

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

**Выпуск 677**

2021 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 РФ*;

**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: *Е.Е. Лавриенко*  
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. 29.06.2021.  
Формат печатного листа 445×300/4.  
Уч.-печ. л. 78,00. Уч.-изд. л. 38,75  
Тираж 26 экз. Заказ 3917/89.  
Отпечатано в типографии  
Военно-космической академии  
имени А.Ф. Можайского

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Боровской Е.П., Кохановский А.Г., Кузнецов А.Б.* Трехмерная модель помещений и размещаемых в них элементов наземного технологического оборудования стартового комплекса на основе использования воксельных примитивов..... 7
- Калинин В.Н.* Об одном обобщении теоретико-игровой задачи Беллмана – Шиффмана ..... 14
- Лунашко М.Н., Степанов И.В., Тимофеев В.В.* Модель энергосберегающих информационных процессов в космическом аппарате с использованием байесовского подхода ..... 20

### СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Бородюк А.А., Сакулин А.Н., Якимов В.Л.* Алгоритм динамической кластеризации и его применение для формирования полигауссовских моделей изменения телеметрируемых параметров космических аппаратов в фазовом пространстве ..... 26
- Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Левчук А.А.* Методика обоснования параметров системы технического обслуживания и ремонта передающего радиотехнического объекта ..... 37
- Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Попов А.С.* Методика вычисления вероятностей символьных и битовых ошибок для QPSK сигналов при наличии гармонической помехи со сдвигом частоты ..... 50
- Чунин Д.Н.* Экспериментальное подтверждение необходимости контроля точностных характеристик интегрированной навигационной аппаратуры потребителя системы ГЛОНАСС ..... 61

### СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алёхин С.Г., Иванов Р.Д., Шемелов В.А.* Количественные характеристики естественных климатических сезонов отдельных районов Арктического региона..... 70
- Астапович А.В., Жбанов К.К., Медянный Д.О., Яковлев А.И.* Модель рельефа недоступной территории, построенная по результатам комплексирования разнородной спутниковой информации..... 75

*Еремеев И.Ю., Передрий А.В., Семенов К.В., Шиловский Е.Ю.* Модель функционирования цифровых ретрансляторов на беспилотных летательных аппаратах комплексов определения местоположения источников радиоизлучений в условиях ограничений на пропускную способность каналов ретрансляции ..... 84

*Маринин В.М., Саниев Р.Р., Семенов К.В., Семенюк С.С.* Модель оценивания вектора скорости спутника-ретранслятора по сигналам трех реперных станций ..... 98

*Октябрьский В.В., Островский А.С., Саламан Р.С.* Методика компенсации неравномерно распределенного смаза аэрофотоснимков многоматричных цифровых аэрофотоаппаратов планово-перспективной съемки в условиях недостаточной освещенности местности ..... 107

## ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

*Андрушкевич Д.В., Бiryюков Д.Н., Тимашов П.В.* Порождение сценариев предотвращения компьютерных атак на основе логико-онтологического подхода ..... 118

*Бiryюков Д.Н., Лебедев С.Л., Самохвалов И.К., Холинов И.А.* Построение программного комплекса аудита объектов сетевой инфраструктуры ..... 135

*Киселев А.Н.* Подход к обнаружению вредоносного программного обеспечения web-shell на основе анализа сетевого трафика web-инфраструктуры ..... 143

*Мальцев Г.Н., Матвеев С.А.* Исследование защищенности системы командного радиоуправления подвижным объектом с использованием марковской модели преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации ..... 153

*Моргунов В.М., Странадкин Р.Н.* Моделирование действий внутреннего нарушителя на основе выявления и классификации атак ..... 164

*Соловьев И.А., Соловьева М.В., Трофимова Н.А.* Контроль состояния информационной безопасности на основе моделирования деструктивной деятельности нарушителя ..... 169

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

*Агишев С.В., Голиков И.О., Лебедев Е.Л.* Использование деградационной модели средств измерений при оценивании эффективности подготовки космических аппаратов ..... 180



<i>Алёшин Е.Н., Воротягин В.Н., Павлов А.Н., Павлов Д.А., Умаров А.Б.</i> Моделирование и анализ структурно-функциональной надежности сложных много-режимных объектов .....	186
<i>Ананенко В.М., Голяков А.Д., Фоминов И.В.</i> Применение теории планирования эксперимента для оценивания робастности бортовых систем навигации летательных аппаратов .....	195
<i>Бубликов М.А., Голиков И.О., Завьялова Г.М.</i> Экспериментально-теоретические исследования теплоаккумулирующего материала тепловых аккумуляторов бортовых систем космических аппаратов .....	204
<i>Головчинский В.О., Головчинская Н.В., Федоров А.В.</i> Прогнозирование показателей ресурса циклически нагруженных элементов в агрегатах стартового комплекса при отсутствии дефектов.....	210
<i>Жердев О.В., Онуфрей А.Ю., Орлов А.А., Разумов А.В.</i> Расчетно-экспериментальная методика оценивания критериальных уровней стойкости вычислительных средств к воздействию сверхкоротких импульсов .....	218
<i>Поляков С.А., Степенко А.Н., Шаповалов Д.В.</i> Метод определения сроков проведения ремонтно-профилактических работ на технологическом оборудовании по критерию минимальных эксплуатационных затрат .....	225
<b>ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК</b>	
<i>Башикирцев В.П.</i> Актуальные психолого-педагогические проблемы формирования личностных характеристик обучающихся в условиях ограниченного педагогического взаимодействия в высшей военной школе .....	236
<i>Иноземцева Л.А., Кужекин Н.С.</i> Мотивационно-ценностное содержание познавательного интереса слушателей и курсантов военно-учебного заведения ...	243
<i>Кужекин Н.С., Мышко В.В., Чикуров В.А.</i> Планирование объема учебной работы педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации .....	247
<b>ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК</b>	
<i>Огородников В.П.</i> Искусственный интеллект: модель мышления и техника ....	254
<i>Репях Н.А., Хрустова А.Н.</i> Воззрения А.Л. Чижевского в естественнонаучном направлении философии русского космизма .....	261

## ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

*Авсеенко А.И., Дорофеев С.А., Ковалевский Р.И.* Оценивание показателей энергосбережения объектов военной инфраструктуры ..... 266

*Гончаров И.В., Новиков А.В., Тимощук А.С.* Современные экологические решения по организации водоотведения полевых лагерей соединений и воинских частей ..... 274

## ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

*Атарщиков А.Н., Данелян А.П., Новиков В.А.* Способ развертывания космического сегмента национальной системы мониторинга обстановки в Арктике ... 279

*Иконников О.В., Казахов Б.Д., Колягин Д.А.* О сущности и содержании адаптивных действий организационно-технических систем военного назначения в современных войнах и вооруженных конфликтах ..... 286

Рефераты статей ..... 292

Сведения об авторах ..... 302

Сведения о рецензентах ..... 310

Е.П. Боровской\*;  
А.Г. Кохановский\*\*,  
*кандидат техн. наук;*  
А.Б. Кузнецов\*\*,  
*кандидат техн. наук, доцент*

\*Войсковая часть 13991, г. Мирный Архангельской обл.;

\*\*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

## **ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПОМЕЩЕНИЙ И РАЗМЕЩАЕМЫХ В НИХ ЭЛЕМЕНТОВ НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОКСЕЛЬНЫХ ПРИМИТИВОВ**

Предлагается использовать робототехнические комплексы для контроля технического состояния наземного технологического оборудования стартовых комплексов. Обосновывается выбор фрейм-продукционного подхода для создания модели наземного технологического оборудования стартовых комплексов. Излагается методика формирования модели помещений и элементов наземного технологического оборудования стартовых комплексов на основе использования воксельных примитивов.

Ключевые слова: наземное технологическое оборудование, фрейм, воксель, модель.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современные тенденции развития военной техники характеризуются широким внедрением робототехнических комплексов (РТК) в состав имеющихся и проектируемых технических средств. Робототехнические комплексы находят свое применение в тех условиях обстановки, где личный состав боевых расчетов может быть подвержен угрозам нанесения вреда здоровью или в условиях невозможности работы людей. Их состав и характеристики определяются исходя из условий выполнения поставленных задач с учетом исключения факторов риска для личного состава [1–3].

Для контроля технического состояния объектов наземного технологического оборудования (НТО) стартовых комплексов (СК) предлагается использовать робототехнические комплексы, совместно функционирующие в помещениях стартового комплекса и образующие единую интеллектуальную систему [2, 4].

Построение модели системы предлагается выполнить на основе фрейм-продукционного подхода [5, 6]. В качестве слотов этой модели будут использоваться основные объекты, участвующие в процессе подготовки и пуска ракеты космического назначения: помещения с расположенными в них элементами НТО, объекты робототехнических систем, внешние факторы, создающие помехи для работы и др. В состав слотов также могут быть внесены интегральные показатели эффективности интеллектуальной системы: достоверность контроля, быстродействие и т. д.

В статье рассматривается методика формирования информационной модели пространства помещений стартового комплекса. Используя полученную модель, можно формировать стратегии контроля технического состояния НТО стартовых комплексов с применением робототехнических средств (РТС) в ходе выполнения технологического графика подготовки РКН к пуску.

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ВИДА МОДЕЛИ НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА

В результате анализа элементов НТО СК, задействованных при подготовке пуска ракет космического назначения (РКН), были выявлены ряд объектов. Техническое состояние этих объектов целесообразно контролировать с применением РТС [7, 8], что обусловлено необходимостью увеличения точек контроля технического состояния элементов НТО СК в целях увеличения полноты контроля параметров процесса подготовки РКН к пуску, а также повышения достоверности получаемых данных.

Для реализации методики выбора стратегии контроля технического состояния НТО СК в условиях деструктивных внешних воздействий предлагается воспользоваться информационной моделью, которая включает в себя формализованное описание объектов контроля (аппаратуру НТО СК, средства контроля, параметры и точки приложения деструктивных воздействий и т. д.). В процессе исследований выявлено, что наиболее предпочтительным, в данном случае, является подход, основанный на применении фрейм-продукционных моделей описания знаний [5, 6].

Фреймы позволяют формализовывать знания об объектах определенной предметной области. Важной особенностью является то, что эти объекты должны составлять класс концептуальных (повторяющихся, стереотипных) объектов, процессов и т. п. При этом в качестве слотов фрейма могут выступать другие фреймы. По сути, они являются дочерними по отношению к главному фрейму. Такое свойство позволяет строить сеть фреймов, описывающих необходимую для анализа среду [5].

Важным шагом при построении модели применения РТК для контроля технического состояния аппаратуры НТО СК является создание модели объектов НТО СК. Особенностью помещений СК является то, что аппаратура и, соответственно, объекты контроля расположены на разной высоте и могут находиться друг над другом. Это исключает двумерный формат представления планов помещений СК. Поэтому в качестве основы деления объема помещения на элементы выбран воксельный принцип.

*Воксель* – дискретный элемент 3D-изображения, простейший элемент объема, имеющий форму куба с заданными размерами [9–11]. Воксельный принцип представления объектов основан на применении объемных примитивов, имеющих параметры, характерные для поставленной задачи. Они формируются на этапе подготовки исходных данных для определения возможности размещения технических средств контроля на объектах НТО СК с учетом всех характеристик и особенностей помещений, зданий и сооружений. Предлагается составить 3D-карту сооружения, здания или помещения, в котором планируется применение РТС. В дискретном виде 3D-изображение, представленное на рис. 1, является трехмерным массивом.

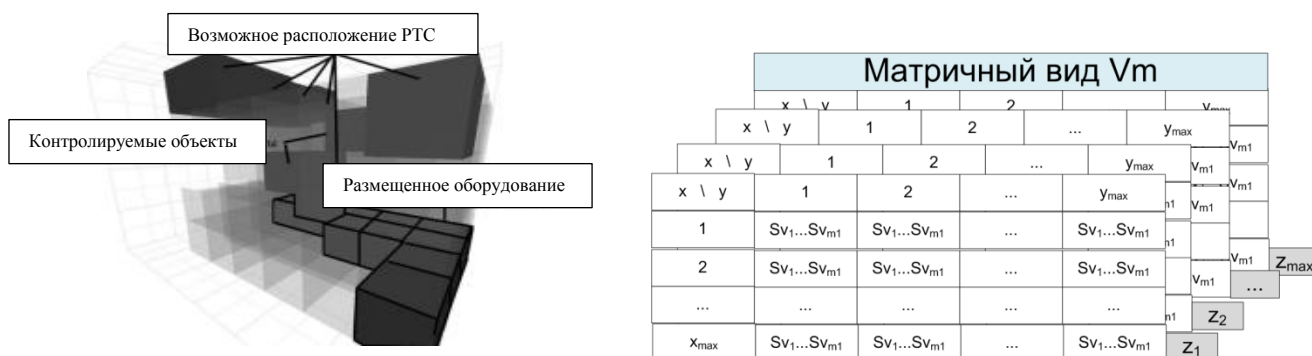


Рис. 1. Графическое изображение воксельной модели условного помещения

Особенностью применения вокселей в данной фрейм-продукционной модели по сравнению, например с методикой проведения рентгеновской микротомографии полупроводниковых приборов [12, 13] и принципом работы графических систем аналитического моделирования [10, 14], является использование, помимо пространственных координат, и ряда других параметров и свойств: коэффициента масштабируемости, класса вокселя, численных измеряемых значений контролируемых параметров, оцениваемых значений и др.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВОКСЕЛЕЙ

Согласно выбранной фрейм-продукционной парадигме представления модели НТО СК воксель представляется в форме фрейма-прототипа с набором слотов, отражающих основные параметры вокселя. В рамках данной статьи под термином «воксель» будет приниматься именно такой фрейм-прототип.

Все слоты вокселя могут быть разбиты на несколько групп. На рис. 1 слоты обозначены как элементы множества  $S_v$ .

*Первая группа* отражает геометрические свойства вокселя как элемента пространства и его координаты в нем. Примем допущение, что форма вокселя – куб. Координаты являются целочисленными значениями и обозначают его индексы в матрице вокселей. Началом координат является произвольная точка помещения, выбранная на этапе создания модели.

*Вторая группа* слотов отражает принадлежность вокселя к той или иной функциональной группе. В настоящее время выделены несколько групп, которые можно классифицировать по своему функциональному назначению:

- воксели, доступные для помещения в них средств РТК (допустимые);
- воксели, в которых располагаются элементы конструкции помещения или агрегаты НТО (занятые);
- воксели, в которых находятся средства контроля и т. д.

*Третья группа* характеризует величины, которые могут быть измерены в объеме данного вокселя (температура среды, концентрация заданного типа газа в объеме, прозрачность вокселя для заданного типа излучения, процент наполненности вокселя заданным типом вещества и др.).

Конкретный набор слотов можно варьировать, что позволяет реконструировать воксельную модель объекта НТО СК для обеспечения решения частных задач проводимых исследований.

Методика построения воксельной модели объекта НТО состоит из четырех этапов.

