуют к себе самого пристального внимания. Оставшиеся мероприятия по проведению занятий по специальной, технической и комплексной подготовке БР, с нештатными формированиями по защите инфраструктуры от воздействия противника, по защите НТО и другой инфраструктуры арсенала от воздействия противника важны, но могут проводиться в ограниченных масштабах.

В целом предложенный инструмент позволяет обеспечить рациональную процедуру выбора по параметрам: вероятность успешной доставки КСр $P_{\text{ксп}}$, суммарные затраты ресурсов $A_{\text{общ}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный методический подход к выбору рационального способа применения арсенала позволяет провести накопление результатов его применения при многократном моделировании и получить для каждого способа (для определенного интервала времени) векторный показатель качества, включающий в себя: вероятность успешной доставки КСр $P_{\text{ксп}}$ и суммарные затраты $A_{\text{общ}}$ на реализацию данного способа. Для фильтрации полученных результатов используется принцип проведения сравнительного анализа различных способов, которые выбираются методом прямого перебора для заданного интервала планирования. В зависимости от сложившихся условий применения подчиненного формирования лицо, принимающее решение, всесторонне оценив обстановку, учтя результаты моделирования применения арсенала, осуществляет выбор рационального способа.

Список используемых источников

1. *Петухов Г.Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов: в 2 ч. – МО СССР, 1989. – Ч. 1. – 635 с.
2. *Рыжиков Ю.И.* Алгоритмический подход к задачам массового обслуживания. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 496 с.
3. *Резников Б.А.* Системный анализ и методы системотехники: в 2 ч. – МО СССР, 1990. – Ч. 1. – 522 с.
4. *Минаков Е.П., Шафигуллин И.Ш.* Модели оценивания эффективности применения орбитальных группировок космических систем: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 88 с.

А.П. Вышинский;
А.А. Исупов;
А.В. Колесник,
кандидат военных наук;
А.В. Чарушников,
доктор военных наук, профессор

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ОРГАНАМИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКИ ВОЙСК (СИЛ)

Предложен актуальный подход к оценке космической обстановки органами управления группировки войск (сил) с учетом функциональных признаков, характеризующих действия воинских формирований. Приведено содержание практических задач оценки космической обстановки и на ее основе разработана структурно-функциональная схема действий должностных лиц органов управления. С учетом достаточной формализации изложенных информационно-аналитических задач является возможной реализация представленного подхода в форме специализированного программно-моделирующего средства поддержки принятия решений на применение войск и оружия в условиях использования противником космических средств различного целевого назначения.

Ключевые слова: космическая обстановка, космическое средство, информационно-аналитическая работа, функциональный признак, ранжирование, структурно-функциональная схема.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим этапом принятия решения на применение войск и оружия является оценка возможностей, которыми обладает противник. В условиях интенсивной интеграции космических средств в процессы функционирования боевых, информационных и управляющих сложных военно-технических систем представляется актуальной задача анализа космической обстановки, т.е. состава и возможностей орбитальной группировки зарубежных государств.

Необходимо отметить, что для оценки возможностей космических систем информационного обеспечения в целях подтверждения заявленных тактико-технических характеристик достаточно широко используются отечественные и зарубежные специализированные средства математического и программного обеспечения [1, 2].

Например, на комплексах средств автоматизации центров управления Вооруженных сил Российской Федерации установлено аттестованное и принятое на вооружение специальное программное обеспечение, позволяющее выполнять моделирование базовых задач применения космических средств. Для критически важных элементов программ осуществляется совокупность мероприятий программно-алгоритмического обеспечения с целью поддержания моделей и алгоритмов в состоянии, гарантирующем автоматическое или автоматизированное решение функциональных задач, надежное управление средствами вооружения и устойчивый информационный обмен с взаимодействующими комплексами и системами [2]. При этом на должностных лиц возлагаются задачи алгоритмизации и программирования новых актуальных военно-технических и вспомогательных задач.

Оценка космической обстановки имеет в своей основе непрерывный процесс добывания и анализа органами управления детальной и достоверной информации о действиях космических средств информационного обеспечения противника и характере их влияния на выполнение задач группировкой войск (сил). Цель оценки космической обстановки состоит в информационно-аналитическом обеспечении принятия решений командованием группировки войск (сил) на

изменение организации действий подчиненных формирований с учетом возможностей космических средств противника [1–3].

Содержательно для всесторонней оценки космической обстановки необходимы следующие знания:

- достоверная информация о текущем и прогнозируемом составе космических средств информационного обеспечения противника;
- полная информация о функциональных признаках, сопровождающих действия войск, и их распределении во времени на отдельные формирования;
- информация об оперативно-тактических возможностях орбитальной группировки и тактико-технических характеристиках бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) противника по вскрытию конкретных признаков, сопровождающих действия войск и применение оружия.

Достижение указанной цели при соблюдении приведенных условий обеспечивается решением таких задач, как [3]:

- разработка расчетной информации о текущей и прогнозируемой трассовой обстановке для КА противника, устанавливающей картину покрытия зонами обзора (наблюдения, связи и навигации) объектов базирования объединения с указанием времен покрытия зоной обзора соответствующего типа КА противника конкретного района дислокации;
- разработка информации о множестве признаков действий войск (сил), проявление которых совпадает во времени и пространстве с интервалом времени покрытия зоной обзора космических средств конкретных районов дислокации элементов оперативного построения группировки войск (сил);
- разработка аналитической информации о характере влияния вскрываемых космическими средствами противника признаков на процессы выполнения войсками (силами) задач: о временной задержке процессов подготовки и выполнения целевых задач, о запрете отдельных операций и (или) режимов их выполнения, о запрете выполнения целевой задачи и др.

По функциональной принадлежности разработка расчетной и аналитической информации, обеспечивающей оценку космической обстановки, относится к сфере ответственности и действий штабов формирований группировки войск (сил).

Вместе с тем содержательная сторона процесса разработки расчетной и аналитической информации по оценке космической обстановки принципиально определяет следующее:

- перечисленные выше задачи как задачи штабов для конкретных подразделений по оценке космической обстановки;
- предполагаемую последовательность действий таких подразделений штабов по формированию предложений в решение командования на изменение режимов выполнения задач подчиненными им частями.

Таким образом, содержательный смысл разработки расчетной и аналитической информации для оценки космической обстановки обуславливает необходимость наличия в составе штабов объединений группировки войск (сил) подразделений, функционально ориентированных на выполнение указанных выше действий.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧ ОЦЕНКИ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Сосредоточимся на более детальном изучении содержательной стороны действий подразделения штаба по оценке космической обстановки в предположении о том, что такое изучение позволит выявить как сам характер действий, так и последовательность их выполнения, а следовательно, позволит обобщенно представить контуры методического подхода к оценке космической обстановки. Для удобства изложения предположим, что указанное подразделение имеет в своем составе баллистический сектор, сектор анализа, учета и формализации функци-

ональных признаков, а также сектор оценки степени влияния вскрываемых признаков на процесс выполнения задач воинскими частями объединения.

Основной задачей баллистического сектора является формирование расчетной информации о трассовой обстановке в районах дислокации частей объединения. Расчет трасс полета выполняется для КА противника не менее чем на сутки вперед по исходным данным о параметрах их движения, получаемым из системы контроля космического пространства (СККП). Знание трассовой обстановки необходимо для построения картины покрытия зонами информационного обеспечения космических средств противника районов дислокации частей и соединений группировки войск (сил).

Построение трассы полета КА для известных начальных условий движения КА не представляет вычислительной сложности, однако информация о прогнозируемой трассовой обстановке, даже на сутки вперед, по всем КА противника может оказаться плохо обозримой для анализа и подлежит усечению по условиям выбора трасс [4].

Условия выбора трасс формируются в баллистическом секторе подразделения и принципиально должны включать:

- государственную принадлежность КА;
- принадлежность КА к конкретному типу (наблюдение, связь, навигация и др.);
- факт пересечения трассой КА районов дислокации или зон радиовидимости воинских формирований группировки войск (сил);
- моменты начала и конца покрытия зоной обзор КА районов дислокации или зон радиовидимости воинских частей и др.

Усеченная таким образом информация о трассовой обстановке преобразуется в информацию о пространственно-временной структуре покрытия районов дислокации (зон радиовидимости) отрезками трасс с принадлежащими им зонами обзора и маркированных по государственной принадлежности КА и его принадлежности к соответствующему виду информационного обеспечения. Построение пространственно-временной структуры покрытия (назовем ее картиной покрытия) является основным результатом действий баллистического сектора и одновременно основой для дальнейших действий подразделения штаба по оценке космической обстановки.

На рис. 1 приведены примеры построения пространственно-временных структур покрытия зонами обслуживания космических систем различного целевого назначения.

Информация о картине покрытия может оформляться текстуально в терминах специализированного донесения начальнику подразделения по оценке космической обстановки или, для наглядности и удобства дальнейшего анализа, на географических (топографических) картах, содержащих структуру базирования частей объединения и обобщенные геометрические размеры их районов дислокации (зон радиовидимости).

Картина покрытия может разрабатываться и отдельно для каждого вида информационного обеспечения противника. Как текстовая, так и картографическая форма представления пространственно-временной структуры (картины) покрытия должны быть отнесены к категории информационно-справочных документов управления действиями группировки войск (сил).

Основная задача сектора анализа, учета и формализации функциональных признаков состоит в формировании пространственно-временной структуры их проявления (существования) при выполнении задач.