**Этап 1.** На первом этапе осуществляется определение геометрических размеров вокселя.

Исследуемое помещение (сооружение, объект и т. д.) разбивается на множество однотипных вокселей ( $V_{ox}$ ). Размер вокселя предлагается подбирать в зависимости от размеров применяемого РТС:

$$\Delta r_v = \Delta r_{\text{РТС}},$$

где  $\Delta r_v$  – длина ребра вокселя;

$\Delta r_{\text{РТС}}$  – длина ребра куба, в который вписывается РТС.

Далее формируется «воксельная» карта 3D-моделей ( $V_m$ ) из  $n$  вокселей ( $V_{ox}$ ) и  $m$  свойств ( $S_v$ ) помещений и объектов НТО СК. Тогда

$$\begin{aligned} V_m &= \{V_{ox}, S_v\}, \\ V_{ox} &= \{v_{ox_i} \mid i = \overline{1, n}\}, \\ S_v &= \{s_{v_j} \mid j = \overline{1, m}\}, \end{aligned}$$

где  $n$  – количество вокселей;

$m$  – количество свойств.

Затем каждому элементу  $v_{ox_i}$  указанного множества присваивается уникальный идентификатор – кортеж  $[x, y, z]$ . Получаем, что каждый воксель и каждое свойство вокселя заданы в пространстве атрибутов  $V_{ox}[X, Y, Z], S_v[X, Y, Z]$ . Следовательно,

$$\begin{aligned} X &= \{x_i \mid i = \overline{1, x_{\max}}\}, \\ Y &= \{y_j \mid j = \overline{1, y_{\max}}\}, \\ Z &= \{z_k \mid k = \overline{1, z_{\max}}\}. \end{aligned}$$

**Этап 2.** На втором этапе формируется множество «доступных» вокселей ( $V_{dop}$ ), т. е. вокселей, в которых можно разместить РТС, а в соответствующих слотах ( $v_{ox_i}$ ) воксельного пространства изменяется первоначальное свойство ( $s_{v_j}$ ) «допустимости» с «FALSE» на значение «TRUE»:

$$\begin{aligned} V_{dop} &= \{v_{ox_i} \mid v_{ox_i} \in V_a, i = \overline{1, n}\}, \\ V_{dop} &= \{v_{ox_i} \mid v_{ox_i}(s_{v_i} = TRUE), i = \overline{1, n}\}, \end{aligned}$$

где  $V_a$  – множество средств оперативного контроля (РТС).

Для обеспечения возможности обработки информации о свойствах вокселей в воксельной модели создается множество идентификаторов  $S_{dop}$ , элементы которого указывают на элементы множества  $V_{dop}$  и множество идентификаторов  $S_o$ , элементы которого указывают на множество  $V_o$ , элементами которого являются объекты контроля.

Схема алгоритма заполнения множества  $S_{dop}$  представлена на рис. 2.

**Этап 3.** На третьем этапе «доступные» воксели рассматриваются на предмет возможности осуществления контроля технического состояния объектов (мест возможного возникновения НШС, измерения параметров узлов и агрегатов и т. д.). Формируется список вокселей, в которых вероятность выполнения задачи контроля выше или равна заданной.

Третий этап также включает в себя работу над множествами  $S_{dop}$  и  $S_o$ . Выявление в множестве  $V_{dop}$  вокселей, из которых возможен контроль объектов множества  $V_o$ , осуществляется путем определения максимально допустимого расстояния  $L$  (в пересчете на количество вокселей по известному значению  $\Delta r_v$ ) между РТС и объектом контроля. При этом  $L$  зависит от длины манипулятора  $L_{РТС}$  и возможности контроля ТС на некоторой дистанции:

$$\begin{aligned} \frac{x - x_{v_0}}{x_{v_k} - x_{v_0}} &= \frac{y - y_{v_0}}{y_{v_k} - y_{v_0}} = \frac{z - z_{v_0}}{z_{v_k} - z_{v_0}}; \\ L &= \sqrt{(x_{v_0} - x_{v_k})^2 + (y_{v_0} - y_{v_k})^2 + (z_{v_0} - z_{v_k})^2}; \\ L_{РТС} &\geq L. \end{aligned}$$

**Этап 4.** На данном этапе определяется множество контрольных вокселей  $V_k$  из состава  $V_{dop}$ , удовлетворяющих условию  $L_{РТС} \geq L$  для каждого объекта множества  $V_o$ . Таким образом, выявляется возможность обработки одним РТС нескольких точек контроля, оценивается

наличие и протяженность пути между парами  $v_k$ . Для  $N$  вокселей контроля множества  $V_k$  количество пар составит

$$k_{\text{пар}} = \frac{N \cdot (N - 1)}{2}.$$

На основании данных оценок формируются матрицы переходов между объектами множества  $V_k$  и вычисляются времена перемещения  $T_{pt}$  между объектами контроля, а также длины  $L_{pt}$  пути, удовлетворяющие ограничениям по времени и протяженности, путем определения количества вокселей, через которые двигается РТС.

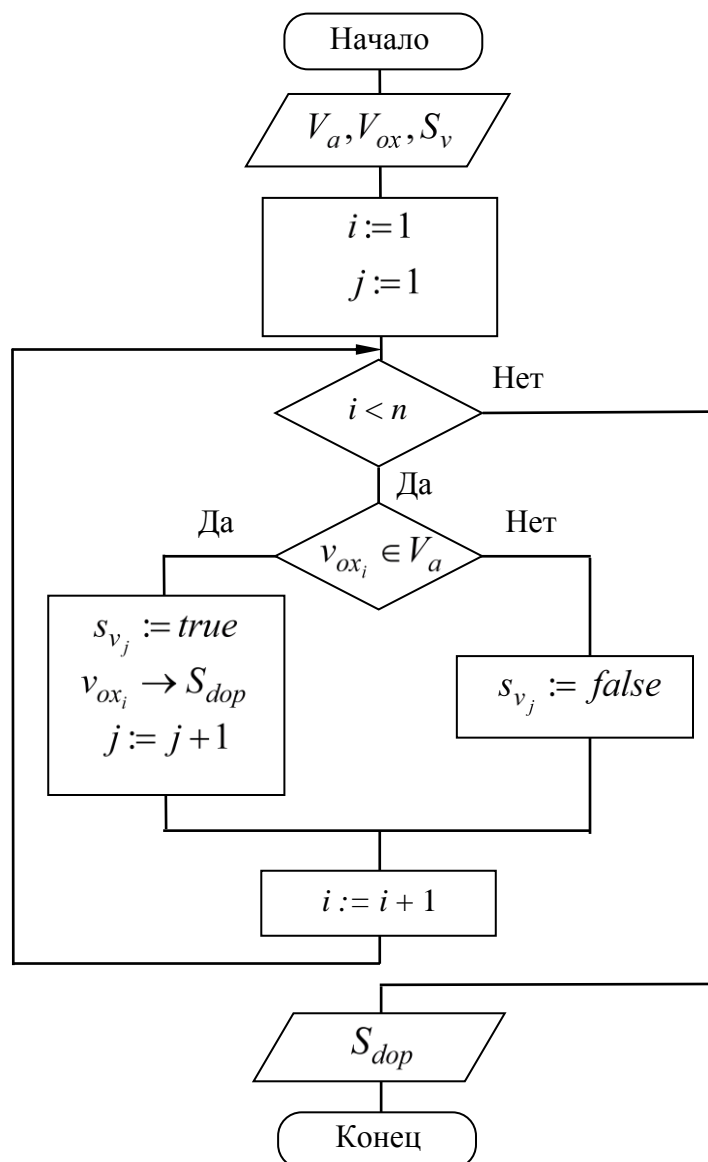


Рис. 2. Алгоритм заполнения множества  $S_{dop}$

В качестве примера было рассмотрено помещение «восьмигранник» сооружения 1А стартового комплекса «Союз-2», в котором размещены важные для обеспечения пуска элементы систем заправки, газоснабжения, управления сжатыми газами. Помещение восьмигранника вписывается в квадрат со стороной 22,4 м, высота помещения – 2,4 м. Построенная воксельная модель данного помещения представляет собой трехмерную матрицу вокселей размерностью 28 x 28 x 3 (рис. 3).

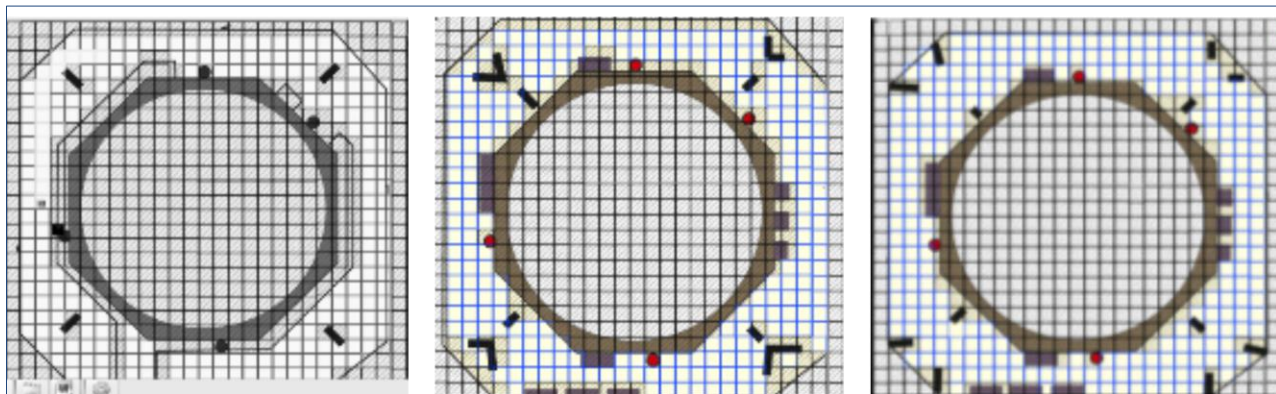


Рис. 3. Послойное воксельное представление помещения «восьмигранник» СК 17П32-С4

Данная модель позволяет оценить возможность и качество контроля технического состояния 58 объектов НТО СК в помещении восьмигранника различным составом робототехнических и стационарных приборов, варианты предлагаемого размещения которых представлены на рис. 4.

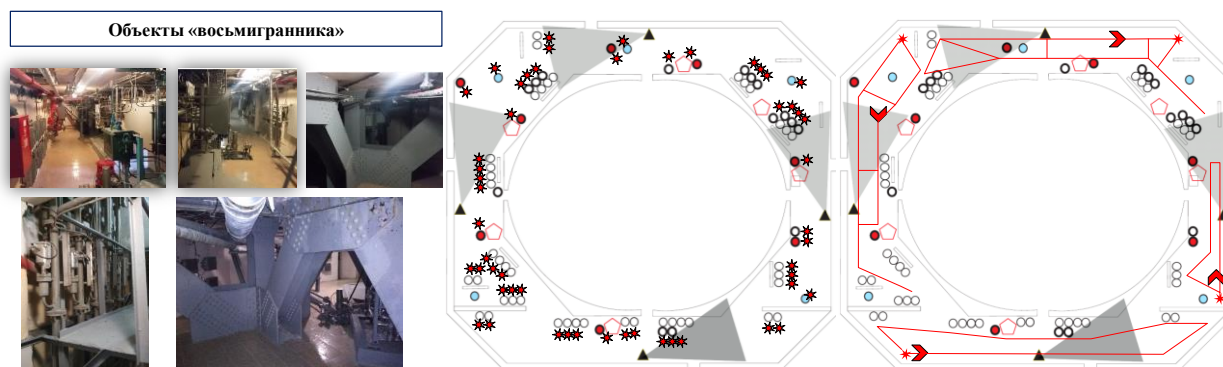


Рис. 4. Схема размещения объектов контроля в помещении «восьмигранник» СК 17П32-С4

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фрейм-продукционный подход и построение трехмерной модели объектов НТО СК на основе использования вокселей позволяют сформировать информационную модель исследуемого помещения. Данная модель предоставляет гибкий инструмент, адаптируемый под массогабаритные характеристики дополнительных средств контроля. Кроме того, она позволяет объективно оценить характеристики стратегий контроля технического состояния НТО СК с применением РТС в различных условиях обстановки.

Модель может применяться как на этапе проектирования робототехнических систем контроля, так и в процессе выполнения технологического графика подготовки РКН к пуску.

## Список используемых источников

1. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3(140). – С. 14–21.
2. Тарасов А.Г., Самсонов Ф.А., Цветков А.Ю. Структура автоматизированной системы подготовки и пуска ракет космического назначения с применением робототехнических



средств // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 180–186.

3. Корчак В.Ю., Лапиов В.С., Рубцов И.В. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10(171). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-nazemnyh-robototekhnicheskikh-kompleksov-voennogo-i-spetsialnogo-naznacheniya> (дата обращения: 29.10.2020).

4. Минаков Е.П., Тарасов А.Г., Боровской Е.П. Развитие структуры автоматизированной системы управления подготовкой и пуском ракет космического назначения с целью автоматизации процессов устранения нештатных ситуаций // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2015. – Т. 7, № 6. – С. 16–21.

5. Дьяконов В.П., Борисов А.В. Фреймовая модель представления знаний // Основы искусственного интеллекта. – Смоленск, 2007. – С. 30.

6. Перова А.В. Концептуальное моделирование информационных потоков в машиностроении с помощью фреймов // Вестник ВГТУ. – 2011. – № 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnoe-modelirovanie-informatsionnyh-potokov-v-shinostroeniisromoschyu-freymov> (дата обращения: 28.10.2020).

7. Боровской Е.П. Определение объектов использования робототехнических систем на стартовых комплексах методом экспертного оценивания // Сборник III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – Т. 1. – С. 91–95.

8. Боровской Е.П., Кохановский А.Г., Кузнецов А.Б. Обоснование выбора объектов наземного технологического оборудования стартовых комплексов, требующих дополнительного контроля технического состояния на основе аддитивной свертки частных показателей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 676. – С. 171–178.

9. Чочиа П.А. Трехмерные и двумерные изображения: модели, алгоритмы и области анализа // International Journal of Open Information Technologies. – 2014. – Vol. 2, № 11. – P. 1–9.

10. Витиска Н.И., Гуляев Н.А. Метод визуализации трехмерных сцен и объектов воксельной графики для систем имитационного моделирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 4(165). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-vizualizatsii-tryohmernih-stsen-i-obektov-vokselnoy-grafiki-dlya-sistem-imitatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 27.10.2020).

11. Алсынбаев К.С. Алгоритмы определения тел объемных объектов в трехмерном нерегулярном облаке точек // Вестник Балтийского федерального университета имени И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. – 2015. – № 10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithmy-opredeleniya-tel-obemnyh-obektov-v-trehmernom-neregulyarnom-oblake-tochek> (дата обращения: 27.10.2020).

12. Применение рентгеновской микротомографии для исследования пористости композиционных материалов силовой электроники / К.Н. Нищев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2016. – № 2(38). – С. 124–133.

13. Вяткин С.И. Рейкастинг трехмерных текстур и функционально заданных поверхностей с применением графических ускорителей // Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/reykasting-trehmernih-tekstur-i-funktsionalno-zadannyh-poverhnostey-s-primeneniem-graficheskikh-uskoriteley> (дата обращения: 27.10.2020).