Для решения основной задачи в секторе формируется база данных о признаках, сопровождающих действия воинских формирований. База данных создается в результате анализа технологических циклов функционирования специализированных комплексов и средств, применяемых отдельными подразделениями.

В базу данных включаются:

- временная последовательность проявления функциональных признаков на интервале длительности циклов применения комплексов вооружения группировки войск (сил);

– параметрическое описание функциональных признаков, определяющее возможность их вскрытия противником.

Фактически такая база данных представляет собой постоянно поддерживаемый специалистами сектора динамический каталог функциональных признаков и их параметров.

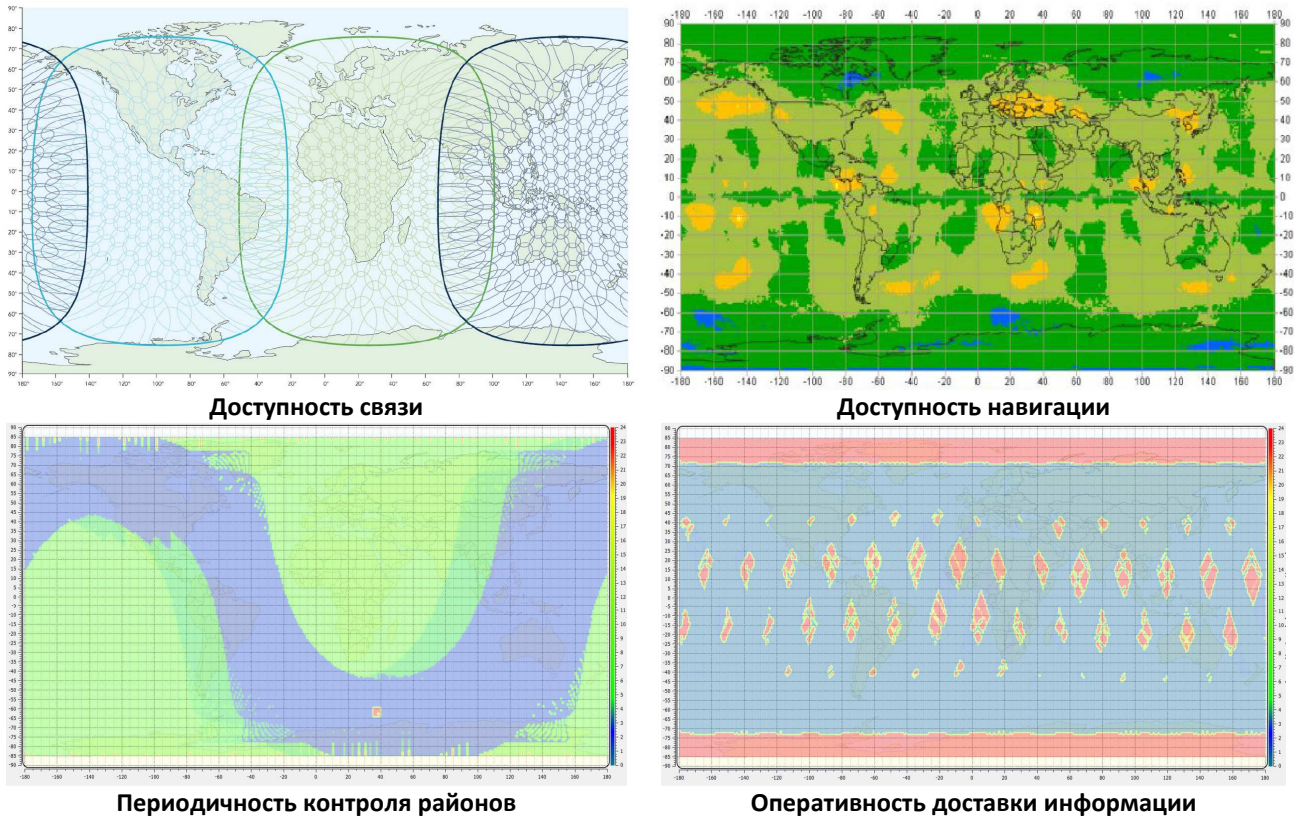


Рис. 1. Примеры построения пространственно-временных структур покрытия зонами обслуживания космических систем

Второй массив исходных данных, необходимых для построения пространственно-временной структуры проявления функциональных признаков, заключен в плане действий частей и подразделений на предстоящие сутки.

Из плана действий воинских формирований выбирается информация о задействованных комплексах и средствах, а также времени проведения и длительности работ.

Полученная информация формализуется до вида, удобного для размещения ее в каталоге функциональных признаков, откуда затем извлекаются те признаки, которые сопровождают действия воинских частей в планируемые сутки.

На основе каталогизированной информации о функциональных признаках для каждого района дислокации воинских частей объединения на планируемые сутки формируется легенда, содержащая в себе список признаков с временным распределением их проявления и виды космических средств противника, способных вскрыть факт проявления каждого функционального признака.

Совокупность таких легенд для известной системы базирования объединения определяет пространственно-временную структуру проявления функциональных признаков, сопровождающих действия сил и средств объединения в планируемые сутки, и возможность их вскрытия космическими средствами противника. Одновременно как отдельная легенда, так и их совокупность на планируемые сутки относятся к категории информационно-справочных документов управления действиями группировки войск (сил).

Специалисты сектора анализа, учета и формализации функциональных признаков на основе картины покрытия уточняют содержание легенд и по количеству проявляющихся признаков, и по их вскрываемости на интервале покрытия зоной обзора КА противника.

Уточненные по содержанию легенды проявления и вскрываемости функциональных признаков прилагаются к картам, отображающим картину покрытия районов дислокации группировки войск (сил) соответствующим КА противника, и в такой совокупности представляют собой информационно-справочный документ более высокого уровня информативности, пригодный для завершающего анализа.

Завершающий анализ полученной информации выполняется в секторе оценки степени влияния вскрываемых КА противника функциональных признаков на процесс выполнения задач группировкой войск (сил). Основной задачей сектора является разработка предложений командованию объединений для принятия решения на изменение режима действий подчиненных частей при подготовке и выполнении ими задач по предназначению. Для разрешения этой задачи сектор должен располагать информацией о ранжировании функциональных признаков по их значимости в определении конечной цели действий группировки войск (сил). Это может быть некоторая шкала проявления и значимости функциональных признаков, построенная для принятой на вооружение номенклатуры комплексов и средств вооружения.

Располагаемая информация о картине покрытия и пространственно-временной структуре вскрываемости функциональных признаков противником позволяет выполнить процедуру ее пересечения с информацией о ранжированности (приоритетности скрытия) признаков и тем самым определить группу (группы) последних по их значимости для определения конечной цели действий в предстоящие сутки.

По величине индекса значимости функциональных признаков в секторе выполняется оценка таких факторов, как:

- необходимость временных задержек процессов выполнения задач воинскими частями и подразделениями;
- необходимость запрета на выполнение отдельных операций и (или) режимов их выполнения;
- необходимость перепланирования действий воинских частей и подразделений;
- необходимость запрета на выполнение целевой задачи на конкретном интервале времени предстоящих суток и др.

Полученные оценки оформляются в виде предложений в решения командований объединений, содержащие в зависимости от величины индекса значимости мероприятия, либо изменяющие режимы действий воинских частей, либо не изменяющие их.

Итак, действия по оценке космической обстановки должны выполняться специальным подразделением штаба объединений [2, 3].

По своему содержанию действия указанного подразделения сосредоточены на решении таких задач, как:

- разработка баллистической информации о картине покрытия;
- разработка информации о пространственно-временной структуре проявления функциональных признаков и информации о влиянии вскрываемых космическими средствами признаков на процессы выполнения целевых задач формирований объединения.

Разнородность расчетно-аналитической информации, требующейся для оценки космической обстановки, определяет необходимость концентрации усилий по ее разработке в специализированных структурных единицах подразделения штаба, таких как:

- баллистический сектор;
- сектор анализа, учета и формализации функциональных признаков;
- сектор оценки степени влияния вскрываемых признаков на процессы выполнения задач формированиями группировки войск (сил).

Исследование содержательной стороны информации, разрабатываемой секторами подразделения по оценке космической обстановки, позволяет определить:

- конкретные задачи для каждого из них;
- возможную форму, содержание и категорию документов, результирующих завершение действий соответствующего сектора;
- содержание и последовательность действий секторов при решении задач.

По своей совокупности полученные результаты формируют концепцию структуры и содержания методического подхода к решению задач оценки космической обстановки в органах управления группировки войск (сил).

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ О ПОРЯДКЕ ДЕЙСТВИЙ ДОЛЖНОСТНЫХ ЛИЦ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ

Алгоритм действий должностных лиц органов управления при оценке космической обстановки может быть формализован на основе приведенных выше результатов анализа.

Действительно, информационно-аналитическая работа по оценке космической обстановки концентрируется в штабе воинского формирования и, в частности, в подразделении штаба объединения по оценке космической обстановки. Информационно-аналитическая работа подразделения завершается разработкой проекта приказа (распоряжения) командира (начальника) объединения на изменение режимов действий подчиненных частей.

Предлагаемая структурно-функциональная схема действий основных должностных лиц объединения по реализации результатов оценки космической обстановки представлена на рис. 2.