14. Губина Е.Н., Толок А.В., Толок Н.Б. Распараллеливание процесса рекурсивных вычислений в задаче дихотомического разбиения куба // Прикладная информатика. – 2011. – № 4 (34). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rasparallelvanie-protsesta-rekursivnyh-vychisleniy-v-zadache-dihotomicheskogo-razbieniya-kuba> (дата обращения: 26.09.2019).

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

## ОБ ОДНОМ ОБОБЩЕНИИ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОЙ ЗАДАЧИ БЕЛЛМАНА – ШИФФМАНА

В статье рассмотрена антагонистическая теоретико-игровая задача с билинейным целевым функционалом при изопериметрических интегральных ограничениях на допустимые действия управляющей и возмущающей сторон. Задача является обобщением известной задачи Беллмана – Шиффмана. Критерием оптимальности управления служит требование максимума билинейного терминального функционала, характеризующего качество процесса управления. Возмущающая среда носит антагонистический характер и ее цель – минимизация указанного функционала, что приводит к рассмотрению соответствующей бесконечной антагонистической игры на произведении выпуклых слабых компактов в гильбертовом пространстве. Для этой игры доказано существование точки равновесия, параметры которой принимаются в качестве искомого оптимального управления. Задача сведена к рассмотрению дифференциальной игры второго порядка, соответствующее решение найдено на основе идей принципа максимума Л.С. Понтрягина путем нахождения седловой точки соответствующего гамильтониана. Полученные результаты могут быть использованы при решении практических задач оптимального планирования работы бортовой аппаратуры активных подвижных объектов, предназначенных для информационного взаимодействия с окружающей физической средой в условиях целенаправленных возмущений, в частности в соответствующих задачах современной космической кибернетики и информатики.

Ключевые слова: активный подвижный объект, информационное взаимодействие, космическая кибернетика, космический аппарат, информационный активный подвижный объект, управляющие и целенаправленные возмущающие воздействия, бесконечная антагонистическая игра, точка равновесия, гильбертово пространство, компактность, принцип максимума Понтрягина.

### ВВЕДЕНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При исследовании ряда современных актуальных проблем оптимального управления сложными процессами, такими, в частности, как процессы информационного взаимодействия активных подвижных объектов [1] с окружающей физической средой в условиях целенаправленных возмущений, что характерно, например, для проблем космической кибернетики и информатики, когда речь идет об информационном взаимодействии космических аппаратов с поверхностью Земли [2–6], приходится встречаться с необходимостью решения следующей теоретико-игровой задачи. Рассмотрим билинейный интегральный функционал вида

$$J(u_\sigma, v_\sigma) = \int_{t_0}^{t_f} v(t) f(t) u(t) dt, \quad (1)$$

(все интегралы в настоящей статье понимаются в смысле Лебега), который будем рассматривать как показатель качества исследуемого процесса управления и называть его **целевым функционалом**. Здесь  $f(t)$  – неотрицательная ограниченная функция, заданная на отрезке  $\sigma = [t_0, t_f] \subset \mathbb{R}^1$  и измеримая по Лебегу. Вещественные функции  $u_\sigma = u(\cdot)$  и  $v_\sigma = v(\cdot)$  представляют управляющее и возмущающее воздействия (более кратко – управление и возмущение) соответственно, выбираемые из некоторых заданных функциональных множеств – классов допустимых управляющих и возмущающих воздействий  $U_\sigma$  и  $V_\sigma$ .

Уточним структуру этих классов, а именно зададим их в следующем виде:

– класс допустимых управлений

$$U_\sigma = \{u_\sigma = u(\cdot) : \sigma \rightarrow \mathbb{R}^1 | (\forall t \in \sigma)(0 \leq u(t) \leq c); S_u\}, \quad (2)$$

где  $c$  – заданная положительная величина;

– класс допустимых возмущений

$$V_\sigma = \left\{ v_\sigma = v(\cdot) : \sigma \rightarrow \mathbb{R}^1 \mid (\forall t \in \sigma)(0 \leq v(t) \leq d); S_v \right\}, \quad (3)$$

где  $d$  – заданная положительная величина.

В приведенных выражениях  $S_u$  и  $S_v$  – теоретико-функциональные условия, накладываемые на соответствующие функции  $u(\cdot)$  и  $v(\cdot)$ . В качестве таких условий будем рассматривать требование измеримости по Лебегу.

Далее, уточняя рассматриваемую математическую задачу, будем предполагать, что для осуществления управления необходим некоторый ресурс, величина которого является заданной. Соответствующее изопериметрическое ограничение представим в виде равенства

$$\int_{t_0}^{t_f} \alpha(t)u(t)dt = A, \quad (4)$$

в котором  $A$  – заданная положительная величина.

Аналогичное условие наложим и на возмущающие воздействия, предполагая, что они удовлетворяют соответствующему интегральному ресурсному ограничению

$$\int_{t_0}^{t_f} \beta(t)v(t)dt = B, \quad (5)$$

в котором  $B$  – заданная положительная величина. В приведенных равенствах  $\alpha(t)$  и  $\beta(t)$  – заданные неотрицательные и измеримые по Лебегу функции, суммируемые на отрезке  $\sigma$ .

С учетом введенных дополнительных ограничений (4) и (5) сузим соответствующие классы допустимых управлений и возмущений, представив их в следующем виде:

$$U_{\sigma_1}(A) = \left\{ u_\sigma = u(\cdot) : \sigma \rightarrow \mathbb{R}^1 \mid (\forall t \in \sigma)(0 \leq u(t) \leq c) \wedge \int_{t_0}^{t_f} \alpha(t)u(t)dt = A; S_u \right\}, \quad (6)$$

$$V_{\sigma_1}(B) = \left\{ v_\sigma = v(\cdot) : \sigma \rightarrow \mathbb{R}^1 \mid (\forall t \in \sigma)(0 \leq v(t) \leq d) \wedge \int_{t_0}^{t_f} \beta(t)v(t)dt = B; S_v \right\}. \quad (7)$$

При этом задача управляющей стороны заключается в том, чтобы найти такое допустимое управляющее воздействие, которое доставляет целевому функционалу *максимальное* из всех возможных значений. Если такое управляющее воздействие существует, то оно называется *оптимальным управлением*.

Однако при наличии возмущений подобная постановка задачи выбора управляющего воздействия теряет смысл, поскольку значение указанного функционала зависит от двух аргументов  $\langle u_\sigma, v_\sigma \rangle$ , второй из которых управляющей стороне принципиально неизвестен.

Оптимальное управление в каждом конкретном случае, возможно, существует, но не может быть найдено. Уточняя природу возмущающей среды, будем предполагать, что ее *цель* носит *антагонистический* характер, т. е. в данном случае заключается в *минимизации* целевого функционала (1). Это обстоятельство дает основание представить рассматриваемую задачу оптимального управления как *бесконечную антагонистическую игру* в нормальной форме [7, 8] следующего вида:

$$\Gamma = \langle U_{\sigma_1}(A), V_{\sigma_1}(B), J(u_\sigma, v_\sigma) \rangle \quad (8)$$

и воспользоваться для ее решения соответствующей теоретико-игровой методологией. А именно, воспользуемся *принципом гарантированного результата* А. Вальда, в соответствии с которым оптимальное управление находится в предположении, что возмущения будут носить наиболее неблагоприятный характер (принцип крайнего пессимизма), т. е. путем определения значения *максимина*

$$J_H = \max_{u_\sigma \in U_{\sigma 1}} \left[ \min_{v_\sigma \in V_{\sigma 1}} J(u_\sigma, v_\sigma) \right], \quad (9)$$

называемого *нижней ценой* игры, а реакция среды (исходя из предположения, что источник возмущений также руководствуется аналогичным принципом) определяется условием *минимакса*

$$J_B = \min_{v_\sigma \in V_{\sigma 1}} \left[ \max_{u_\sigma \in U_{\sigma 1}} J_1(u_\sigma, v_\sigma) \right], \quad (10)$$

значение которого называется *верхней ценой* игры. В теории игр принято считать, что *оптимальное управление* в подобной задаче *существует* тогда и только тогда, когда указанные максимин и минимакс достигаются и, более того, совпадают. Значит,

$$J_H = \max_{u_\sigma \in U_{\sigma 1}} \left[ \min_{v_\sigma \in V_{\sigma 1}} J(u_\sigma, v_\sigma) \right] = J_B = \min_{v_\sigma \in V_{\sigma 1}} \left[ \max_{u_\sigma \in U_{\sigma 1}} J_1(u_\sigma, v_\sigma) \right] = J^*. \quad (11)$$

Их общее значение  $J^*$  называется *ценой* игры, а соответствующая ситуация – *ситуацией равновесия*. При этом ситуация равновесия характеризуется парой  $\langle u_\sigma^*, v_\sigma^* \rangle$ , которая называется *оптимальной стратегией в целом* и определяет искомое *оптимальное управление*  $u_\sigma^*$  и соответствующую антагонистическую реакцию среды  $v_\sigma^*$ .

Отметим, что подобная задача была впервые поставлена и исследована американскими математиками Р. Беллманом и М. Шиффманом в 1949 году [9]. Однако в работе указанных авторов были приняты два существенных дополнительных допущения, а именно:

- 1) функция  $f(t)$  предполагалась монотонно возрастающей;
- 2) в интегральных ограничениях (4) и (5) предполагалось, что  $\alpha(t) = \beta(t) \equiv 1$ .

При указанных условиях авторами получено решение на основе известной леммы Неймана – Пирсона [10, с. 272–279].

Решение, приводимое в настоящей статье и полученное на основе использования современных математических инструментов, свободно от указанных ограничений.

Перейдем к решению поставленной теоретико-игровой задачи – нахождению оптимальной стратегии в целом и ее составляющих.

## РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

### Анализ существования оптимального управления

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

Прежде всего, рассмотрим топологическую структуру образующих множеств  $U_{\sigma 1}(A)$  и  $V_{\sigma 1}(B)$ .

Введем в этих множествах метрическую топологию путем погружения их в гильбертово пространство  $L^2(\sigma)$  всех измеримых вещественных функций, определенных и суммируемых с квадратом модуля на интервале  $\sigma$ . Рассмотрим вначале класс допустимых управлений  $U_{\sigma 1}(A)$ . Из определения этого класса (6) следует, что он в соответствующей метрической  $L^2(\sigma)$ -топологии является *ограниченным* и *замкнутым*. Так как множество  $[0, c]$  выпукло, то класс  $U_{\sigma 1}(A)$  также является выпуклым, а это [11, с. 59; 12, с. 113] влечет за собой замкнутость  $U_{\sigma 1}(A)$  и в слабой  $L^2(\sigma)$ -топологии. Далее, так как класс  $U_{\sigma 1}(A)$  ограничен в

метрической топологии, то, вследствие рефлексивности  $L^2(\sigma)$ , он относительно слабо компактен [13, с. 81], а следовательно, компактен в слабой  $L^2(\sigma)$ -топологии [13, с. 461]. Аналогичные рассуждения справедливы и в отношении класса допустимых возмущений  $V_{\sigma_1}(B)$ .

Таким образом, базисные множества рассматриваемой игры (8) представляют собой **выпуклые слабые компакты** в функциональном пространстве  $L^2(\sigma)$ .

Проанализируем **целевой функционал** рассматриваемой игры (1), который представляет собой билинейную форму, заданную на произведении  $U_{\sigma_1}(A) \times V_{\sigma_1}(B)$ . При принятых выше предположениях относительно функции  $f(t)$  он непрерывен в слабой  $L^2(\sigma)$ -топологии [11, с. 61] и является выпуклым и вогнутым по своим аргументам. Отсюда следует [14, с. 83], что максимин и минимакс в формулах (9), (10) достигаются и равны друг другу, т. е. рассматриваемый функционал имеет седловую точку  $\langle u_{\sigma}^*, v_{\sigma}^* \rangle$ , характеризующую соответствующую ситуацию равновесия. Это означает, что искомое оптимальное решение в указанной выше игровой задаче **существует** и определяется параметрами седловой точки  $\langle u_{\sigma}^*, v_{\sigma}^* \rangle$ , т. е. аргументами соответствующих **максимина** и **минимакса**. Перейдем к практическому нахождению этого решения.

### Решение задачи – нахождение оптимального управления

С целью получения решения игровой задачи (8) сведем эту задачу к эквивалентной **антагонистической дифференциальной игре** [15, 16]. Введем две новые переменные величины  $x_1$  и  $x_2$ , определив их как решение краевой задачи для следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{dx_1}{dt} = \alpha(t)u(t), & x_1(t_0) &= 0, & x_1(t_f) &= A, \\ \dot{x}_2 &= \frac{dx_2}{dt} = \beta(t)v(t), & x_2(t_0) &= 0, & x_2(t_f) &= B \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

и рассмотрим соответствующую **антагонистическую дифференциальную игру** с целевым функционалом (1) и исходными классами допустимых управлений и возмущений (2) и (3). Очевидно, что решение подобной игровой задачи будет совпадать с решением для задачи (8).

Подобная редукция позволяет использовать для нахождения оптимального управления современный аппарат теории дифференциальных игр [15–17].

Заметим, что особенность исследуемой задачи заключается в том, что целевой функционал и правые части дифференциальных уравнений (12) не зависят от переменных величин  $x_1$  и  $x_2$ , что в теории оптимального управления характерно для так называемых **ляпуновских задач** [18, с. 312]. Это дает основание назвать рассматриваемую дифференциальную игру **ляпуновской дифференциальной игрой**.

Для нахождения искомой **оптимальной стратегии в целом** используем расширение **принципа максимума** Понтрягина применительно к дифференциальным играм [17]. Функцию Понтрягина (гамильтониан) в этом случае представим в следующем виде:

$$H(t, u, v) = \gamma f(t)v - \alpha(t)\gamma u - \rho\beta(t)v, \quad (13)$$

где  $\gamma$  и  $\rho$  – **постоянные неотрицательные** [18, с. 312] **неопределенные множители** Лагранжа (сопряженные величины по Понтрягину), величины которых будут определены в дальнейшем.

Известно [17], что если пара  $\langle u_{\sigma}^*, v_{\sigma}^* \rangle$  определяет оптимальную стратегию в рассматриваемой задаче, то для любого значения  $t \in \sigma$  выполняется условие

$$H(t, u^*(t), v^*(t)) = \max_{0 \leq u \leq c} \min_{0 \leq v \leq d} H(t, u, v) = \min_{0 \leq v \leq d} \max_{0 \leq u \leq c} H(t, u, v), \quad (14)$$

которое означает, что в каждой точке отрезка  $\sigma$  оптимальная стратегия определяется седловой точкой функции Понтрягина (13) на прямоугольнике  $[0, c] \times [0, d]$ .