Начальник штаба докладывает проект приказа (распоряжения) командиру объединения и после его утверждения командиром проект приказа (распоряжения) приобретает ранг приказа (распоряжения) – основного документа управления, доводится командиром подчиненных частей для безусловного исполнения. Одновременно свое решение командир объединения докладывает командующему группировкой войск (сил).

С получением приказа командира объединения в соединениях штабы разрабатывают приказы на изменение режимов выполняемых задач. После утверждения командирами соединений приказ доводится до начальников дежурных смен с определенной степенью детализации. Свое решение командиры частей докладывают командирам соединений, а в процессе исполнения приказа представляют доклады о факте и времени выполнения предписанных действий.

Таким образом, замыкается цикл управленческих действий основных должностных лиц объединения, связанный с решением задачи оценки космической обстановки и ее влияния на изменение характера действий частей при выполнении задач по их предназначению. Структурно этот цикл соответствует типовому циклу действий при принятии решений (оформление предложений, доведение до исполнителей, получение информации об исполнении), однако содержательная сторона приведенного выше цикла управленческих действий сугубо специфична, так как несет в себе мероприятия, так или иначе ухудшающие процессы выполнения задач соединениями и воинскими частями.

Более того, оценка эффективности разработанных мероприятий существенно затруднена как из-за отсутствия непрерывного контроля космического пространства, так и из-за наличия фактора неопределенности оценок возможностей его космических систем и средств. С этой точки зрения разрабатываемые подразделением по оценке космической обстановки предложения, связанные с изменением режимов выполнения задач формирования объединения, должны быть высоко достоверными и адекватными, так как имеют фундаментальную значимость для принятия правильного решения органами управления.

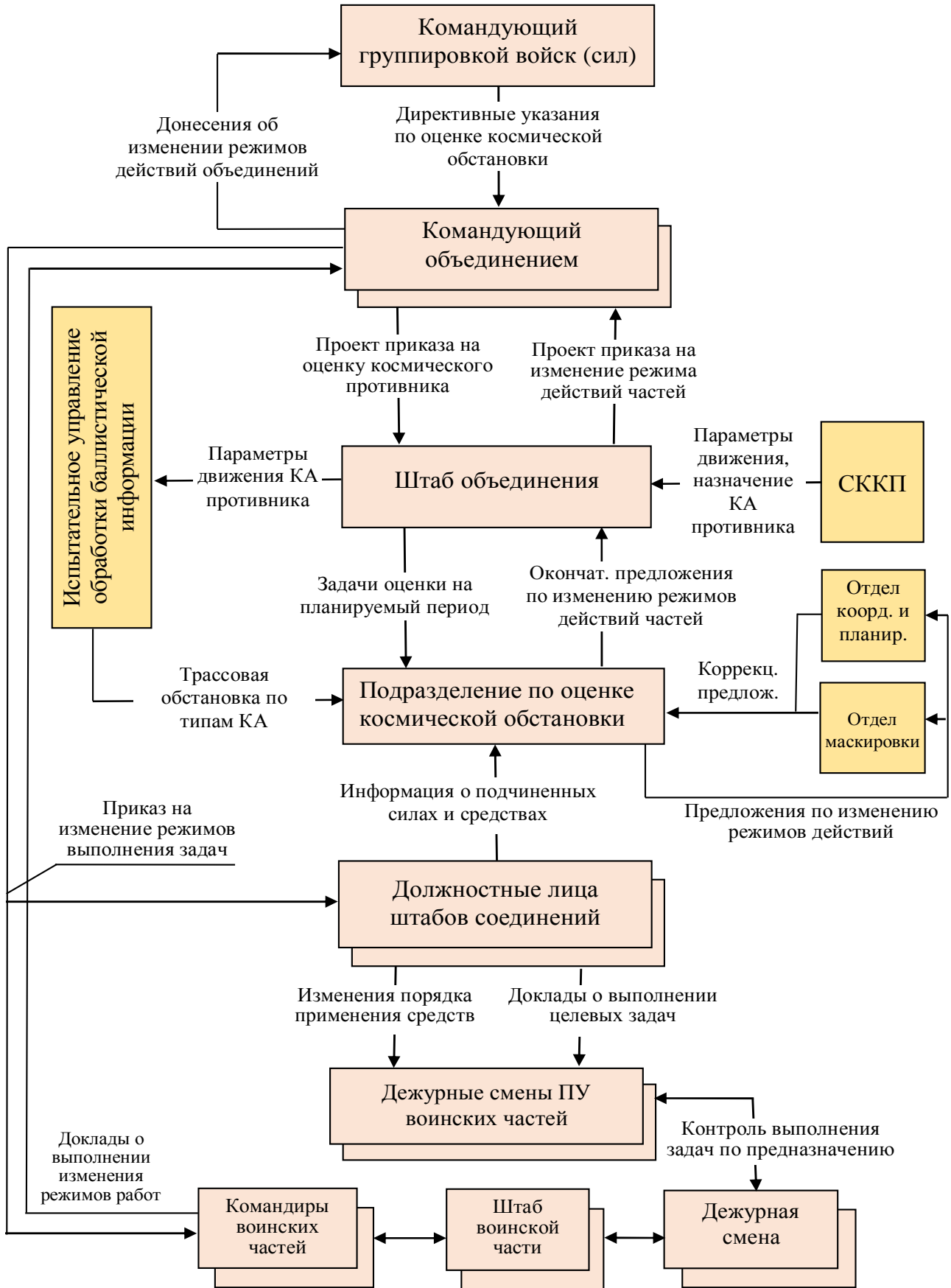


Рис. 2. Структурно-функциональная схема действий основных должностных лиц и органов объединения по оценке космической обстановки

Для выработки корректных предложений в решение командующего группировкой войск (сил) на изменение режимов выполнения задач подчиненными воинскими формированиями подразделение штаба по оценке космической обстановки должно располагать достоверной и полной исходной информацией.

В указанном подразделении штаба накапливается, хранится и постоянно корректируется достоверная информация о функционировании комплексов вооружения, необходимая подразделению штаба по оценке космической обстановки для формирования каталога функциональных признаков, их ранжирования по значимости на заданных интервалах времени.

С этой точки зрения создаваемые специализированные информационные банки данных являются ключевым элементом информационного обеспечения действий по оценке космической обстановки и должны быть доступны для подразделения по оценке космической обстановки в требуемом объеме.

В структуре Вооруженных сил Российской Федерации основным носителем актуальной и достоверной координатной и некоординатной информации о КА зарубежных стран, их назначении и государственной принадлежности, необходимой для организации действий подразделения по оценке космической обстановки, является СККП. Указанная информация получается с использованием высокоточных специализированных измерительных и информационных средств в различных диапазонах отраженных и собственных излучений зарубежных КА.

Информация о параметрах движения КА и их назначении является другим ключевым фактором информационного обеспечения действий подразделения по оценке космической обстановки, она позволяет получить расчетную трассовую обстановку и на ее основе составить картину пространственно-временного покрытия объектов и районов их дислокации. Для выполнения расчетных задач в условиях дополнительных допущений и ограничений моделирования космических средств может привлекаться подразделение обработки баллистической информации соединения управления отечественными КА, находящееся в организационной структуре космических войск Воздушно-космических сил.

Таким образом, по носителям исходной информации и ее содержанию для решения расчетно-аналитических задач контур информационного обеспечения действий подразделения штаба по оценке космической обстановки можно считать замкнутым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В совокупности управленческий, информационный и исполнительный контуры по своей структуре, устоявшейся номенклатуре должностных лиц и строгой направленности их функционирования, определяемой специализированными документами по результатам оценки космической обстановки, и составляют структурно-функциональную схему действий основных должностных лиц органов управления группировкой войск (сил).

В строгом понимании структурно-функциональная схема действий основных должностных лиц по реализации результатов оценки космической обстановки не является алгоритмом, так как не несет в себе конкретное описание процедур, устанавливающих правила выполнения тех или иных действий. Однако она определяет сам факт действий, их конечный результат, избирательность конечного результата действий по принципу подчиненности и с этой точки зрения может восприниматься как первое приближение к построению алгоритма действий.

В заключение отметим, что действия по предложенной структурно-функциональной схеме должны выполняться в соответствии с постоянно действующими директивными указаниями Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации и командующего группировкой войск (сил) по оценке космической обстановки и разрабатываемыми на их основе приказами органов управления воинских формирований.

Список используемых источников

1. Военная системотехника и системный анализ / под ред. Б.В. Соколова. – СПб.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 496 с.
2. Направления внедрения технологий моделирования космических систем и средств в комплексах средств автоматизации центров управления Вооруженных Сил Российской Федерации / А.П. Вышинский, А.В. Колесник, Э.М. Халиков и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. № 667. – С. 80–86.
3. Задачи Воздушно-космических сил. – URL: <https://structure.mil.ru/structure/forces/vks/task.html> (дата обращения: 20.01.2020).
4. Оружие и технологии России. XXI век: энциклопедия. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2002. – Т. 5: Космические средства вооружения. – 704 с.

Andrianov A.S., Vecherkin V.B., Cvetkov A.Y. A method of planning optimal coverage of the location areas the service areas of mobile lidar complexes for ecological monitoring // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 8–16.

We consider the problem of integer programming optimal coverage of the territory areas of review in environmental monitoring using mobile lidar complex "Smuglyanka 1L". On the basis of the theory of schedules the method of application of these complexes in the conditions of dynamic restrictions of artificial and natural character, and also restrictions and the area of coverage by a review zone is offered.