Седловая точка функции (13) на указанном прямоугольнике существует и может быть найдена в результате анализа соответствующих максимина и минимакса. Этот анализ показывает, что оптимальная стратегия в данном случае, а следовательно, и искомое оптимальное управление, а также антагонистическая реакция среды, определяются следующими соотношениями:

$$u^*(t; r, p) = \min \left\{ c, \frac{p\beta(t)}{f(t)} \right\} \gamma_+ \left( f(t) - \frac{r\alpha(t)}{d} \right) = \begin{cases} \min \left\{ c, \frac{p\beta(t)}{f(t)} \right\} & \text{при } f(t) \geq \frac{r\alpha(t)}{d}, \\ 0 & \text{при } f(t) < \frac{r\alpha(t)}{d}; \end{cases} \quad (15)$$

$$v^*(t; r, p) = d + \left[ \min \left\{ d, \frac{r\alpha(t)}{f(t)} \right\} - d \right] \gamma_+ \left( f(t) - \frac{p\beta(t)}{c} \right) = \begin{cases} \min \left\{ d, \frac{r\alpha(t)}{f(t)} \right\} & \text{при } f(t) \geq \frac{p\beta(t)}{c}, \\ d & \text{при } f(t) < \frac{p\beta(t)}{c}; \end{cases} \quad (16)$$

где

$$\gamma_+(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z \geq 0, \\ 0 & \text{при } z < 0 \end{cases} \quad (17)$$

– функция Хэвисайда.

Чтобы завершить решение рассматриваемой задачи, необходимо найти значения сопряженных величин (множителей Лагранжа)  $r$  и  $p$ , отвечающие краевым условиям, указанным в формулах (12). С этой целью введем следующие две функции:

$$g_1(r, p) = \int_{t_0}^{t_f} \alpha(t) u^*(t; r, p) dt; \quad g_2(r, p) = \int_{t_0}^{t_f} \beta(t) v^*(t; r, p) dt, \quad (18)$$

которые характеризуют расход ресурса обеих сторон конфликта при использовании оптимальной стратегии, определяемой формулами (15) и (16).

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

$$g_1(r, p) = A, \quad g_2(r, p) = B, \quad (19)$$

при естественных условиях –

$$0 < A < c \int_{t_0}^{t_f} \alpha(t) dt, \quad 0 < B < d \int_{t_0}^{t_f} \beta(t) dt. \quad (20)$$

Подставляя найденные значения  $r^*$  и  $p^*$  в формулы (15) и (16), получим искомое **оптимальное управление** и соответствующую **антагонистическую реакцию** целенаправленной возмущающей среды, т. е. решение поставленной задачи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена антагонистическая теоретико-игровая задача с билинейным целевым функционалом при изопериметрических интегральных ограничениях на допустимые действия управляющей и возмущающей сторон. Задача является обобщением известной задачи

Беллмана – Шиффмана. Доказано, что эта игра имеет решение, так как седловая точка указанного функционала существует. Задача сведена к рассмотрению дифференциальной игры второго порядка, соответствующее решение найдено на основе идей принципа максимума Л.С. Понтрягина путем нахождения седловой точки соответствующего гамильтониана. Полученные результаты могут быть использованы при решении практических задач оптимального планирования работы бортовой аппаратуры активных подвижных объектов, предназначенных для информационного взаимодействия с окружающей физической средой в условиях целенаправленных возмущений, в частности в соответствующих задачах современной космической кибернетики и информатики.

### Список используемых источников

1. Калинин В.Н. О задаче оптимального управления активными подвижными объектами // Дифференциальные уравнения. – 1981. – № 12. – С. 2136–2143.
2. Калинин В.Н. Современная космическая кибернетика – методологические основы и направления исследований // Информация и космос. – 2007. – № 3. – С. 7–16.
3. Калинин В.Н. Теория управления космическим аппаратом: на основе концепции активного подвижного объекта: моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 188 с.
4. Калинин В.Н. Морфологический анализ проблематики математического моделирования процессов информационного взаимодействия космического аппарата с окружающей физической средой // Информация и космос – 2014. – № 1. – С. 94–104.
5. Калинин В.Н. Математическая модель информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 3(34). – С. 33–56.
6. Калинин В.Н. О некоторых задачах оптимального управления информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 4(41). – С. 34–56.
7. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Шевкопляс Е.В. Теория игр. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 422 с.
8. Васин А.А., Морозов В.В. Введение в теорию игр. – М.: Изд-во МГУ. – 2003. – 278 с.
9. Bellman R., Shiffman M. On the min-max of  $\int_0^1 f(x)a(x)d(x)dx$ . The RAND Corporation. RM-308. – 1949.
10. Беллман Р., Гликсберг И., Гросс О. Некоторые вопросы математической теории процессов управления. – М.: ИЛ, 1962. – 336 с.
11. Вайнберг М.М. Функциональный анализ. – М.: Просвещение, 1979. – 128 с.
12. Канторович, Акилов Г.П. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1977. – 764 с.
13. Данфорд Н., Шварц Дж., Линейные операторы. Общая теория. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – Ч. 1. – 895 с.
14. Балакришнан А. Введение в теорию оптимизации в гильбертовом пространстве. – М.: Мир, 1974. – 259 с.
15. Красовский Н.Н., Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры. – М.: Наука, 1974. – 456 с.
16. Понтрягин Л.С. К теории дифференциальных игр // Успехи математических наук. – 1966. – Т. XXI, вып. 4(130). – С. 219–274.
17. Зеликин М.И., Тынянский Н.Т. Детерминированные дифференциальные игры // Успехи математических наук. – 1965. – Т. XX, вып. 4(124). – С. 151–157.
18. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. – М.: Физматлит, 2007. – 408 с.

М.Н. Лупашко;  
И.В. Степанов;  
В.В. Тимофеев,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **МОДЕЛЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА**

Рассмотрена концепция выбора стратегии организации информационных процессов – предварительной бортовой обработки и выдачи целевой информации космическим аппаратом военного назначения. Получены выражения для расчета энергозатрат на реализацию стратегий и для оценки погрешности предварительной обработки.

Предложено использовать байесовский подход к оцениванию пригодности целевой информации. Приведены примеры организации предварительной бортовой обработки целевой информации космическим аппаратом военного назначения и даны рекомендации по ее осуществлению.

Ключевые слова: бортовая обработка информации, энергоемкость, байесовский подход.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В процессе функционирования КА на орбите бортовой целевой аппаратурой создается целевая информация, которая передается на наземные пункты приема-передачи информации (НППИ). Для уменьшения трафика передачи целевой информации на НППИ она может подвергаться предварительной обработке с целью отсева непригодной для дальнейшей обработки на Земле.

Количество предварительно обрабатываемых блоков данных (БД) может составлять единицы и даже десятки тысяч (определяется характеристиками бортовой целевой аппаратуры и емкостью памяти, предназначенной для их хранения до передачи на НППИ). Чтобы уменьшить число обрабатываемых БД можно, в отличие от традиционной стратегии предварительной обработки, когда обрабатывается все множество БД, использовать другую стратегию предварительной обработки.

Суть стратегии заключается в том, что вводится некоторый индикатор, уточняемый в процессе предварительной обработки БД, и по достижении его директивного значения, свидетельствующего о хорошем качестве БД, дальнейшую обработку прекращают, и все оставшиеся БД считаются годными для передачи на НППИ. Таким индикатором может быть вероятность того, что БД будет пригоден для дальнейшей обработки (вероятность годного БД), при этом вероятность должна уточняться в процессе предварительной обработки БД. Это позволяет использовать байесовский подход к оценке вероятностей [1, 2].

Чтобы обоснованно выбрать одну из двух стратегий для конкретного применения, например по критерию меньших энергозатрат на борту КА для ее реализации или меньшего объема негодной информации, ошибочно признанной годной и переданной на НППИ, нужно уметь оценивать стратегии с этих позиций.



## ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть известно:

$N$  – максимальное количество БД;

$t$  – время предварительной обработки одного БД на БВС;

$\rho_c$  – потребляемая мощность БВС;

$\rho_n$  – потребляемая мощность передатчика;

$g$  – пропускная способность передатчика;

$v$  – размер одного передаваемого БД;

$E_{c,i}$  – энергозатраты БВС при  $i$ -й стратегии;

$E_{n,i}$  – энергозатраты передатчика при  $i$ -й стратегии;

$n_{n,i}$  – число негодных БД, переданных на НППИ при  $i$ -й стратегии.

**Найти:**  $n_{n,i}$  – число негодных БД, переданных на НППИ при  $i$ -й стратегии. Кроме того, сравнить стратегии предварительной обработки множества БД на борту КА с позиции энергозатрат на их реализацию и возможных погрешностей, заключающихся в передаче на НППИ негодных БД.

## ЭНЕРГОЗАТРАТЫ НА РЕАЛИЗАЦИЮ СТРАТЕГИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ НА БОРТУ КА И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Для *первой стратегии*, когда предварительной обработке подвергается все множество БД, энергозатраты БВС будут составлять

$$E_{c,1} = \rho_c N t. \quad (1)$$

Если априори до предварительной обработки доля годных БД из  $N$  составляет  $P_r = \frac{m_r}{N}$  (где  $m_r$  – число годных БД), а вероятность ошибки алгоритма предварительной обработки равна  $P_o$ , то можно ожидать в результате предварительной обработки, что годными будут признаны  $n_r$  БД, т. е.

$$n_r = N [P_r (1 - P_o) + (1 - P_r) P_o], \quad (2)$$

где  $P_r (1 - P_o)$  – доля годных БД, признанных годными после предварительной обработки с вероятностью  $(1 - P_o)$ ;

$(1 - P_r) P_o$  – доля негодных БД, ошибочно признанных годными с вероятностью  $P_o$ .

Тогда энергозатраты на передачу годных БД будут следующими:

$$E_{n,i} = \rho_n \frac{n_r v}{g}, \quad (3)$$

где  $n_r$  определяется из выражения (2).

При использовании *второй стратегии* предварительной обработке подвергаются не все  $N$  БД, а только некоторая выборка из  $M$  БД, такая, что  $M \ll N$ . По полученным результатам обработки в виде числа годных  $m_r$  и числа негодных  $m_n$  БД ( $m_r + m_n = M$ ), применяя байесовский подход, определяется вероятность  $P_r$  годности БД для остальных  $N - M$  БД. Если  $P_r \geq P_d$  (заданное директивное значение вероятности годности БД), то принимается решение

о годности всех остальных  $N - M$  БД к передаче на НППИ. Тогда энергозатраты БВС будут следующими:

$$E_{c,2}^1 = p_c Mt,$$

а энергозатраты передатчика соответственно –

$$E_{n,2}^1 = p_n \frac{(N - m_n)v}{g}.$$

Если неравенство  $P_r \geq P_d$  не выполняется, то берется следующая выборка из  $M$  БД, подвергается предварительной обработке и по ее результатам с помощью байесовского подхода уточняется вероятность  $P_r$ , затем вновь проверяется неравенство  $P_r \geq P_d$  и, если оно выполняется, то

$$E_{c,2}^2 = p_c 2Mt,$$

$$E_{n,2}^2 = p_n \frac{(N - m_{n,1} - m_{n,2})v}{g}.$$

Процесс итераций заканчивается с первым выполнением неравенства  $P_r \geq P_d$ . Для  $i$ -й итерации энергозатраты будут равны:

$$E_{c,2}^i = p_c iMt, \quad (4)$$

$$E_{n,2}^i = p_n \frac{(N - \sum_i m_{n,i})v}{g}. \quad (5)$$

Для сравнения стратегий по энергозатратам найдем разности  $E_{c,1} - E_{c,2}^i$  и  $E_{n,1} - E_{n,2}^i$ , определяемые из выражений (1), (3)–(5):

$$E_{c,1} - E_{c,2}^i = p_c t(N - iM), \quad (6)$$

$$E_{n,1} - E_{n,2}^i = p_n \frac{v}{g} (n_r - N + \sum_i m_{n,i}). \quad (7)$$

Исходя из анализа выражения (6), становится понятно, что в плане экономии энергозатрат на функционирование БВС вторая стратегия выгоднее первой, а в плане энергозатрат на функционирование передатчика, как видно из выражения (7), складывается противоположная картина. Энергозатраты второй стратегии зависят от числа итераций при определении вероятности годности БД методом Байеса. В свою очередь, число итераций зависит от качества информации, содержащейся в БД, и объема выборок  $M$ . Объем выборок может быть небольшим, так как байесовский подход позволяет получить приемлемые результаты при малых выборках данных.

Погрешности стратегий будем измерять в числе негодных БД, переданных на НППИ.

Для первой стратегии число негодных БД, ошибочно признанных годными и переданных на НППИ, находится из выражения

$$n_{n,1} = N(1 - P_r)P_o, \quad (8)$$

где  $P_r$  определяется из выражения (2):

$$P_r = \frac{n_r - NP_o}{N(1 - 2P_o)}.$$

Для второй стратегии возможное число негодных БД, ошибочно признанных годными и переданных на НППИ, определяется выражением

$$n_{n,2} = (N - iM)(1 - P_r), \quad (9)$$

где  $P_r$  – вероятность годности БД, определяемая методом Байеса.

Из анализа выражений (8) и (9) видно, что возможное число негодных БД, ошибочно признанных годными и переданных на НППИ, при использовании второй стратегии может превышать число таких же БД при применении первой стратегии.

## ПРИМЕНЕНИЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА К ОЦЕНИВАНИЮ ПРИГОДНОСТИ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Байесовский подход к оценке вероятностей основывается на теореме Байеса [1, 2]:

$$f(\theta | D) = \frac{f(\theta)P(D|\theta)}{P(D)},$$

где  $\theta$  – параметр модели обработки данных (в нашем случае это вероятность того, что БД будет пригоден для дальнейшей обработки);

$D$  – данные (множество БД);

$f(\theta | D)$  – апостериорная (после обработки данных) плотность распределения параметра;

$f(\theta)$  – априорная (до обработки данных) плотность распределения параметра;

$P(D|\theta)$  – функция правдоподобия (отображает модель обработки данных);

$P(D)$  – функция нормировки (нормирует  $f(\theta | D)$  до плотности распределения),

$$P(D) = \int_{\theta} P(D|\theta) f(\theta) d\theta.$$

Для уточнения параметров апостериорной плотности  $f_2(\theta | D)$  распределения на последующем наборе данных в качестве априорной плотности  $f_2(\theta)$  распределения будет выступать апостериорная плотность распределения  $f_1(\theta | D)$ , полученная после обработки предыдущего набора данных. То есть теорема Байеса может применяться итерационно.

Рассмотрим **определение вероятности годности БД к передаче на НППИ для второй стратегии**.

Из множества БД выбираются  $M$  и подвергаются предварительной обработке. Результатом обработки является последовательность  $s$ , состоящая из  $m_r$  годных БД и  $m_n$  негодных БД, тогда функция правдоподобия  $P(D|\theta)$  будет равна вероятности того, что после обработки кадров получится последовательность  $s$ , которая содержит  $m_r$  годных и  $m_n$  негодных БД:

$$P(D|\theta) = P(s | P_r) = P_r^{m_r} (1 - P_r)^{m_n}, \quad (10)$$

здесь под  $D$  будем понимать последовательность  $s$ , а под  $\theta$  вероятность годного БД  $P_r$ .