Key words: integer programming, scheduling theory, dynamic programming, dynamic constraints.

Ledjankin I.A., Nesterenko O.E., Platonov S.A. Modification of the simplex method for solving problems of optimization information structures, computational tasks that are implemented by means of automated monitoring systems for space and ballistic objects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 17–24.

It is shown that the main indicator of efficiency affecting the quality of tasks by means of automated monitoring systems of space and ballistic objects is the performance of computing facilities that process radar information. The urgency of the problem of optimization of the information structure of the parallel program implementing the algorithm of information processing is reflected.

Modifications of the table simplex method based on the position of unimodularity of the simplex table of coefficients for free variables corresponding to the system of restrictions on the optimality of the plan of operations of the computational problem are proposed. The developed algorithm allows to reduce the computational complexity of obtaining the optimal solution for the General linear programming problem given by a simplex table with unimodular coefficients.

Key words: computer system, computing system, optimization, parallel computing, scheduling, information processing, parallel programs.

Kotyashov E.V. Functioning model of space monitoring system orbital segment in geostationary orbit // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 25–32.

The article provides a description of the functioning model of the system orbital segment for monitoring space in geostationary orbit. The presented model can be used, as a tool for substantiating the ballistic structure and the quantitative composition space monitoring system orbital segment.

Key words: geostationary orbit, space debris object, space monitoring system, spacecraft, warning of dangerous situations.

Kotyashov E.V., Kuvaev O.L., Charushnikov A.V. Adaptive planning method for applying of the space monitoring system orbital segment in the dynamic task prioritization // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 33–40.

The article proposed an approach to planning the applying of the space monitoring system orbital segment, intended for the technical diagnostics of orbital objects with changing priorities. Example of the implementation of the proposed method is given.

Key words: distribution task, space monitoring system, resource accumulation center, spacecraft, orbital object.

Abasina E.S., Busygin A.V., Odoevsky S.M. Substantiation of bandwidth requirements for communication channels for video traffic in multiservice networks for special purposes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 41–47.

The substantiation of the requirements for the bandwidth of communication channels for video traffic with the property of self-similarity in packet switching devices of multiservice special-purpose networks taking into account the controlled degree of self-similarity of input traffic is considered.

Key words: video traffic, self-similar traffic, quality of service.

Analysis of possibilities of using geostationary satellite-transmitters to solve the tasks of radiomonitoring / S.N. Agievich, R.D. Gall, A.H. Keliyun, V.E. Kononov, S.G. Potapov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 48–59.

The article considers the issues of radio monitoring of land and sea sources of radio emissions using satellite transponders located in a geostationary orbit. The fundamentals of radio monitoring technology and the main tasks that can be solved in the interests of monitoring the radio-electronic situation in maritime directions are determined. The principles of processing information obtained using satellite transponders are proposed.

Key words: radio monitoring, repeater satellite, determination of the location of radio emission sources, control of the electronic environment.

Belov P.Y., Bolotov E.A., Martyanov A.N. Mathematical model for generating bit errors in digital images when transmitting over a radio channel with interference // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 60–69.

The article describes a mathematical model for generating bit errors in digital images when transmitting over a radio channel with interference, which allows us to link the noise level in the communication channel with the number and location of errors in order to further determine the measure of distortion of decompressed raster graphics. The types of distributions of random variables that characterize the number and location of errors in the compressed data, as well as measures of image distortion, are justified.

Keywords: compression, images, errors, distortion, noise, radio channel.

Belov P.Y., Dyakonov V.Y., Martyanov A.N. Modified method of truncated block encoding of images using the third initial moment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 70–76.

The article investigates the possibility of using the third initial sample moment of a random pixel value to determine the threshold and quantization levels when compressing digital bitmaps using truncated block encoding. Using a measure of the peak signal-to-noise ratio, the quality of the compressed image was evaluated in comparison with the original for modifications of the algorithm with two and three moments.

Key words: compression, images, errors, distortion, noise, quantization.

Bulekbaev D.A., Likhachev V.M. Calculation of beam-geometrical optical angular characteristics of electromagnetic fields excited by radiotransparent wedge-shaped objects of radar // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 77–87.

The article presents a method and algorithm for calculating the beam-geometrical optical angular characteristics (polar angles) of the electromagnetic fields of plane electromagnetic waves diffraction reflected and refracted by the faces of radiotransparent wedge-shaped structures.

The basis of the computational algorithm is a system of recurrence equalities, based on the representation of the solution of the corresponding boundary-value diffraction problem in form of the Sommerfeld integral with its subsequent reduction to a system of functional equations for auxiliary meromorphic functions of a complex variable for constructing the indicated recurrence system.

Key words: radiotransparent wedge, Sommerfeld integral, geometrical optical angular characteristics, reflected electromagnetic waves, refracted electromagnetic waves, meromorphic functions, recursive equality system.

Burlakov S.O., Klimov I.S., Tsvetkov K.Y. Frequency distribution of the communication repeater when operating earth stations with partial channels // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 88–91.

There are efficiency and features of the frequency distribution of communication repeater's transponder with direct retranslation for military purposes in the paper. The earth station's structure with partial channels is offered. It allowed to increase the frequency application coefficient of the communication repeater and to raise radio link's noise immunity. Decisions of information flow frequency distribution by partial channels while ensuring channel's power balance in amplifier are represented here.

Key words: frequency distribution of the communication repeater, earth station, partial channel, dividing the information flow, power distribution of the amplifier.

Viktorov E.A., Ivanin A.N., Kanaev A.K. Technique of the sustainability of special purpose transport communication network functioning ensuring in the context of the implementation of network and computer attacks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 92–101.

A technique of the integral sustainability index of special purpose transport communication network functioning ensuring in the context of the implementation of network and computer attacks has been developed. Events, allowing to provide the required level of sustainability by increasing the object and network survivability in conditions of network and computer attacks are identified.

Key words: technique, algorithm, integral sustainability index, reliability, survivability, special purpose transport communication network functioning, coefficient of operational readiness.

Ivanin A.N., Kanaev A.K., Muravtsov A.A. Model of special purpose transport communication network functioning process in the context of the implementation of computer attacks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 102–109.

In the article considered the model of the process of functioning of the transport communication network of special purpose in the conditions of implementation of computer attacks aimed at gaining access to the infrastructure. Probabilistic-temporal characteristics are obtained that allow to investigate the influence of the parameters of the intruder's input actions on the performance of the network, expressed in the time spent on overcoming the corresponding measurements and levels of infrastructure protection using GERT procedure.

Key words: model, GERT procedure, probabilistic-temporal characteristics, topological transformation of stochastic networks method.

Klymenov V.V., Sakhno V.I., Sakhno D.I. Comparative analysis of the efficiency use of neural network detectors of marine objects on radar images // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 110–120.

The paper provides a brief overview of modern approaches to the detection of marine objects in radar images, considers options for constructing automatic detectors of such objects based on deep convolutional neural networks, analyzes existing datasets of marine objects radar images, provides the necessary training parameters for single-stage architectures of neural network detectors, comparative testing is performed and the quality of trained automatic detectors is evaluated.

Key words: synthetic aperture radar, ship detection, convolutional neural network, deep learning, complex background.

Konyukhovskiy V.S., Simonov A.N. Synthesis of polarization direction finding algorithm of interfering radiosignals // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 121–130.

Polarization direction finding algorithm has been synthesized for using in multiple-beam and multiple-signal environment. Algorithm synthesis bears on spatial properties of the figure arisen from additive composition of electro-magnetic fields from different radiosignal sources at in-plant triorthogonal aerial array. Algorithm synthesis based on projection of resulting radiosignal on arbitrary scanning vector.

Key words: polarization direction finding, interfering radiosignals.

Myslivtsev T.O., Pavsky V.F., Tsykunov V.N. Analysis of the influence of the Doppler effect on the characteristics of the pulsar time scale of a geostationary spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 131–138.

In the context of the development of GNSS GLONASS, an important issue remains the improvement of ephemeris-time support tools and system. One of the direction that allows us to improve the characteristics of the navigation system is create a high-precision reference point for frequency and time in space.

The technological approach requires the introduction of frequency standards into orbit, whose characteristics must be constantly maintained at a level comparable to ground-based synchronizers. Another option for creating a high-precision frequency and time reference isto use natural cosmic radio sources, such as pulsar.

When forming a pulsar time scale on Board a geostationary spacecraft, it is necessary to take into account many effects that introduce errors in the formation of the scale.

The article deals with the influence of the Doppler effect on the accuracy of the pulsar time scale formation, which occurs due to the movement of the spacecraft in orbit both relative to the pulsar and relative to the Earth.

Key words: ephemeris-time support, spacecraft, pulsar, time scale, Doppler effect.

The model for creating standards of photographic images of terrain objects using digital orthophotoplanes based on the aggregation of information aerial photography from unmanned aerial vehicles and aerial laser location data / O.S. Alexeev, V.I. Gustchin, S.A. Maslennikov, I.A. Nikolaev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 139–147.

The model is proposed for creating standards of photographic images of terrain objects of digital orthophotoplanes based on the integration of aerial survey information from unmanned aerial vehicles and aerial laser location data, based on the operational-time model of the system for creating digital maps and photo documents. The qualitative characteristics of reference photo images used in interactive decryption software systems are substantiated. The advantages of a method for creating photo-image standards based on digital orthophotoplanes based on aerial photography from unmanned aerial vehicles and aerial laser location data are determined.