Теперь теорема Байеса будет иметь следующий вид

$$f(P_r | s) = \frac{P(s | P_r) f(P_r)}{P(s)}. \quad (11)$$

Если неизвестна априорная плотность распределения  $f(P_r)$  и мы ничего не знаем об алгоритме предварительной обработки БД, то целесообразно выбрать равномерное распределение, т. е.  $f(P_r) = 1$ . Здесь  $P_r$  следует понимать как непрерывную случайную величину, распределенную на интервале  $[0, 1]$ . Учитывая выражения (10) и (11), получим

$$f(P_r | s) = \frac{P_r^{m_r} (1 - P_r)^{m_n}}{P(s)},$$

$$\text{где } P(s) = \int_0^1 P(s | P_r) f(P_r) dP_r = \int_0^1 P_r^{m_r} (1 - P_r)^{m_n} dP_r = \frac{\Gamma(m_r + 1) \Gamma(m_n + 1)}{\Gamma(m_r + m_n + 2)} = \frac{m_r! m_n!}{(m_r + m_n + 1)!}.$$

Тогда

$$f(P_r | s) = \frac{P_r^{m_r} (1 - P_r)^{m_n} (m_r + m_n + 1)!}{m_r! m_n!}. \quad (12)$$

Искомая вероятность годного БД  $P_g$ , являющаяся в данном случае случайной величиной, будет определяться своим математическим ожиданием

$$P_g = M[P_r] = \int_0^1 P_r f(P_r | s) dP_r = \int_0^1 \frac{P_r^{m_r} (1 - P_r)^{m_n} (m_r + m_n + 1)!}{m_r! m_n!} dP_r = \frac{(m_r + 1)}{(m_r + m_n + 2)}. \quad (13)$$

Выражения (12) и (13) справедливы только, когда  $f(P_r) = 1$ . В других случаях следует обращаться к выражениям (10), (11) и вновь получать выражения для  $P(s)$  и  $M[P_r]$ .

### ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ВЫБОРА СТРАТЕГИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И ВЫДАЧИ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Пусть множество БД  $N = 100$ , а вероятность ошибки алгоритма предварительной обработки  $P_o = 0,1$ .

После предварительной обработки при использовании первой стратегии всех БД годными признаны 80% БД, т. е.  $n_g = 80$ .

Тогда для первой стратегии энергозатраты БВС будут определяться выражением (1):

$$E_{c,1} = 100 p_c t,$$

энергозатраты на передачу годных БД – выражением (3):

$$E_{n,1} = 80 \frac{P_n v}{g},$$

а число негодных БД, ошибочно признанных годными и переданных на НППИ, – выражением (8):

$$n_{n,1} = N(1 - P_r) P_o = 2,$$

где  $P_r$  определяется из выражения (2):  $P_r = \frac{n_g - NP_o}{N(1 - 2P_o)} = 0,88$ .

Для второй стратегии возьмем: объем выборки  $M = 10$ ; директивную вероятность  $P_o = 0,8$ ; априорную плотность  $f(P_r) = 1$ , последовательность  $s$  после предварительной обработки составит  $m_r = 8$ ;  $m_n = 2$ .

Тогда среднее значение вероятности годности  $P_r$  будет определяться выражением (13):

$$P_r = M[P_r] = \frac{(m_r + 1)}{(m_r + m_n + 2)} = 0,75.$$

Полученное значение вероятности годности БД определялось без учета вероятности ошибки алгоритма предварительной обработки  $P_o$ . Уточненное значение вероятности годности  $P_{г,у}$  можно найти из выражения

$$P_r = P_{г,у} (1 - P_o) + (1 - P_{г,у}) P_o.$$

Тогда

$$P_{г,у} = \frac{P_r - P_o}{1 - 2P_o} = \frac{0,75 - 0,1}{0,8} = 0,81.$$

Найденное значение вероятности годности БД  $P_{г,у} > P_d$  и дальнейшее уточнение ее значения не требуются, тогда число итераций  $i = 1$ .

Для второй стратегии энергозатраты будут определяться выражениями (4) и (5):

$$E_{c,2}^1 = p_c M t = 10 p_c t,$$

$$E_{n,2}^1 = p_n \frac{(N - m_{n,1})v}{g} = 98 \frac{p_n v}{g},$$

а число негодных БД, ошибочно признанных годными и переданных, – выражением (9):

$$n_{n,2} = (N - M)(1 - P_{г,у}) = 90 \cdot 0,19 = 17.$$

Для сравнения стратегий по энергозатратам найдем разности  $E_{c,1} - E_{c,2}^i$  и  $E_{n,1} - E_{n,2}^i$ :

$$E_{c,1} - E_{c,2}^i = 100 p_c t - 10 p_c t = 90 p_c t,$$

$$E_{n,1} - E_{n,2}^i = 80 \frac{p_n v}{g} - 98 \frac{p_n v}{g} = -18 \frac{p_n v}{g},$$

а по числу негодных БД, ошибочно признанных годными и переданных на НППИ, найдем разность  $n_{n,1} - n_{n,2}$ :

$$n_{n,1} - n_{n,2} = -15.$$

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что для данного применения вторая стратегия значительно выигрывает у первой стратегии по энергозатратам БВС, незначительно проигрывает по энергозатратам передатчика и уступает первой стратегии по числу негодных БД, ошибочно признанных годными и переданных на НППИ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая в статье концепция организации предварительной обработки целевой информации позволяет выбрать одну из стратегий в зависимости от установленного критерия. Таким критерием могут быть меньшие энергозатраты на борту КА или меньший объем негодной информацией, ошибочно признанной годной и переданной на НППИ.

Теоретическая ценность предложенной концепции заключается в возможности рациональной реализации предварительной обработки различной информации в зависимости от требований к энергозатратам и погрешности в ее обработке.

## Список используемых источников

1. *Бернардо Хосе М., Смит Адриан Ф.М.* Байесовская теория. Вайли. – 1994.
2. *Венцель Е.С.* Теория вероятностей: учебник для вузов. – 5-е изд. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

А.А. Бородюк;  
А.Н. Сакулин,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
В.Л. Якимов,  
*доктор техн. наук, доцент*

## **АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИГАУССОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Рассмотрен подход к выявлению существенных особенностей изменения временных рядов телеметрируемых параметров бортовых систем космических аппаратов, созданию полигауссовских моделей телеметрируемых параметров и моделей их изменения на основе ориентированных графов с использованием процедуры кластеризации. Предложен алгоритм динамической кластеризации временных рядов, отличием которого является учет особенностей объектов кластеризации – фазовых портретов анализируемых телеметрируемых параметров. Представлены результаты применения разработанного алгоритма динамической кластеризации для формирования полигауссовских моделей временных рядов реальных телеметрируемых параметров объектов ракетно-космической техники.

Ключевые слова: космический аппарат, телеметрируемый параметр, фазовое пространство, динамическая кластеризация.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Важной задачей технического диагностирования космических аппаратов (КА) является определение текущей ситуации функционирования (СФ) бортовой аппаратуры (БА) путем сопоставления ее признаков с признаками известных СФ БА из базы данных КА. Одним из способов решения данной задачи является многомодельный подход, основанный на разработке множества моделей изменения телеметрируемых параметров (ТМП) КА в различных СФ, соотнесения временных рядов ТМП, полученных по результатам сеанса управления КА с данными моделями, анализа полученных результатов соотнесения и формирования вывода о текущей СФ КА. При реализации данного подхода качество решения задачи распознавания СФ КА напрямую зависит от выбранного подхода к построению моделей изменения ТМП [1].

Получаемые по результатам сеанса управления КА реализации ТМП, характеризующие СФ БА, преимущественно представляют собой реализации сложного динамического процесса функционирования БА и включают достаточно большое количество дискретных отсчетов (несколько десятков тысяч). Это позволяет анализировать поведение бортовых систем КА в проекциях фазового пространства ТМП, а также реализовать его реконструкцию с возможностью построения моделей изменения ТМП, описывающих аттрактор анализируемой динамической системы (ДС) [2, 3]. В настоящее время разработано достаточно много подходов к формированию моделей изменения временных рядов телеметрируемых параметров в фазовом пространстве: на основе статистического и логического описания фазовых траекторий, на основе полиномиальных моделей, описывающих аттрактор системы, на основе кластеризации фазовых портретов системы и т. д. [4–7].

Проведенный анализ показал, что одним из достаточно перспективных подходов к построению моделей изменения телеметрируемых параметров сложных технических систем является подход на основе полигауссовской аппроксимации временных рядов анализируемых параметров в проекциях фазового пространства [7]. Формируемые при рассматриваемом

подходе модели изменения ТМП позволяют достичь больших значений вероятности правильной классификации временных рядов, чем при использовании классических моделей изменения временных рядов на основе полиномиальной авторегрессии и перспективных подходов классификации на основе многослойных нейронных сетей. Получаемые при данном подходе нелинейные признаки состояния ДС способствуют значительному повышению вероятности правильного распознавания временных рядов ТМП в сравнении с линейными признаками на основе производных или приращений различных порядков, мел-кепстральных коэффициентов и т. п. [7, 8].

Важным этапом создания полигауссовских моделей изменения временных рядов ТМП является локализация областей в фазовом пространстве, существенных с точки зрения описания поведения системы, через которые проходят фазовые траектории. Классический подход к решению такой задачи основан на использовании методов кластеризации, таких как метод EM-кластеризации, алгоритмы  $k$ -means,  $c$ -means и т. п. [9].

Применительно к решению задачи кластеризации ТМП в фазовом пространстве все перечисленные подходы не учитывают важных особенностей объекта кластеризации: наличия направленного изменения состояния системы в фазовом пространстве вдоль фазовой траектории; наличия важных для описания поведения системы областей, характеризующихся малой плотностью фазовых состояний; наличия связи между результатами кластеризации и исходным временным рядом ТМП. Кроме того, перечисленные подходы не позволяют правильно описать аттрактор ДС при наличии значительных шумов и помех во временных рядах ТМП, требуют априорной информации о количестве кластеров в каждой проекции фазового пространства (метод EM-кластеризации), что не всегда известно, и не позволяют эффективно управлять точностью аппроксимации аттрактора системы в фазовом пространстве. Данные недостатки отражаются на точности описания поведения системы и низком качестве модели изменения ТМП в фазовом пространстве. В результате модернизации перечисленных алгоритмов кластеризации, осуществляемой с целью устранения обозначенных недостатков, значительно увеличивается количество требуемых вычислений.

В данной статье предлагается алгоритм динамической кластеризации, который позволяет учесть перечисленные особенности объекта кластеризации – фазовых портретов ТМП бортовых систем КА, улучшить адекватность разрабатываемых моделей их изменения и, как следствие, повысить вероятность правильной классификации СФ КА при анализе ТМП БА.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с теоремой Ф. Такенса, формулирующей требования к реконструкции фазового пространства ДС. Поведение ДС можно описать по временной реализации их параметров с использованием метода задержек [4]. При этом ТМП ДС представляется дискретными отсчетами:  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_M$ , где  $M$  – количество отсчетов, полученных с интервалом  $\Delta t$ , который обычно выбирается равным времени первого пересечения нуля автокорреляционной функцией временного ряда [4]. Эту оценку можно считать верхней, а прореживание временного ряда осуществлять исходя из качества решения целевой задачи. Для цифровых систем значение  $\Delta t$  кратно периоду дискретизации временного ряда ТМП. Под состояниями ДС будем понимать точки  $\mathbf{X}_0 = [x_0 \ x_1 \ \dots \ x_{N-1}]$ ,  $\mathbf{X}_1 = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]$ , ...,  $\mathbf{X}_{M-N} = [x_{M-N} \ x_{M-N+1} \ \dots \ x_{M-1}]$  в  $N$ -мерном фазовом пространстве. При определении размерности аттрактора  $N$  по реализации ТМП будем использовать метод ложных ближайших соседей [4].

Для формализации поведения ДС в проекциях фазового пространства целесообразно ввести набор векторов наблюдения и векторов состояния для каждой  $j$ -й проекции фазового портрета ДС. Вектор наблюдения ДС в каждой  $j$ -й проекции фазового пространства для  $k$ -го дискретного отсчета времени определим на основании измеренных значений ТМП следую-

щим образом:  $\mathbf{X}_{j,k} = \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k+j} \end{bmatrix}$ , где  $x_k, x_{k+j}$  – сдвинутые отсчеты временного ряда значений ТМП.

Под вектором состояния ДС в каждой  $j$ -й проекции фазового портрета для  $k$ -го дискретного отсчета времени будем понимать вектор  $\mathbf{Q}_{j,k} = \begin{bmatrix} q_{x,j,k} \\ q_{y,j,k} \end{bmatrix}$ , где  $q_{x,j,k}, q_{y,j,k}$  – компоненты вектора состояния, характеризующего области фазового пространства, принадлежащие аттрактору ДС.

В результате кластеризации векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  в  $j$ -х проекциях фазового пространства реализуется покрытие аттрактора набором кластеров, центры которых описываются векторами  $\boldsymbol{\mu}_j^{(g)}$ , имеющими компоненты  $\mu_{x,j,k}, \mu_{y,j,k}$ . При идеальной кластеризации векторы  $\boldsymbol{\mu}_j^{(g)}$  и  $\mathbf{Q}_{j,k}$  равны друг другу. Процесс кластеризации векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  можно связать с их распределением в каждой  $j$ -й проекции фазового пространства, которое имеет закон, преимущественно отличный от нормального. В процессе кластеризации векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  в каждой  $j$ -й проекции фазового пространства можно реализовать аппроксимацию функции их распределения  $W_{ps,j}(\mathbf{X}_{j,k})$  полигауссовской моделью [7, 8, 10]:

$$W_{ps,j}(\mathbf{X}_{j,k}) = \sum_{g=1}^{N_{gr,j}} \omega_j^{(g)} \eta_j^{(g)}(\mathbf{X}_{j,k} | \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}), \quad (1)$$

где  $g$  – номер гауссовского распределения в  $j$ -й проекции фазового пространства,  $g=1 \dots N_{gr,j}$ ,  $\eta_j^{(g)}(\mathbf{X}_{j,k} | \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)})$  – функция  $g$ -го гауссовского распределения в  $j$ -й проекции фазового пространства,  $\boldsymbol{\mu}_j^{(g)}$  – вектор координат математического ожидания  $g$ -го распределения,  $\boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}$  – корреляционная матрица  $g$ -го распределения,  $\omega_j^{(g)}$  – вес  $g$ -го распределения,  $N_{gr,j}$  – количество гауссовских распределений в  $j$ -й проекции фазового пространства. Для весов  $\omega_j^{(g)}$  выполняется условие нормировки  $\sum_{g=1}^{N_{gr,j}} \omega_j^{(g)} = 1$ . При использовании полигауссовского

распределения локализуемые в  $j$ -й проекции фазового пространства области (кластеры) имеют форму эллипса со следующими характеристиками: координаты центра определяются вектором  $\boldsymbol{\mu}_j^{(g)}$ , размеры осей – элементами главной диагонали матрицы  $\boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}$  и заданной доверительной вероятностью (обычно равной 0.96), угол наклона эллипса к оси абсцисс на фазовой плоскости –  $\alpha_j^{(g)}$ . При этом все векторы  $\mathbf{X}_{j,k}$  принадлежат  $N_{gr,j}$  многомерным гауссовским распределениям вида  $\omega_j^{(g)} \eta_j^{(g)}(\mathbf{X}_{j,k} | \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)})$  с неизвестными параметрами  $\omega_j^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}$ . Для нахождения параметров  $\omega_j^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}$  используемых гауссовских распределений обычно применяют подход, получивший название EM-кластеризации и основанный на максимизации логарифма функции правдоподобия  $\Lambda_j(\mathbf{X}_{j,k}, \omega_j^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)})$ :

$$\Lambda_j(\mathbf{X}_{j,k}, \omega_j^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}) = \prod_{k=1}^{m_{ps,j}} W_{ps,j}(\mathbf{X}_{j,k}), \quad (2)$$

$$(\omega_j^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)})_{\max} = \operatorname{argmax}_{\omega_j^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}} \left( \ln \Lambda_j(\mathbf{X}_{j,k}, \omega_j^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}) \right),$$

где  $m_{ps,j}$  – общее количество векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  в  $j$ -й проекции фазового пространства.

На рис. 1,а представлен фазовый портрет ДС в  $j$ -й проекции и его полигауссовская модель. При этом множество характеристик  $g$ -х кластеров –  $\{\boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)}, \alpha_j^{(g)}\}$  – описывает состояния ДС и может быть использовано для решения задачи классификации временных рядов ТМП [7, 8]. Повысить достоверность классификации временных рядов ТМП и, следовательно, качество распознавания СФ ДС можно путем анализа вероятности прохождения фазовых траекторий через фазовые состояния, определения вероятности соответствующих переходов



в каждой  $j$ -й проекции и формирования модели изменения ТМП в фазовом пространстве на основе ориентированных графов. На рис. 1,б представлена данная модель, которую можно отнести к классу скрытых марковских моделей и целесообразно использовать для первичной обработки временных рядов ТМП, их классификации, а также распознавания СФ ДС [3].

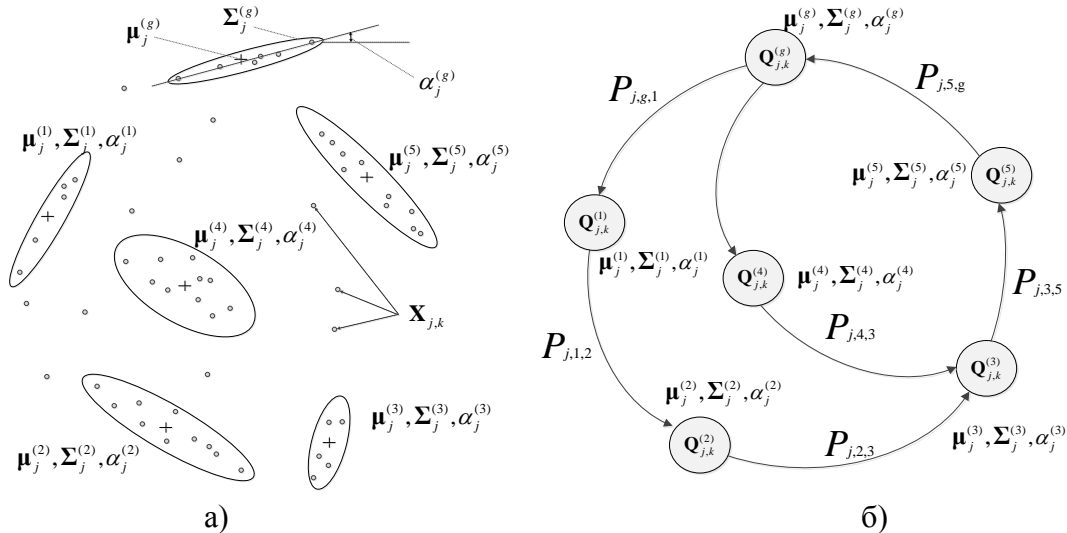


Рис. 1. Фазовый портрет ДС и его модели в  $j$ -й проекции фазового пространства: а – полигауссовская модель; б – модель на основе ориентированного графа

На практике реализуются различные модификации метода EM-кластеризации, которые стремятся устранить отдельные его недостатки. Учесть особенности фазовых портретов и получить более точные приближения множества аппроксимируемых точек набором  $g$ -х гауссовских распределений можно на основе динамической кластеризации [12, 13]. Процесс динамической кластеризации показан на рис. 2.

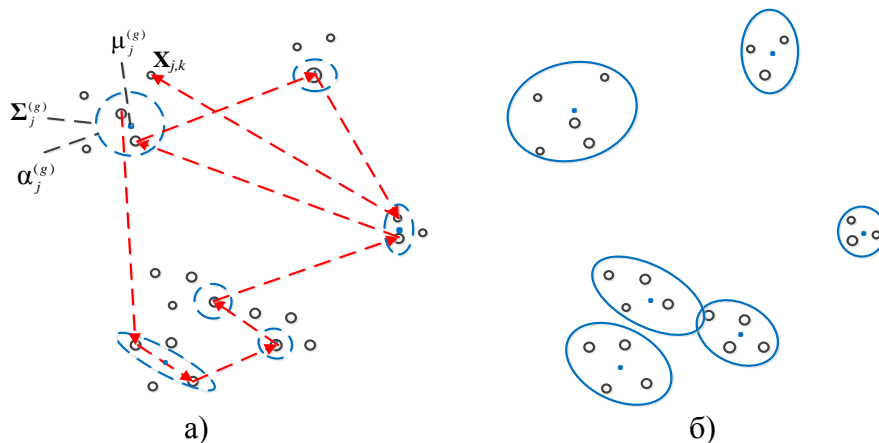


Рис. 2. Процесс динамической кластеризации векторов  $X_{j,k}$  в проекции фазового пространства: а – на промежуточном этапе; б – на конечном этапе

На рис. 2,а показан промежуточный этап процесса кластеризации, в ходе которого происходит объединение векторов  $X_{j,k}$  в кластеры при движении вдоль фазовой траектории в проекциях фазового пространства. При этом вектор  $X_{j,k}$  попадает в кластер, если находится от его центра на максимальном расстоянии  $r_{cl}$ . На рис. 2,б представлен конечный этап динамической кластеризации, при котором формирование кластеров уже завершено и реализуются завершающие процедуры коррекции отдельных аномальных кластеров, имеющих следую-

щие отличия: соотношение большей и меньшей осей аппроксимирующих эллипсов получаемых кластеров превышает значение  $a_{cl}$ ; в кластере содержится менее чем  $m_{cl}$  векторов. При этом векторы  $\mathbf{X}_{j,k}$  таких кластеров перераспределяются между ближайшими кластерами.

Так как целевая функция (2) не отражает связь между результатами кластеризации ТМП в фазовом пространстве и погрешностью аппроксимации исходных временных рядов ТМП, то корректно использовать в качестве целевой функции непосредственно среднеквадратическую погрешность полигауссовской аппроксимации временного ряда ТМП. С этой целью необходимо разработать алгоритм преобразования центров полученных кластеров  $\mu_{j,k}$  в каждой  $j$ -й проекции фазового пространства в отсчеты аппроксимирующего временного ряда  $\{\hat{x}_k\}$ . При этом целевая функция процесса динамической кластеризации будет представлять собой следующее выражение:

$$E_A(r_{cl}, m_{cl}, a_{cl}, \Delta t) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (x_k - \hat{x}_k)^2}, \quad (3)$$

$$\{r_{cl}, m_{cl}, a_{cl}, \Delta t\}_{opt} = \arg \min (E^2(\{r_{cl}, m_{cl}, a_{cl}, \Delta t\})),$$

где  $x_k$  – исходные отсчеты временного ряда ТМП;

$\hat{x}_k$  – отсчеты временного ряда ТМП, полученные по результатам кластеризации векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  в каждой  $j$ -й проекции фазового пространства.

## ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Для реализации динамической кластеризации временных рядов ТМП разработан алгоритм, минимизирующий целевую функцию (3) в каждой  $j$ -й проекции фазового пространства. Алгоритм включает в себя следующие шаги.

*Шаг 1.* Загружаем временные отсчеты реализации ТМП  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_M$ . Определяем размерность фазового пространства  $N$  на основе метода ложных ближайших соседей [4]. В каждой  $j$ -й проекции фазового пространства формируем множество векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$ . Вводим: количество итераций алгоритма  $N_s$ ; параметры кластеризации:  $r_{cl}, m_{cl}, \Delta t, a_{cl}$ ; заданное значение погрешности аппроксимации ТМП  $E_{A,зад}$ .

*Шаг 2.* Выбираем проекцию фазового пространства  $j=1$ .

*Шаг 3.* Вводим номер итерации алгоритма  $s=1$ .

*Шаг 4.* Вводим номер вектора  $k=1$ .

*Шаг 5.* Загружаем вектор  $\mathbf{X}_{j,k}$ . Если вектор  $\mathbf{X}_{j,k}$  не принадлежит множеству кластеров  $\{\mathbf{Q}_j^{(s)}\}$ , то вводим новый текущий кластер  $\mathbf{Q}_j^{(s)}$  и добавляем его к множеству всех кластеров  $\{\mathbf{Q}_j^{(s)}\}$ . Переходим на шаг 6. Если вектор  $\mathbf{X}_{j,k}$  принадлежит кластеру из множества кластеров  $\{\mathbf{Q}_j^{(s)}\}$ , то переходим на шаг 8.

*Шаг 6.* Реализуем поиск всех векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  на расстоянии  $r_{cl}$  от  $\mu_j^{(s)}$  и включаем их в кластер  $\mathbf{Q}_j^{(s)}$ :

$$\mathbf{X}_{j,k} \rightarrow \mathbf{Q}_j^{(s)}, \|\mathbf{X}_{j,k} - \mu_j^{(s)}\| \leq r_{cl}.$$

*Шаг 7.* Реализуем пересчет параметров  $(\omega_j^{(s)}, \mu_j^{(s)}, \Sigma_j^{(s)})$  текущего кластера  $\mathbf{Q}_j^{(s)}$  на основе изменившейся информации о входящих в него векторах  $\mathbf{X}_{j,k}$ .

*Шаг 8.* Реализуем поиск кластеров, имеющих пересечения с текущим кластером  $\mathbf{Q}_j^{(s)}$ . Переатназначаем векторы  $\mathbf{X}_{j,k}$  из кластера в кластер на основе критерия близости:

$$\mathbf{X}_{j,k} \rightarrow \mathbf{Q}_j^{(g_2)} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}_{j,k} \in \mathbf{Q}_j^{(g_1)}, \\ \|\mathbf{X}_{j,k} - \boldsymbol{\mu}_j^{(g_2)}\| \leq \|\mathbf{X}_{j,k} - \boldsymbol{\mu}_j^{(g_1)}\|, \end{array} \right.$$

где  $g_1, g_2$  – номера пересекающихся кластеров  $\mathbf{Q}_j^{(g_1)}$  и  $\mathbf{Q}_j^{(g_2)}$ .

*Шаг 9.* Реализуем поиск и объединение кластеров, полностью входящих в кластер  $\mathbf{Q}_j^{(g)}$ :

$$\mathbf{Q}_j^{(g_1)} \rightarrow \mathbf{Q}_j^{(g_2)}, \mathbf{Q}_j^{(g_1)} \in \mathbf{Q}_j^{(g_2)}.$$

*Шаг 10.* Увеличиваем значение  $k=k+1$ . Если  $k \leq M$ , то выполняем шаг 5, в противном случае выполняем шаг 11.

*Шаг 11.* Проверяем выполнение следующего условия: если  $s \leq N_s$ , то выполняем шаг 4, в противном случае выполняем шаг 12.

*Шаг 12.* Анализируем кластеры  $\mathbf{Q}_j^{(g)}$  в  $j$ -й проекции фазового пространства. Исключаем из множества  $\{\mathbf{Q}_j^{(g)}\}$  те кластеры, у которых соотношение размера большей оси к меньшей оси аппроксимирующего эллипса превышает значение  $a_{cl}$ , а также у которых число векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  меньше  $m_{cl}$ . Получаемые при этом свободные векторы  $\mathbf{X}_{j,k}$  распределяем между ближайшими кластерами, пересчитываем их параметры  $(\boldsymbol{\omega}_j^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_j^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}_j^{(g)})$ .

*Шаг 13.* Проверяем выполнение следующего условия: если  $j < N-1$ , то увеличиваем  $j=j+1$  и выполняем шаг 3, в противном случае выполняем шаг 14.

*Шаг 14.* Определяем значения отсчетов аппроксимирующего временного ряда ТМП  $\{\hat{x}_k\}$  на основе полученных множеств кластеров  $\{\mathbf{Q}_j^{(g)}\}$  и векторов  $\boldsymbol{\mu}_j^{(g)}$  в  $N-1$  проекции фазового пространства.

*Шаг 15.* Вычисляем значение целевой функции  $E_A$  (3). Если  $E_A > E_{A,зад}$ , то изменяем параметры кластеризации ( $r_{cl}, m_{cl}, \Delta t, a_{cl}$ ), выполняем шаги 1–15. Если  $E_A \leq E_{A,зад}$ , то заканчиваем выполнение алгоритма.

Выполнение шага 14 и получение значений аппроксимирующего временного ряда ТМП  $\{\hat{x}_k\}$  реализуется в два этапа.

На первом этапе в каждой  $j$ -й проекции фазового пространства реализуется усреднение координат последовательности векторов  $\boldsymbol{\mu}_j^{(g)}$  с учетом фазового сдвига. К примеру, в проекции  $j=1$  при движении от кластера к кластеру вдоль фазовой траектории получается следующее распределение компонентов векторов  $\boldsymbol{\mu}_j^{(g)}$ :

$$\begin{array}{cccccccc} \mu_{x,1,k} & \mu_{y,1,k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{x,1,k+1} & \mu_{y,1,k+1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{x,1,k+2} & \mu_{y,1,k+2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_{x,1,k+3} & \mu_{y,1,k+3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{x,1,k+4} & \mu_{y,1,k+4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{x,1,k+5} & 0 & 0 \\ & & & & \dots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{x,1,k+N-1} & \mu_{y,1,k+N-1} \end{array} \quad (4)$$

На основе матрицы данных (4) формируется вектор средних значений по каждому столбцу матрицы (4), имеющий, к примеру, следующий вид:  $\mathbf{x}_{1,k}^* = [x_{1,k}^*, x_{1,k+1}^*, x_{1,k+2}^*, \dots, x_{1,k+N-1}^*]$ .

На втором этапе, полученные в каждой  $j$ -й проекции фазового пространства  $N-1$  компоненты  $x_{j,k}^*$  временного ряда ТМП используются для формирования отсчетов  $\hat{x}_k$  аппроксими-

рующего временного ряда ТМП следующим образом:  $\hat{x}_k = \sum_{j=1}^{N-1} v_j x_{j,k}^*$ , где  $v_j$  – коэффициенты, получаемые на основе метода наименьших квадратов и минимизирующие значение целевой функции (3).

Результатом работы алгоритма являются полигауссовские модели временного ряда ТМП в каждой проекции фазового пространства, позволяющие, в свою очередь, сформировать модели изменения ТМП на основе ориентированных графов. Для решения задачи классификации временных рядов ТМП целесообразно производить отбор полученных моделей не только на основе погрешности аппроксимации временных рядов ТМП на обучающей выборке в соответствии с целевой функцией (3), но и на основе показателя вероятности их правильной классификации на проверочной выборке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объекта исследования были использованы ТМП малого КА. Показана возможность отображения в фазовом пространстве временных рядов разнородных функциональных и сигнальных ТМП, а также сигнальных параметров с реализацией процедуры амплитудного уплотнения их значений [14].