Key words: digital orthophoto reference imagery, aerial photography, drone photos, aerial laser ranging.

Alekhin S.G. Shot-term forecasting method for the total number of clouds // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 148–157.

It is known that a short-term forecast of the total number of clouds is made on the basis of factors of their formation, evolution and dispersion. The forecast relies on the use of actual data on the spatial distribution of cloudiness at the initial time and their changes over the past period, the relationship of changes in cloudiness with air masses, fronts, and baric formations is studied. When forecasting cloud cover, account must be taken of the terrain conditions, the time of year, and the diurnal course of the atmosphere. In other words, the cloud forecast is closely related to the forecast of the synoptic position.

In the absence of aerological and synoptic material, cloud forecasting is possible only by physico-statistical methods, among which the most preferred method of probable inertial forecasting in the practice of aviation meteorological support today.

The author offers an alternative to this method – a short-term forecasting method for the total number of clouds, which is based on taking into account the variability of such a meteorological factor characterizing the state of the sky as a dew point deficit.

Key words: cloud forecast, total number of clouds, dew point deficit, probabilistic forecast.

Astapovich A.V., Kolesnikov D.D. Justification of the method of joint equalization of satellite and ground measurements // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 158–168.

The article presents the results of surveys of the method of equalization of geodetic networks in the spatial geocentric coordinate system. The methods of construction of parametric models of equalized values in the geocentric reference system and calculation of covariance matrices of their errors are given. Disclosed method of composing the parametric equations of the ground-based measurements in a geocentric coordinate system. From the standpoint of the maximum likelihood method and the theory of solving incorrect problems the principle is substantiated of optimal estimation of the parameters of geodesic construction and the parameters of reduction quantities. The method of joint equalization of measurements in geodetic constructions is theoretically grounded, conclusions and proofs are given. A principal algorithm for solving problem of the regularized equalization is proposed.

Key words: parametric model of measurements, the principle of equalization of geodetic networks, equalization of satellite geodetic networks, parametric equations of correction, covariance matrix, topocentric horizontal coordinate system, spatial geocentric reference system.

A method of organizing processing and storage of hydrometeorological information using «BIG DATA» / I.A. Gotur, A.N. Meshkov, M.Y. Rud, I.A. Yaremenko // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 169–175.

The article deals with approaches to the organization of the hydrometeorological information, as well as ways to improve the speed of requests to it. To consider advantages and disadvantages of relational and non-relational data models as applied to work with hydrometeorological information.

Key words: store data technologies, relational data model, big data, NoSQL data model, MongoDB.

Approach to the assessment of security of communication objects based on models of functioning of web applications / V.A. Ovcharov, A.S. Podshibyakin, I.A. Ushakov, A.F. Shinkarenko // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 176–187.

The paper presents an original approach to security testing of web applications, based on a method that allows you to reuse the accumulated penetration experience based on the studied

application model. This testing is considered as the main form of monitoring the stability of communication objects to targeted influences on the web server, which allows you to assess the level of security of network infrastructure objects.

Key words: audit of communication objects, information security, web application security, model for testing security.

Features of mathematical modeling of the process of creating dispersed barrage screens to protect areal objects / A.V. Antropova, V.A. Davidchuk, V.V. Kozlov, A.V. Lagun // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 188–194.

The results of mathematical modeling of the processes of formation and functioning of disperse screens for the protection of area objects in the areas of dislocation of rocket and space complexes, as well as the assessment of the dynamics of their formation and development are presented. The algorithm of mathematical modeling of the process is developed. As a result, the formulas for calculating the dispersed formation are present and proposals for their practical application are made.

Key words: dispersed formation, dispersed phase, continuum mechanics, two-phase medium, mathematical model.

Arseniev V.N., Petuhov A.B., Trofimov I.A. Correction of Hypotheses Probabilities about Technical Conditions of the Military Technology Product in the Course of its Operation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 195–201.

The correction problem of estimations of technical conditions probabilities, which can change in the course of operation of military technology product, is considered. The idea of higher priority of the operative data of the product supervisions over the estimations of the technical conditions probabilities, received at the previous stages, is used. The importance coefficients of the aprioristic and skilled data are entered under formation of the posterior probabilities estimations. It is shown that unlike the Bayesian approach the offered method does not allow the aprioristic information to dominate over the representative skilled data and, as consequence, reduces risk of acceptance of the erroneous decision. The received results it is advisable to use under the development and realization of risk-focused management of operation process of military products, under planning of necessary volumes of spare parts, tools and accessories, definition and correction of periods of maintenance service of military product.

Key words: the military technology product, technical conditions, weight coefficients, the priority of the skilled data, posterior estimations.

Bulekbaeva M.Y., Denisov A.M., Zhitnyy M.V. A procedure for determination of a spacecraft depressurization spot coordinates based on disturbing force // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 202–208.

A procedure for determination of a spacecraft depressurization spot coordinates in relation to a fixed frame of reference is proposed. The procedure is intended for analyses of emergency conditions leading to a spacecraft kinematic movement parameters alteration and for determination of causing the alteration disturbing force point of application.

Key words: depressurization, spot coordinates, spacecraft.

Burmistrov V.V., Dorofeev N.A., Kuzmichev Y.A. A method of aktive suppression of vibrations of elastic elements of the spacecraft structure based on the use of a resonant filter in the contour of the angular stabilization system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 209–215.

The issues related to the application of methods of suppressing vibrations of elastic elements of the spacecraft structure are considered. A method of active suppression of elastic vibrations of spacecraft remote elements in order to increase the efficiency of reorientation in one plane is proposed. The mathematical modeling of the process of suppressing elastic vibrations of the structure is carried out, the results of numerical studies are presented.

Key words: spacecraft, large antenna, the system angular stabilization, resonant filter.

Normal averaging method and its application to vibration processes / D.S. Vavilov, E.S. Groshikov, E.L. Lebedev, P.P. Rymkevich // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 216–222.

In the present paper the question of carrying out the averaging procedure, playing an important role in various physical and technical problems, is considered. Averaging of dynamic equations leads to modifications in the type of motion. The aim of this article consists in determining additional forces arising due to the averaging procedure. It is shown that the use of the weight function, i.e. averaging kernel in the form of the Gaussian distribution, can significantly simplify the averaging problem. The application of the method to vibration processes is considered as an example. An explicit expression for additional forces arising as a result of averaging is obtained.

Key words: vibration processes, averaging procedure, heat conduction equation, ring with unity, Gaussian distribution.

Vlasov S.A., Kubasov I.Y. Substantiation of orbits parameters the spacecraft, equipped by radio-locating complex, for review the whole surface of the Earth // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 223–230.

Happens to the substantiation and results of the calculation orbits parameter the spacecrafts, equipped by radio-locating complex for review of the whole surfaces of the Earth.

Key words: spacecraft, system of spacecraft, semi apex angle of onboard equipment, band of the review, nearly synchronous orbits, global review.

Gera V.I., Kalmykov E.V., Pudikov V.V. Method of forming the optimal amount of work to maintain the readiness of engineering systems of space forces objects, taking into account their technical condition // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 231–238.

In this paper, the authors solve the problem of forming the optimal volume of control actions to maintain the readiness of engineering systems (TS). To achieve the desired result, the vehicle was analyzed as a service object. As a result of the analysis, elements of the system with a level of reliability below the required level are assigned to a separate group, for which service modes are formed in the future, taking into account their actual state. In particular, it determines what works can be performed on these elements and what forces and means of the technical support system will be required for this purpose. To determine the list of necessary works, an analysis of the functional scheme considered by the vehicle is performed, during which the functional and degradation characteristics of the system elements are determined, and the significance (weight) of each element in the system is determined. The analysis of the functional scheme of the vehicle is performed using the functional-topological method.

As a result of this work, the data obtained are summarized in a table, which in future studies will serve as a tool for experts involved in the formation of the optimal amount of work taking into account the actual technical condition of the vehicle.

Key words: failure, repair, control actions, technical support, technical systems, operation, graph, matrix, reliability indicators.

Gnatyuk V.I., Dorofeev S.A., Kivchun O.R. Model electricity consumption management in the operation of military infrastructure // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 239–244.

The article deals with a mathematical model of power consumption management in the operation of military infrastructure. A distinctive feature of the model is the use of vector rank analysis to describe the main structural relationships between the main elements of the power management process and the sequence of formation of specific tasks, as well as to implement the synthesis of rank analysis procedures.

Key words: military infrastructure object, vector rank analysis, power consumption management, operation, C-indicator, complex indicator of system properties.

Golovchinsky V.O., Milyaev I.K., Tarasov A.G. Comparative analysis of devices and methods for diagnosing electrical cable systems involved in the implementation of technological processes for the preparation and launch of space rockets // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 245–251.

The article presents the characteristic causes of failures in electrical cable systems for preparing and launching space rockets. Disadvantages of devices used for monitoring the state of electric cable systems for preparing and launching space rockets are presented. In the article described methods for diagnosing electric cable systems using various algorithms for switching electrical circuits. A method for improving diagnostic devices for electrical cable systems is proposed.

Key words: electrical cable systems, switching, circuit integrity, disconnection resistance.

Structure justification technique electric energy generation system the condition of ensuring maximum power generation in conditions of incomplete and uneven illumination of the panels of the spacecraft's solar battery: Scenarios approach / V.I. Gorbulin, N.V. Radionov, A.I. Ratushnyak, G.B. Steganov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 252–263.