На рис. 3 представлены результаты динамической кластеризации векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  в  $j$ -й проекции фазового пространства функционального ТМП ориентации малого КА на Землю (рис. 3,а и б) и сигнального ТМП включения/выключения солнечной батареи (рис. 3,в и г).

Пример представления кластеров векторов  $\mathbf{X}_{j,k}$  в  $j$ -й проекции фазового пространства ТМП ориентации малого КА на Землю с отображением возможных переходов показан на рис. 4,а. На рис. 4,б представлены все  $(N-1)$  компоненты  $\mathbf{x}_{j,k}^*$ , получаемые в  $j$ -х проекциях фазового пространства ТМП ориентации малого КА на Землю.

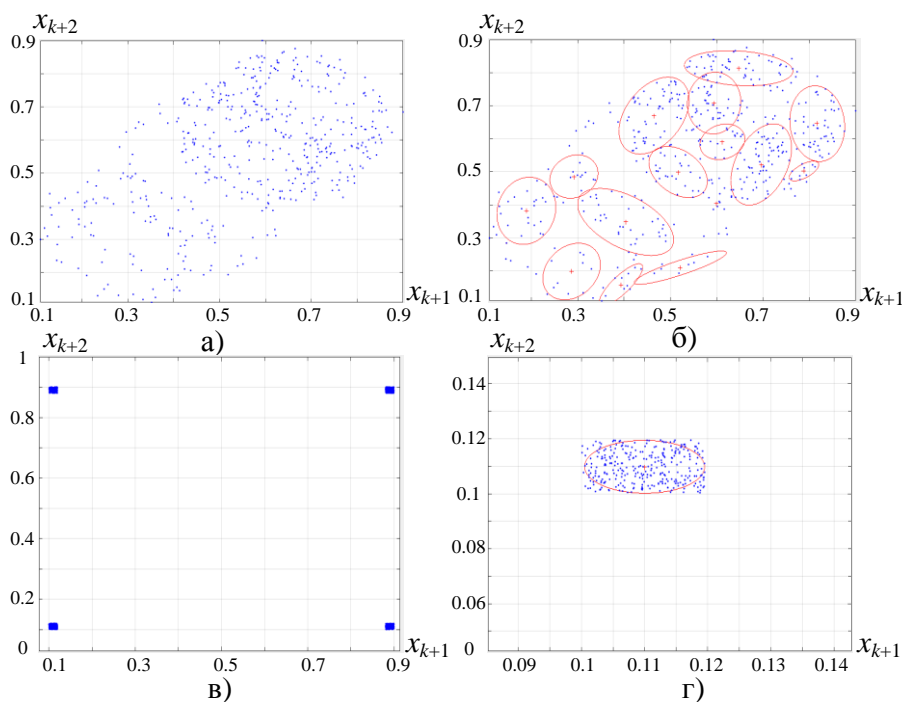


Рис. 3. Результат динамической кластеризации ТМП в проекциях фазового пространства:  
а, б – функционального; в, г – сигнального

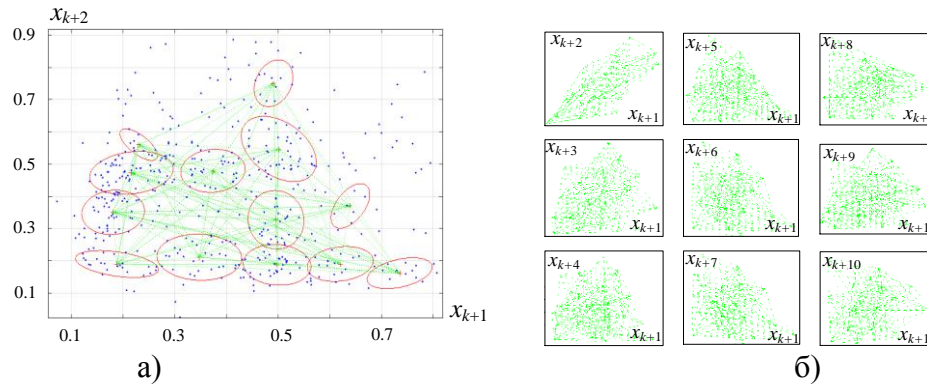


Рис. 4. Результаты:

*а* – динамической кластеризации векторов  $X_{j,k}$  в проекции фазового пространства ТМП\* с переходами между фазовыми состояниями; *б* – разложения ТМП на компоненты  $x_{j,k}$  в проекциях фазового пространства

На рис. 5,а представлены зависимости погрешности аппроксимации от максимального расстояния  $r_{cl}$  между векторами  $X_{j,k}$  при заданных минимальных допустимых количествах векторов  $X_{j,k}$  в кластере  $m_{cl}$  и заданном интервале дискретизации временного ряда ТМП  $\Delta t$ , равном интервалу корреляции ( $\Delta t = 50$  дискретных отсчетов). Кривая 1 соответствует  $m_{cl}=1$ , кривая 2 –  $m_{cl}=2$ , кривая 3 –  $m_{cl}=3$ , кривая 4 –  $m_{cl}=4$ , кривая 5 –  $m_{cl}=5$ .

Анализ приведенных зависимостей показывает, что существует оптимальное расстояние  $r_{cl}$  между векторами  $X_{j,k}$ , обеспечивающее минимальную погрешность аппроксимации временного ряда ТМП. Объяснить данную особенность можно на основе представлений о покрытии аттрактора областями различной площади. Если площадь области меньше определенного размера, определяемого уровнем шумов и помех, то аппроксимирующая фазовая траектория начинает совершать случайные колебания относительно истинной траектории, что, в среднем, ухудшает погрешность аппроксимации.

На рис. 5,б представлены зависимости погрешности аппроксимации от минимального допустимого количества векторов  $X_{j,k}$  в кластере  $m_{cl}$  при заданных максимальных расстояниях  $r_{cl}$  между векторами  $X_{j,k}$  и заданном интервале дискретизации временного ряда ТМП  $\Delta t$ , соответствующем интервалу корреляции ( $\Delta t = 50$  дискретных отсчетов). Кривая 1 соответствует  $r_{cl}=0.02$ , кривая 2 –  $r_{cl}=0.03$ , кривая 3 –  $r_{cl}=0.04$ , кривая 4 –  $r_{cl}=0.05$ , кривая 5 –  $r_{cl}=0.06$ . Увеличение погрешности аппроксимации на рис. 5,б с ростом параметра  $m_{cl}$  обусловлено тем, что, исключая из рассмотрения все кластеры, содержащие менее чем  $m_{cl}$  векторов  $X_{j,k}$ , мы уменьшаем общее количество кластеров и тем самым увеличиваем погрешность аппроксимации.

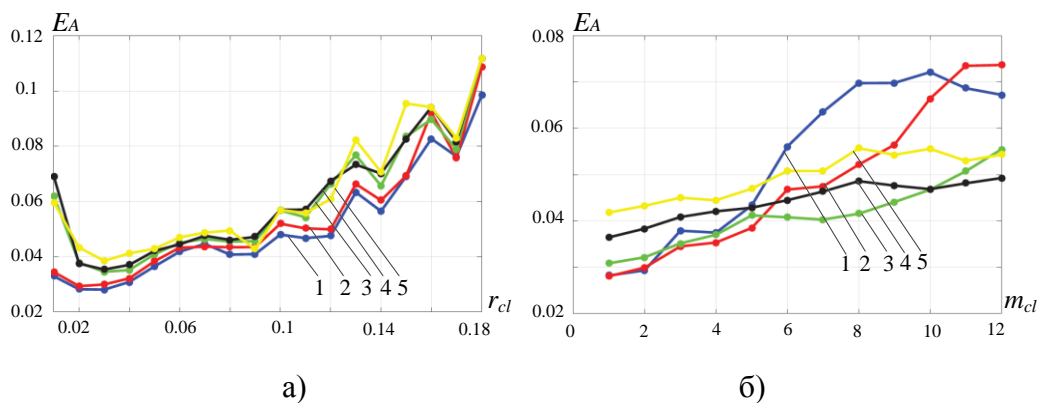


Рис. 5. Зависимости погрешности аппроксимации функционального ТМП: *а* – от максимального расстояния между векторами; *б* – от минимального количества векторов в кластере

На рис. 6,а представлены зависимости погрешности аппроксимации от величины интервала дискретизации  $\Delta t$  при различных параметрах динамической кластеризации: кривая 1 – при  $r_{cl}=0.03$ ,  $m_{cl}=3$ ; кривая 2 – при  $r_{cl}=0.05$ ,  $m_{cl}=5$ .

На рис. 6,б представлены зависимости исходного временного ряда ТМП ориентации на Землю (кривая 1), аппроксимированного временного ряда ТМП (кривая 2), доверительного интервала на значение аппроксимированного временного ряда ТМП, полученного на основе компонента разложения временного ряда в фазовом пространстве с доверительной вероятностью 0.96 (кривая 3) при следующих параметрах динамической кластеризации:  $\Delta t=10$ ,  $r_{cl}=0.03$ ,  $m_{cl}=3$ . На рисунке также выделены точки, которые были использованы для разложения ТМП на компоненты в фазовом пространстве (кривая 1) и получены при последующем восстановлении ТМП (кривая 2). Данные точки использованы как узлы кубической интерполяции для заполнения интервалов  $\Delta t$  значениями временных рядов ТМП (кривая 3). Представленные результаты позволяют сделать вывод о возможности разложения временных рядов ТМП на составляющие по результатам анализа проекций их фазовых портретов и управления процессом кластеризации с целью детализации особенностей анализируемых процессов.

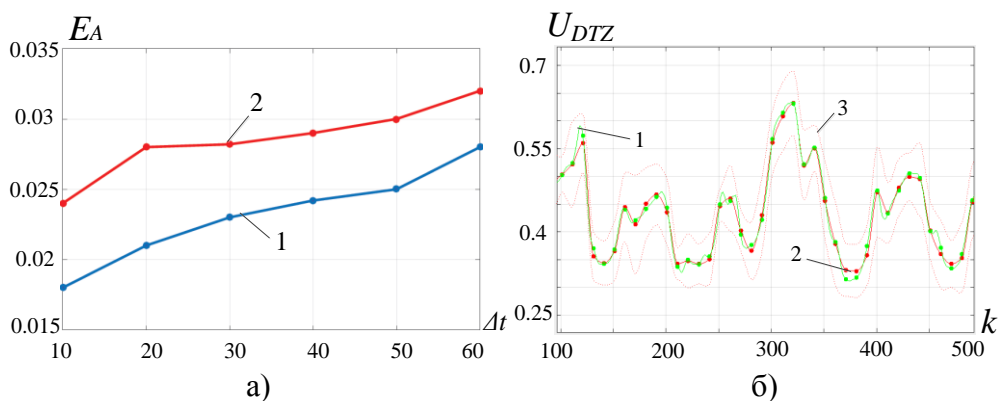


Рис. 6. Зависимости:

а – зависимость погрешности аппроксимации ТМП от интервала дискретизации;  
 б – зависимость временных рядов функционального ТМП, полученных в результате аппроксимации

Исследования проводились также и для сигнальных ТМП. На рис. 7 представлены исходные (кривая 1) и аппроксимирующие (кривая 2) зависимости ТМП «включения/выключения» СБ КА, полученные на основе обработки их значений в фазовом пространстве

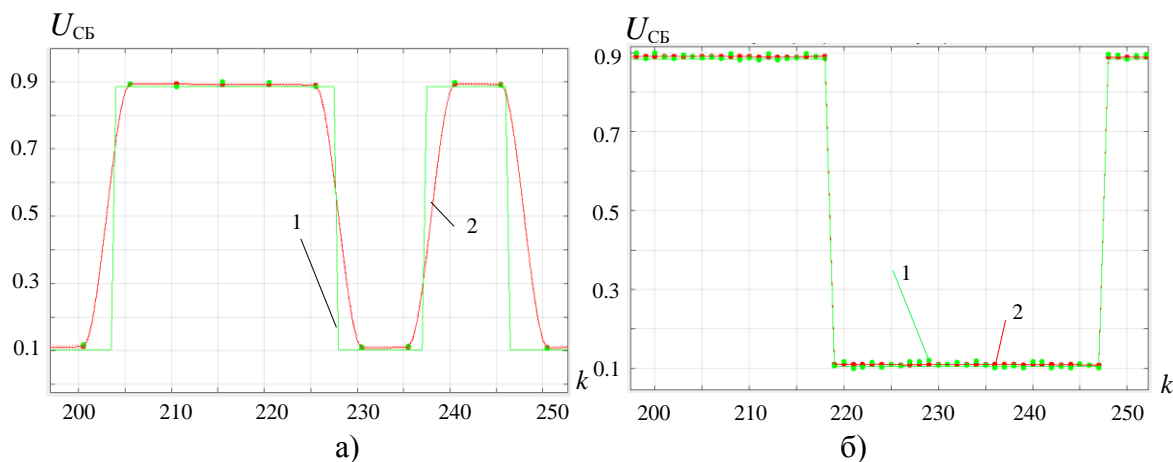


Рис. 7. Результаты аппроксимации сигнального ТМП на основе анализа их значений в проекциях фазового пространства при различных интервалах дискретизации

при различных интервалах дискретизации:  $\Delta t=20$  (рис. 7,а),  $\Delta t=1$  (рис. 7,б). Исследования показали, что аппроксимация сигнальных ТМП осуществляется с хорошим качеством в широком диапазоне изменения параметров кластеризации. На погрешность аппроксимации сигнальных ТМП наиболее сильное влияние оказывает выбор интервала дискретизации.

Полученные результаты, в целом, позволяют сделать вывод о достаточно высоком качестве разработанного алгоритма динамической кластеризации фазовых портретов ТМП и малых вычислительных затратах, необходимых для формирования полигауссовских моделей ТМП в проекциях фазового пространства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так как модели анализируемых процессов не всегда известны, но имеется база измерительной и экспертной информации по результатам многочисленных испытаний и эксплуатации однотипных КА, то для описания временных рядов ТМП в фазовом пространстве можно использовать полигауссовские модели, а также модели изменения ТМП в проекциях фазового пространства.

Проведенный анализ показал высокую эффективность таких моделей для решения задач классификации временных рядов ТМП. Формирование подобных моделей на основе предлагаемого алгоритма позволяет исключить множество недостатков, характерных для классических алгоритмов кластеризации, так как в процессе разработки и реализации алгоритма учитываются особенности объекта и фазовых портретов ТМП в различных проекциях фазового пространства, а также непосредственная связь со значениями временных рядов ТМП. Разработанный алгоритм полностью применим для работы с временными рядами разнородных ТМП объектов ракетно-космической техники. Важным достоинством разработанного алгоритма динамической кластеризации является наличие эффективного механизма управления процессом кластеризации и полигауссовской аппроксимации временных рядов анализируемых ТМП.