The mathematical aspects of substantiating the rational structure of the spacecraft's power generation system (SCE) are considered under the condition of ensuring maximum power generation in conditions of incomplete and uneven illumination of the panels of the spacecraft's non-planar solar battery. As a result, a methodology was developed for substantiating the structure of the HEEE with the possibility of optimizing the number of points of summing the powers of elementary generators and, accordingly, the number of extreme controllers in the HEEE.

Key words: spacecraft, electric energy generation system, solar battery, extreme power regulator, mathematical formulation of the problem, structure justification technique.

Gorshkov L.K., Severenko A.V., Urtminceva I.A. Technique of definition of the intense deformed condition of covers of tight compartments of spacecrafts // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 264–272.

Typical problems of calculating forces in thin shells of spacecraft compartments are considered. The analysis of the possibility of using various methods to solve these problems. The membrane technique for determining the shell forces is shown. It is necessary in some cases to take into account the transverse bending moment, as well as the transverse and longitudinal forces of the shell. Cylindrical shells are proposed, as well as in multilayer shells with a honeycomb dome, spherical, conical and cylindrical made for a cylindrical approximate calculation of the B. force efforts of the filler.

Key words: momentless technique, moment technique, flying section, and tangential apparatus, thin shell, latitudinal meridional forces, multilayer shell, meridional cellular and filler, normal and tangential forces and stresses.

Gravchenko Y.A., Grankin B.K., Kozlov V.V. Private indicators of the level of competence development by a specialist in the operation of rocket and space technology // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 273–280.

The urgency of solving the problem of determining the quantitative values of indicators of the level of development of competence (competencies) by specialists in the operation of rocket and space technology is justified. A list of specific indicators of the level of competence development by a specialist in the operation of rocket and space technology is defined. The problem of ranking private indicators of the level of competence development by a specialist in the operation of rocket and space technology on the basis of expert assessments is solved. The task of aggregating indicators of the level of competence development by a specialist in the operation of rocket and space technology is formulated.

Key words: model, subject of operation, competence, operation, ranking, private indicator of the level of development of competence, aggregated (integral) indicator of the level of development of competence.

Gravchenko Y.A., Kozlov V.V., Chirva S.V. Ergatic aspect of information support of the life cycle of rocket and space technology products // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 281–288.

A variant of the formalized organization operating rocket and space technology is proposed. In order to formalize the concept of competence, it is proposed to consider competence as a library of algorithms that contains algorithms for official participation in operational processes. A variant of constructing a graph of the hierarchical structure of the operating organization is proposed. A set of mathematical models of the software complex of the automated life cycle management system for objects of rocket and space technology is considered.

Key words: life cycle, life cycle management, competence, algorithm, objects of rocket and space technology, operation.

Dyakov A.N., Kokarev A.S., Pachin A.V. Method of selecting parameters of the system of replenishment of a multiproduct set of spare parts // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 289–298.

The publication presents a method that, in combination with the model presented in [1], allows us to justify the parameters of the optimal system for providing a multi-component set of RF. Optimality is achieved by choosing the location and composition of RF sets that provide the required reliability indicators with minimal resource intensity of operational processes.

The novelty of the method is determined by the use of an algorithm for searching for non-dominant alternatives, which is adapted to the problem of substantiating the optimal system for providing spare parts for a sample of weapons and ensures the efficiency of solving the optimization problem for a model with a large number of variables. The article shows the results of testing the methodology for justifying the choice of the optimal option for building a system for providing spare parts in terms of alternative locations and the composition of sets of spare parts for critical nomenclatures.

Key words: inventory assurance system; spare parts, tools and accessories; forming a set of spare parts; optimal set of spare parts; sufficiency of spare parts; readiness of spare parts.

Zotkim M.Y., Mironov V.I., Shushakov A.O. Algorithm terminal multi-stage stabilization of the first spacecraft when the angular support of the orbital object with a single area enable the manager of a jet engine // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 299–306.

An algorithm for discrete terminal stabilization of program motions of a dynamically asymmetric service spacecraft at the orbital object tracking sites with one section of the control jet engine (URD) activation is presented, when angular motion control proceeds through three channels simultaneously. Numerical simulation was carried out, which showed that the angular deviations from the program values reach the maximum values in the region of the maximum relative angular velocities of the line of sight.

Key words: service space vehicle, orbital facility, stabilization, the parameters of Rodrigues – Hamilton, a multi-step method.

Kryzhanovskiy V.I., Trofimov I.A. Accounting for cross-links in a two-circuit tracking system for aiming an optoelectronic device at a target // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 307–315.

A two-circuit tracking system has been developed for turning the turntable on which the optoelectronic device (OEP) is located. Aiming the optical axis of the OEP at the target is performed by simultaneously turning the platform in azimuth and turning the OEP relative to the platform in height. The influence of cross-links between contours on the quality of transients is studied. A solution in continuous and discrete versions is proposed to eliminate the influence of cross-links in order to improve the quality of transients with simultaneous reversals of the platform and the OES.

Key words: Mathematical model of movement, aiming at the target, cross-connection, two-circuit tracking system, quality of the transition process.

Maltsev G.N., Sklemin D.V. A Mathematical Model of Failures Identification Process of Electronic Systems Used Continuous Acquisition and Life Cycle Support // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 316–325.

The Markov model of failures identification process of the radio-electronic system taking into account technologies of continuous acquisition and life cycle support (CALStechologies) is developed. The model is based on a formalized description in the state space of the procedure of sequential fault finding in the hierarchical structure of the radio-electronic system formed by its division into structural elements. The developed model allows to determine the average time of identification (recognition) of failures in the absence and using information support of operational processes based on CALStechologies. The results of calculations of the readiness factor of the radio-electronic system at different values of the average time of failure identification are presented. In the considered conditions, the use of CALStechologies in the operation of electronic systems allows to reduce the average time of recognition of unidentified failure by an order of magnitude.

Key words: radio-electronic systems, CALS, failure rate, state graph, failure identification, readiness factor.

Sudar Y.M., Scherbakov V.I., Yulina A.O. The passive gravitational stabilization of the spacecraft in the geostationary orbit // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 326–335.

Based on the analysis of the force fields in the geostationary orbit (GEO), opportunities of native means launch vehicles and analysis of principles of operation existing systems of passive gravitational stabilization systems (SPGS), the new scheme SPGS was established. In this scheme the booster module is considered to be gravitational ballast that is connected to the gravitational barbell of the spacecraft by the long tether. The results of calculation and analysis of ballistic scheme of the system deployment into the functioning position on the GEO were presented and also the assessment of the main characteristics of SPGS.

Key words: geostationary orbit, the system of passive gravitational stabilization, booster module, ballistic scheme of deployment.

Modern aviation simulators as a means of continuous training of aviation specialists / M.L. Belokopytov, A.P. Grigoriev, G.I. Kozyrev, A.V. Kokorev, Y.S. Ovchinnikova // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 336–346.

The process of end-to-end continuous training of aerospace specialists in the context of the activity (competence) approach is considered. The main problems that arise when using elements of information technology in the implementation of training systems are indicated. The classification and brief description of aviation simulators are given. A number of hypotheses have been put forward that can be used as the basis for designing an aircraft simulator equipped with a distributed expert system that serves as an optimal electronic instructor.

Key words: Simulator, aviation complex, training system.

Guzenko V.L., Paukov A.B. On role and importance of information security in the process of military service security // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 347–353.

The publication based on the results of research work on the problems of ensuring the security of military service substantiates the need, taking into account the discipline "Fundamentals of information support of military activities and public relations" introduced since the 2019/2020 academic year, to consider information security as an independent type of security of military service.

Key words: information security, security of military service, threats to national security.

Erofeev A.V., Katicik V.O., Pokidov L.V. Proposals for the method of application of computer information technologies on tactical-special education with cadets of academy graduation courses // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 354–359.

The article considers the proposals on the methodology for using tactical and special exercises with cadets of graduating courses of computer information technology based on the local computer network of the academy's training command posts.

Key words: tactical and special exercises, combat control group, command and control laws, making decision, computer information technologies.

Prorok V.J., Timofeev A.V., Shaimuhametov S.I. The use of the apparatus of fuzzy sets to justify the requirements for professionally important qualities of military specialists // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 360–369.

The results of numerical modeling and experimental research on the use of methods of conducting professional graphic analysis of the activities of military specialists of early warning radar stations based on a fuzzy correlation analysis of professionally important qualities, competencies and functional tasks during the performance of official duties are presented.

Key words: profессиography, correlation analysis, fuzzy sets.

Repyakh N.A., Hrustova A.N. Value relation in architectonic pedagogical activity // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 370–375.

The publication is devoted to the issue of value attitude to pedagogical activity in a military university. The attention is focused on the value relation, which in modern conditions is a kind of indicator of readiness for the teacher's professional activities.

Key words: pedagogical activity, architectonics, value attitude, motivational-target component, substantive-procedural component, emotional-moral component, motivation, orientation, values of pedagogical activity.

Gusev N.N., Kucherenko A.O. Improvement of the pulse method for excitation of string vibrations of string converters by applying an exciting pulse in the form of a semi sine wave // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 376–381.

The article is devoted to improving the pulse method of excitation of string vibrations of string pre-educators. The article describes the General principles of building automated systems for monitoring technical condition based on the use of string converters. The methods of excitation of string vibrations of string converters that are currently used are described. Solutions of wave equations for excitation of string vibrations by single rectangular and trapezoidal force pulses in time, as well as by an infinite series of trapezoidal pulses in time, are given. The disadvantages of the given forms of excitation pulses are indicated and ways of eliminating the disadvantages are described. Based on the General solution of the wave equation of string vibrations, the wave equation for the amplitude of string vibrations excited by a force pulse in the form of a semi-sine wave in time is solved. The moment of time for the excitation of the next force pulse is determined and the wave equation for determining the amplitude of string vibrations excited by an infinite series of force pulses in the form of a semi-sine wave in time is solved. Based on the results obtained, the article proposes to improve the secondary equipment for detecting string vibrations of string converters.

Key words: string converter, device for excitation of string vibrations, free vibrations, "request" pulse, harmonics, vibration amplitude, phase shift.

Method of estimating the probability of a strike hits of the enemy's conventional weapons in stationary objects military infrastructure targets / O.A. Yerokhin, C.A. Machnev, D.V Surin., A.M. Shevchuk // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 382–389.

This paper presents a new good theory and methods for analytical solution of the problem of probability estimation striking hits of the enemy's conventional weapons into the protective structures of coatings stationary objects-targets of military infrastructure in the context of modern warfare.

Key words: conventional weapons, high-precision weapons, special fortifications structures, rebound, probability of defeat.

Kalmykov E.V., Pudikov V.V. Energy saving measures in air conditioning systems during construction and reconstruction of buildings and structures // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 390–394.

The requirements for managing the air heating subsystem in air conditioning systems when implementing energy-saving air treatment modes during the construction of new and reconstruction of existing buildings and structures are given. A conceptual and functional algorithm for controlling the air heating subsystem is presented.

Key words: energy saving in construction, heat exchangers, energy-saving air treatment modes, air heating subsys-tem.

Methodological approach to the selection of rational ways to use the VCS Arsenal / A.N. Atarshikov, A.P. Danelyan, B.D. Kazakhov, A.A. Stepannikov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 395–402.

The article presents a methodological approach to the selection of rational ways to use the VCS Arsenal. The method of direct iteration and construction of sets of Pareto-optimal methods for various intervals of planning the use of the Arsenal is used. To filter the results obtained, the principle of comparative analysis is used. The article substantiates the use of a methodological approach to solve the problem of choosing a rational way to use the VKS Arsenal during the immediate threat of aggression and wartime.

Key words: methodological approach, method of application, solving multi-criteria problems, Arsenal ASF.

Substantiation of a methodological approach to the assessment of the space situation by the command and control units of a group of troops (forces) / A.P. Vishinskiy, A.A. Isupov, A.V. Kolesnik, A.V. Charushnikov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 672. – P. 403–411.

The article proposes an actual approach to the assessment of the space situation by the command and control units of troops (forces), taking into account the functional features characterizing the actions of military units. The content of the practical tasks of assessing the space situation is given and on its basis a structural-functional scheme of actions of officials of the governing bodies is developed. Given the sufficient formalization of the stated information-analytical tasks, it is possible to implement the presented approach in the form of a specialized software-modeling means of decision support for the use of troops and weapons in the conditions of use by the enemy of space vehicles for various purposes.

Key words: space environment, space vehicle, information and analytical work, functional attribute, ranking, structural and functional diagram.

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

Агиевич Сергей Николаевич, начальник отдела ООО НПП «Новые Технологии Телекоммуникаций» (195256, Россия, Санкт-Петербург, ул. Софьи Ковалевской, 20, кор. 1, лит. А); старший научный сотрудник, доктор технических наук; тел.: 8 (812) 244-33-16, e-mail: info-service@nppntt.ru

Алексеев Олег Станиславович, начальник 74-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 261-87-71.

Алёхин Сергей Григорьевич, докторант 52-й кафедры 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: 2670368@rambler.ru

Андрианов Антон Сергеевич, адъюнкт 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931) 242-67-14, e-mail: meteo62250-1@mail.ru

Антропова Александра Владимировна, младший научный сотрудник 133-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 593-53-25, e-mail: alex.antro@mail.ru

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

Атарщиков Александр Николаевич, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 252-94-31, e-mail: ageschwindigkeit@yandex.ru

Белов Павел Юрьевич, докторант Военной академии РВСН имени Петра Великого (143900, Россия, Московская обл., г. Балашиха, ул. Карбышева, 8); кандидат технических наук; тел.: 8 (916) 873-96-47.

Белокопытов Марк Львович, начальник лаборатории – старший бортовой оператор 463-й лаборатории 46-го отдела 4-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (977) 170-33-19, e-mail: Hommer1990@mail.ru

Болотов Евгений Андреевич, вице-президент АО «Международный концерн космической связи «КОСС» (125315, Россия, Москва, ул. Часовая, 28, стр. 4); кандидат технических наук; тел.: 8 (916) 983-00-00.

Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович, заведующий 111-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: atiman@mail.ru

Булекбаева Марина Юрьевна, младший научный сотрудник 123-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: vka@mil.ru

Бурлаков Сергей Олегович, профессор кафедры спутниковой связи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 907-79-34, e-mail: SO-Burlakov@yandex.ru

Бурмистров Владимир Владимирович, преподаватель 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21, 8 (981) 168-57-14.

Бусыгин Александр Васильевич, адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); тел.: 8 (960) 266-37-99, e-mail: television341@mail.ru

Вавилов Дмитрий Сергеевич, преподаватель 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (904) 514-90-53.

Вечеркин Валерий Борисович, начальник 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (911) 920-40-02, e-mail: cau@yandex.ru

Викторов Евгений Александрович, преподаватель 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 798-87-71, e-mail: 9817988771@mail.ru

Власов Сергей Александрович, доцент 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Вышинский Андрей Павлович, соискатель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); командующий 15-й армией Воздушно-космических сил (особого назначения); тел.: 8 (812) 347-96-21.

Галл Роман Данилович, заместитель начальника отдела ООО НПП «Новые Технологии Телекоммуникаций» (195256, Россия, Санкт-Петербург, ул. Софьи Ковалевской, 20, кор.1, лит. А); тел.: 8 (812) 244-33-16, e-mail: info-service@nppntt.ru

Гера Василий Иосифович, начальник 4-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 833-41-13, e-mail: geratv33@mail.ru

Гнатюк Виктор Иванович, профессор кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики ФГБОУ ВО КГТУ (236000, Россия, Калининград, Советский пр-т, 1); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 451-93-68, e-mail: mail@gnatukvi.ru

Головчинский Владимир Орестович, научный сотрудник 14-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (985) 564-70-33.

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 (812) 347-95-22, e-mail: v_gorbulin@mail.ru

Горшков Лев Капитонович, профессор 114-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 694-33-86, e-mail: manev@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@mail.ru

Гравченко Юрий Анатольевич, докторант 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 347-95-14, e-mail: juraGR2025@yandex.ru

Гранкин Борис Константинович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: borisgrankin@yandex.ru

Григорьев Александр Павлович, начальник проектно-конструкторского сектора АО «КБ Арсенал имени М.В. Фрунзе» (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3АВ (КБ «Арсенал»)); тел.: 8 (962) 722-91-68, e-mail: alexgrig-1986@mail.ru

Грошиков Евгений Сергеевич, помощник начальника учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 092-14-91.

Гузенко Виталий Леонидович, профессор 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 969-87-83.

Гусев Николай Николаевич, старший преподаватель 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 958-42-90, e-mail: goussev_nn@mail.ru

Гущин Валерий Игоревич, начальник учебно-лабораторной базы 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 789-72-32.

Давидчук Виктор Александрович, адъюнкт 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 165-31-05, e-mail: david_lxii@mail.ru

Данелян Александр Петрович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат

Денисов Андрей Михайлович, докторант 1-го управления 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: vka@mil.ru

Дорофеев Никита Андреевич, курсант 241-й учебной группы 2-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Дорофеев Сергей Алексеевич, начальник кафедры засекречивающей аппаратуры связи филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» (236036, Россия, Калининград, Советский пр-т, 82); кандидат технических наук; тел.: 8 (962) 250-65-94, e-mail: dorofeev1973@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) 347-97-35, e-mail: Dyakoval@yandex.ru

Дьяконов Виталий Юрьевич, президент АО «Международный концерн космической связи «КОСС» (125315, Россия, Москва, ул. Часовая, 28, стр. 4); тел.: 8 (916) 336-56-76.

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 (911) 981-21-74.

Ерохин Олег Анатольевич, адъюнкт 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (967) 176-63-77.

Житный Михаил Владимирович, старший научный сотрудник 123-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, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Зоткин Максим Юрьевич, преподаватель 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Иванин Андрей Николаевич, адъюнкт кафедры военных систем многоканальной, электропроводной и оптической связи Военной академии связи имени Маршала Советского Со-

юза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); тел.: 8 (921) 082-80-04, e-mail: andreivanin@gmail.com

Исупов Александр Анатольевич, старший 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 (969) 722-81-07.

Казахов Батраз Джумаевич, начальник 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 252-94-31, e-mail: vkakaf@yandex.ru

Калмыков Евгений Витальевич, адъюнкт 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 263-95-36, e-mail: ek9112639536@yandex.ru

Канаев Андрей Константинович, профессор кафедры военных систем многоканальной, электропроводной и оптической связи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 927-93-43, e-mail: kanaevak@mail.ru

Кацик Владимир Олегович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 447-55-09.

Кельян Андрей Хазарович, заместитель директора ООО НПП «Новые Технологии Телекоммуникаций» (195256, Россия, Санкт-Петербург, ул. Софьи Ковалевской, 20, кор. 1, лит. А); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 244-33-16, e-mail: info-service@nppntt.ru

Кивчун Олег Романович, старший преподаватель кафедры засекречивающей аппаратуры связи филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» (236036, Россия, Калининград, Советский пр-т, 82); кандидат технических наук; тел.: 8 (905) 242-51-52, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Клейменов Виктор Владимирович, главный научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 964-07-44, e-mail: klevik2014@yandex.ru

Климов Иван Сергеевич, помощник начальника учебного отделения учебного центра Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); тел.: 8 (981) 881-80-15, e-mail: kuroyogu@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

Козырев Геннадий Иванович, профессор 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 217-33-99, e-mail: gen-kozyrev@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) 347-97-35, e-mail: askokarev@gmail.com

Кокорев Андрей Валерьевич, начальник лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 828-65-62, e-mail: vka@mil.ru

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 Денис Дмитриевич, 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, 8 (951) 684-32-82, e-mail: vka-onr@mil.ru, kolesnikovdd@mail.ru

Коновалов Владимир Евгеньевич, начальник радиотехнической службы Главного штаба ВМФ (194362, Россия, Санкт-Петербург, Южковское шоссе, 8, кор. 2, кв. 88); кандидат военных наук; тел.: 8 (915) 421-46-45, e-mail: znrtu@rambler.ru

Конюховский Владимир Самуилович, профессор 3-й кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); кандидат физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (812) 247-98-35, e-mail: konyukhovsky@yandex.ru

Котяшов Евгений Валериевич, докторант 2-го управления 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 (Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 310-66-37.

Кубасов Игорь Юрьевич, старший преподаватель 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16, 8 (911) 969-33-45.

Куваев Олег Леонидович, адъюнкт 21-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-21.

Кузьмичев Юрий Алексеевич, доцент 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Кучеренко Александр Олегович, адъюнкт 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 958-19-80, e-mail: kucher_90@bk.ru ×

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) 347-95-11.

Ледянкин Иван Александрович, старший преподаватель 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: lion13834@mail.ru

Лихачёв Владимир Михайлович, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: foldmar@yandex.ru

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: georgy_maltsev@mail.ru

Мартьянов Анатолий Николаевич, профессор 37-й кафедры Военной академии РВСН имени Петра Великого (143900, Россия, Московская обл., г. Балашиха, ул. Карбышева, 8); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (903) 681-11-09.

Масленников Сергей Александрович, начальник 7-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (909) 587-05-52.

Мачнев Сергей Александрович, доцент 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 004-01-02.

Мешков Алексей Николаевич, преподаватель 52-й кафедры 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

Миронов Вячеслав Иванович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел. 8 (812) 347-95-21.

Миляев Илья Константинович, инженер-испытатель войсковой части 75117 (1-й ГИК МО РФ) (164170, Россия, г. Мирный, Архангельская обл.); тел.: 8 (921) 482-48-29.

Муравцов Алексей Александрович, начальник кафедры военных систем многоканальной, электропроводной и оптической связи Военной академии связи имени Маршала Совет-

ского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (981) 170-18-20, e-mail: vsmeos@yandex.ru

Мысливцев Тимофей Олегович, профессор 36-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

Нестеренко Олег Евгеньевич, преподаватель 84-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (931) 543-01-19, e-mail: benaffee@mail.ru

Николаев Илья Александрович, адъюнкт 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 884-24-98.

Овчаров Владимир Александрович, начальник 31-го отдела – заместитель начальника управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-59.

Овчинникова Юлия Сергеевна, инженер 2-й категории расчетно-испытательного сектора АО «КБ Арсенал имени М.В. Фрунзе» (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3АВ (КБ «Арсенал»)); тел.: 8 (965) 774-71-26, e-mail: yuliya-ovchinnikova-1995@mail.ru

Одоевский Сергей Михайлович, профессор кафедры сетей связи и систем коммутации Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 319-85-78, e-mail: odse2017@mail.ru

Павский Владислав Филиппович, преподаватель 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

Пауков Александр Борисович, профессор 108-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (981) 170-44-50.

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

Петухов Андрей Борисович, преподаватель 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (196634, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 790-94-39.

Платонов Сергей Александрович, заместитель начальника 95-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: platonov_sa178@mail.ru

Подшибякин Александр Сергеевич, младший научный сотрудник 342-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-59.

Покидов Леонид Викторович, старший преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (921) 782-24-85.

Потапов Сергей Григорьевич, генеральный конструктор ООО НПП «Новые Технологии Телекоммуникаций» (195256, Россия, Санкт-Петербург, ул. Софьи Ковалевской, 20, кор. 1, лит. А); старший научный сотрудник, кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 244-33-16, e-mail: info-service@nppntt.ru

Пророк Валерий Ярославович, профессор 95-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 841-34-95, e-mail: val_prorok@mail.ru

Пудиков Вячеслав Валентинович, старший преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 562-41-94, e-mail: pudikov1@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

Ратушняк Александр Иванович, доцент 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: sgb022.steganov@yandex.ru

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

Рудь Мария Юрьевна, преподаватель 52-й кафедры 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

Рымкевич Павел Павлович, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 224-59-13.

Сахно Виктор Игоревич, адъюнкт 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 762-24-03, e-mail: po4tamt@protonmail.com

Сахно Дмитрий Игоревич, адъюнкт 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 762-24-03, e-mail: po4tamt@protonmail.com

Северенко Александр Викторович, адъюнкт 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812)347-96-12; e-mail: severenko.al@yandex.ru

Симонов Алексей Николаевич, докторант 43-й кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 247-98-35, e-mail: sanmail-box@yandex.ru

Склемин Дмитрий Владимирович, начальник 532-й лаборатории, старший научный сотрудник 53-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) 347-95-32, e-mail: dv_sklemin@mail.ru

Стеганов Геннадий Борисович, доцент 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: sgb022.steganov@yandex.ru

Степанников Алексей Алексеевич, слушатель офицерских курсов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 252-94-31, e-mail: vkakaf@yandex.ru

Сударь Юрий Михайлович, доцент 114-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: sudar@fromgu.com

Сурин Дмитрий Васильевич, профессор 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (933) 248-41-11.

Тарасов Анатолий Геннадьевич, заместитель начальника 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-26.

Тимофеев Алексей Владимирович, адъюнкт 95-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931) 221-92-92, e-mail: alexonwork@gmail.com

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.

Уртминцев Игорь Александрович, доцент 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: urt_eg@mail.ru

Ушаков Илья Алексеевич, начальник 342-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) 347-97-59.

Хрустова Алена 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 Александр Юрьевич, доцент 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 763-56-12, e-mail: cau@yandex.ru

Цветков Кирилл Юрьевич, профессор 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 947-19-58, e-mail: wavelet3@mail.ru

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

Чарушников Александр Валерьевич, начальник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-21.

Чирва Сергей Витальевич, преподаватель 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: chirva82@yandex.ru

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); тел.: 8 (911) 192-87-59, e-mail: 28_172@mail.ru

Шевчук Андрей Михайлович, старший научный сотрудник 451-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 911-46-92.

Шинкаренко Антон Фёдорович, начальник 363-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) 347-97-59.

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 (812) 347-96-20.

Щербаков Валерий Иванович, заведующий 114-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka114@mail.ru

Юлина Анна Олеговна, старший преподаватель 114-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: parfenova19761976@mail.ru

Яременко Иван Андреевич, адъюнкт 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, 8 (963) 311-49-26, e-mail: vka-onr@mil.ru

Абдурахимов Алексей Александрович, начальник 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-12.

Абсалямов Дамир Расимович, начальник 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; 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, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 217-03-39.

Алешкин Андрей Петрович, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-31.

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; тел.: 8 (911) 218-23-57.

Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович, заведующий 111-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-07.

Ватугин Михаил Алексеевич, доцент 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-58.

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

Доронин Александр Павлович, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: doronin52@mail.ru

Калинин Владимир Николаевич, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, 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, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-44.

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 (911) 964-08-60, e-mail: dmitrii_kargu@mail.ru

Киселев Алексей Николаевич, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент.

Козинов Игорь Александрович, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 278-16-58, e-mail: garry-spb@yandex.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; 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Лоскутов Андрей Иванович, начальник 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-70, e-mail: rk@viek.ru

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: georgy_maltsev@mail.ru

Мысливцев Тимофей Олегович, профессор 36-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

Новиков Владимир Александрович, профессор 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор.

Новиков Евгений Александрович, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: novikov.evgen.alex@yandex.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

Онуфрей Андрей Юрьевич, ведущий научный сотрудник 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Павлов Александр Николаевич, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 259-71-53, e-mail: pavlov62@list.ru

Садин Дмитрий Викторович, профессор 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: sadin@yandex.ru

Смагин Владимир Александрович, профессор 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Сычёва Анастасия Максимовна, профессор 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент.

Фоминов Иван Вячеславович, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Цветков Кирилл Юрьевич, профессор 63-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 947-19-58, e-mail: wavelet3@mail.ru

Щербина Игорь Сергеевич, начальник 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.