## Список используемых источников

1. Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – Ч. 1. – 476 с.
2. Никульчев Е.В. Геометрический подход к моделированию нелинейных систем по экспериментальным данным. – М.: МГУП, 2007. – 162 с.
3. Харченко А.В., Якимов В.Л. Метод обработки телеметрической информации в фазовом пространстве бортовых динамических систем космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 161–171.
4. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.
5. Хищенко В.И. Вероятностная структура фазовых траекторий случайных процессов // Информационно-управляющие системы. – 2016. – №3(82). – С. 85–94.
6. Коваленко Д.С. Метод автоматического построения алгоритмов распознавания участков фазовых траекторий // Моделирование и анализ информационных систем. – 2009. – Т. 16, № 4. – С. 6–21.
7. Lindgren A.C., Johnson M.T., Povinelli R.J. Joint frequency domain and reconstructed phase space features for speech recognition // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal. – 2004. – Vol. I. – P. 533–536.

8. *Lindgren A.C., Johnson M.T., Povinelli R.J.* Speech recognition using reconstructed phase space features // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Hong Kong, China. – 2003. – Vol. I. – P. 61–63.
9. *Королёв В.Ю.* EM-алгоритм, его модификации и их применение к задаче разделения смесей вероятностных распределений. Теоретический обзор. – М.: ИПИРАН, 2007. – 94 с.
10. *Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С.* Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
11. *Черезов Д.С., Тюкачев Н.А.* Обзор основных методов классификации и кластеризации данных // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. – 2009. – № 2. – С. 25–29.
12. *Печень Е.А., Аль-Хашеди А.А., Нуриев Н.К.* Математическая модель динамической кластеризации в задачах распознавания образов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 5. – С. 124–130.
13. *Bouchachia A.* Dynamic Clustering // Evolving Systems. – New York: Springer-Verlag, 2012. – Vol. 3, is. 3. – P. 133–134.
14. Современная телеметрия в теории и на практике / А. В. Назаров [и др.]. – СПб.: Наука и техника, 2007. – 667 с.



А.Н. Дьяков,  
кандидат техн. наук;

А.С. Кокарев,  
кандидат техн. наук;

А.А. Левчук,  
кандидат техн. наук

## **МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПЕРЕДАЮЩЕГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

В публикации представлено обоснование актуальности совершенствования системы технического обслуживания и ремонта передающего радиотехнического объекта (ПРТО). Практика эксплуатации показывает, что требования, предъявляемые к коэффициенту готовности ПРТО, не всегда выполняются. Проведенный анализ позволил выявить причину существенного превышения расчетной длительности периодов нахождения устройств в неработоспособном состоянии, обусловленного длительным поиском отказавших элементов и их заменой, а также организационно-техническими задержками восстановления работоспособности. Устранить такое несоответствие возможно за счет обоснования параметров системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) ПРТО, что в настоящее время не выполнено, ввиду отсутствия соответствующего научно-методического обеспечения. Так, в основе методики должны быть модели, чувствительные к параметрам обслуживания устройств с регламентированным ТОиР и обслуживанием по состоянию. В статье предложена формальная постановка задачи методики обоснования системы технического обслуживания и ремонта ПРТО, а также краткое описание модели, устанавливающей зависимость коэффициента готовности и величины затрат от параметров технического обслуживания и ремонта.

Новизна модели поддержания готовности устройств с техническим обслуживанием по состоянию обусловлена учетом таких параметров ТОиР, как полнота и глубина контроля. Приведенные в статье результаты апробации подтверждают практическую значимость применения модели в составе методики. Применение в составе методики известного градиентного метода оптимизации в сочетании с моделями поддержания готовности при регламентированном ТОиР и обслуживании по состоянию позволят обосновать такие значения параметров, при которых требуемое значение коэффициента готовности будет обеспечено с минимальными эксплуатационными затратами.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта, обоснование параметров обслуживания, регламентированное обслуживание, обслуживание по состоянию, передающий радиотехнический объект.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В течение последнего десятилетия в воинских частях и подразделениях космических войск проводится активная фаза перевооружения. Состоящие на вооружении образцы военной техники существенно обновлены, значительное число образцов находится на завершающих этапах создания. Вновь создаваемые и модернизируемые образцы вооружения по своей конфигурации, элементной базе, уровню применяемых промышленных технологий существенно отличаются от производимых ранее, при этом они требуют новых способов организации эксплуатационных процессов. Как отмечается в работе [1], высокая эффективность вновь создаваемых образцов ВВТ будет обеспечиваться за счет более широкого применения средств встроенной диагностики, использования неремонтируемых и необслуживаемых элементов, широкого применения магистрально-модульного принципа конструирования и унификации. В таких условиях необходимо по-иному взглянуть на процесс формирования системы технического обслуживания и ремонта вновь создаваемых образцов, которая должна не только обеспечивать безусловную реализацию тактико-технических требований, но и быть экономичной, не допустить необоснованного роста затрат при эксплуатации.

Рассматриваемый в статье передающий радиотехнический объект (далее ПРТО) пришел на смену морально и физически устаревшему образцу вооружения, имевшему ранее аналогичное функциональное предназначение. При его создании использовано большое количество электронно-вычислительных устройств и микроэлектронных типовых элементов замены (ТЭЗ). Подобные устройства требуют применения новых подходов при поддержании их готовности. Широкий спектр свойств современного оборудования (контролируемые, неконтролируемые, профилактируемые, непрофилактируемые, ремонтпригодные, неремонтпригодные) требует выбора соответствующего арсенала эксплуатационных мероприятий. Принимая во внимание невысокие показатели безотказности ТЭЗ, выбор эксплуатационных мероприятий, позволяющих обеспечить требуемые показатели надежности ПРТО в целом, представляется непростой задачей. Так как модель надежности ПРТО, использованная при обосновании конструктивно-компоновочной схемы, чувствительна только к показателям надежности составных частей, требуется разработка новой модели, позволяющей оценить влияние мероприятий технического обслуживания и ремонта (ТОиР) на комплексный показатель надежности ПРТО (1):

$$P = f(Str, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) \quad (1)$$

где  $Str, \bar{\alpha}$  – структура ПРТО и вектор параметров, характеризующих надежность составных частей в его составе;

$\bar{\beta}$  – вектор параметров системы ТОиР ПРТО.

Для определения состава параметров вектора  $\bar{\beta}$  необходимо провести анализ системы эксплуатации ПРТО, классифицировать различные по содержанию мероприятия поддержания готовности составных частей, классифицировать их. Идентификация показателей, оказывающих наибольшее влияние на результативность мероприятий ТОиР каждого класса оборудования, позволит выявить множество элементов вектора  $\bar{\beta}$ .

Приведенные доводы свидетельствуют об актуальности рассмотрения вопросов совершенствования системы ТОиР ПРТО, что потребует разработки соответствующего научно-методического обеспечения.

## **ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЮЩЕГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА И ЕГО СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА**

Анализ результатов функционирования оборудования, проводимый в течение двух лет, показывает снижение коэффициента готовности ПРТО ниже требуемого значения. Снижение готовности стало следствием увеличения длительности нахождения ПРТО в состоянии неготовности к применению. В рамках статьи под длительностью неготовности ПРТО к применению будем понимать периоды снижения функциональных возможностей ПРТО ниже требуемого значения, обусловленные нахождением в состоянии отказа более чем  $n$  составных частей из  $m$  резервных. Такой подход не является новым, он часто используется для многоканальных систем, к числу которых относится ПРТО, а сам показатель, как правило, рассчитывается аналогично коэффициенту сохранения эффективности [2]. При снижении значения такого показателя, несмотря на сохранение внешней видимости работоспособного состояния, требуется немедленное проведение эксплуатационных мероприятий по восстановлению функциональных возможностей, что аналогично восстановлению после отказа ПРТО. Таким образом, продолжительность функционирования ПРТО со сниженными функциональными возможностями определяет величину коэффициента готовности, а управлять данным показателем следует за счет воздействия на систему ТОиР с целью снижения количества отказов и продолжительности восстановления составных частей ПРТО.

Для снижения вероятности возникновения описанных выше критических отказов составных частей многоканальной ПРТО могут быть предприняты следующие мероприятия: увеличение наработки на отказ устройств за счет замены ТЭЗ более надежными или увеличение наработки на отказ каждой  $i$ -й системы или ПРТО в целом за счет повышения кратности резервирования ТЭЗ в ее составе. Такие мероприятия требуют изменения конструктивно-компоновочной схемы объекта и существенных материальных затрат, а их проведение невозможно без вывода ПРТО из режима боевого функционирования.

В качестве альтернативных способов управления длительностью устранения критических отказов можно назвать следующие: уточнение периода технического обслуживания систем и устройств, работоспособность которых не контролируется в межрегламентный период, а также более оперативное устранение неисправностей устройств или ТЭЗ за счет совершенствования средств и способов диагностирования и ремонта (замены) оборудования.

Система ТОиР рассматриваемого комплекса предполагает два подхода к организации мероприятий по поддержанию готовности: регламентированное техническое обслуживание и обслуживание устройств по состоянию.

При регламентированном техническом обслуживании операции контроля работоспособности устройств функциональной подсистемы  $P_{СТCi}$  (рис. 1) и профилактические мероприятия проводятся с ранее установленным периодом. Профилактические мероприятия предполагают замену отказавших за межрегламентный период элементов.

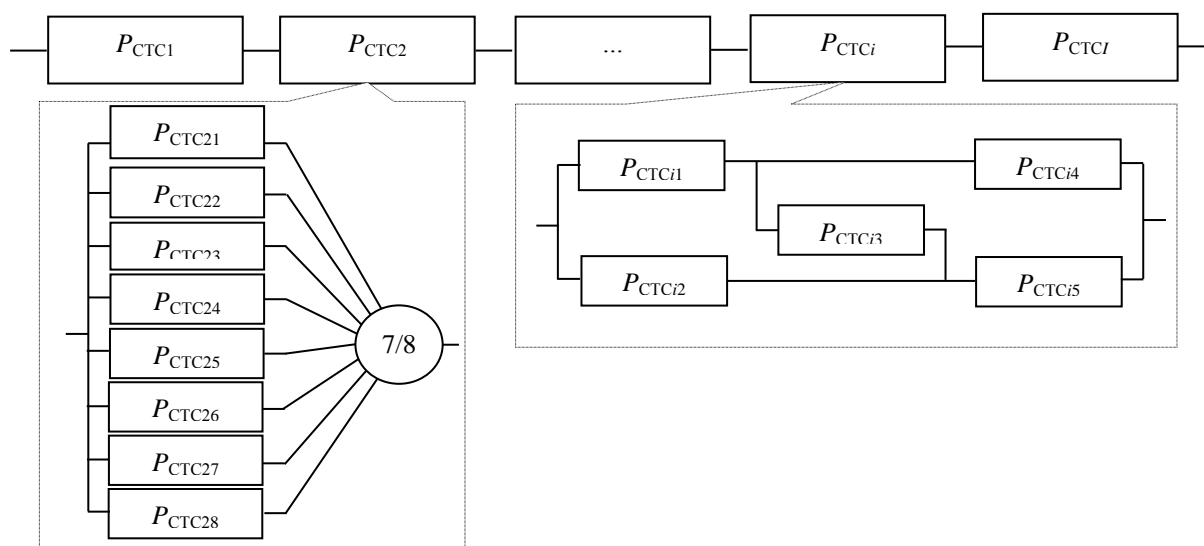


Рис. 1. Структурная схема ПРТО

Поддержание готовности каждого  $i$ -го устройства таким способом в значительной степени зависит от соотношения следующих параметров:

- степени резервирования ( $m_i$  ТЭЗ в составе  $i$ -го устройства);
- условия перехода  $i$ -го устройства в состояние неготовности к применению (неисправность  $n_i$  из  $m_i$  ТЭЗ в составе  $i$ -го устройства приводит к критическому отказу [3]);
- интенсивности отказов  $\lambda_{i_q}$  ТЭЗ в составе  $i$ -го устройства;
- длительности межрегламентного периода  $t_{ТО}$  и средней длительности выполнения регламента  $\bar{T}_{дтo_i}$ , которая в рассматриваемой задаче является неизменной величиной.

Если в ходе эксплуатации интенсивность отказов окажется больше ранее прогнозируемой, то это приведет к раннему переходу устройства в состояние неготовности к применению, а

также длительному нахождению в этом состоянии до следующего регламента. В случае, если истинная надежность ТЭЗ окажется выше расчетной, это обеспечит требуемые показатели надежности, однако эксплуатационные затраты в таком случае будут необоснованно велики.

Проведенный анализ показывает необходимость разработки модели поддержания готовности ПРТО, чувствительной к изменению параметров регламентированной системы ТОиР, для каждого  $i$ -го устройства. Следовательно,

$$P_{\text{РТО}_i} = f(\text{Str}_i, n_i, m_i, \lambda_i, t_{\text{ТО}_i}, \bar{T}_{\text{омо}_i}). \quad (2)$$

Другой вид технического обслуживания, используемый при поддержании готовности устройств ПРТО (ТО по состоянию), предполагает непрерывный контроль технического состояния программно-аппаратными средствами диагностирования. При отказе устройства или выдаче сигнала «ненорма» его составной части (ТЭЗ) проводится поиск причины отказа и замена устройства или ТЭЗ силами боевого расчета. Если указанные в эксплуатационной документации мероприятия не позволяют отыскать причину «ненормы» устройства, то к проведению работ привлекаются специалисты предприятий промышленности в соответствии с планом авторского и технического надзора (сервисного обслуживания). Применение такого подхода к поддержанию готовности устройств определяет зависимость длительности устранения их отказов от их приспособленности к выполнению мероприятий контроля технического состояния и восстановления путем замены ТЭЗ в их составе. Для описания подобных эксплуатационно-технических свойств в составе модели могут быть использованы показатели: полнота контроля, глубина контроля, интенсивность восстановления работоспособного состояния [4], за счет которых возможно снизить длительность устранения отказа.

Обозначим полноту контроля, для каждого  $j$ -го устройства как  $\eta_j$ , определим ее:

$$\eta_j = \frac{\sum_{g_{\text{кон}}=1}^{G_{\text{кон}}} \lambda_{j_{g_{\text{кон}}}}}{\sum_{g=1}^G \lambda_{j_g}}, \quad (3)$$

где  $j = \overline{1, J}$  – множество устройств ПРТО обслуживаемых по состоянию;

$g = \overline{1, G}$  – множество ТЭЗ в составе  $j$ -го устройства;

$g_{\text{кон}} = \overline{1, G_{\text{кон}}}$  – множество контролируемых ТЭЗ в составе  $j$ -го устройства;

$\lambda_{j_g}$  – интенсивности отказов каждого  $g$ -го ТЭЗ в составе  $j$ -го устройства;

$\lambda_{j_{g_{\text{кон}}}}$  – интенсивности отказов каждого контролируемого  $g$ -го ТЭЗ в составе  $j$ -го устройства.

К числу контролируемых ТЭЗ будем относить составные части, имеющие дополнительную индикацию, позволяющую локализовать отказ до одного или группы ТЭЗ. Величина доли контролируемых элементов определяет среднее время поиска отказавшего ТЭЗ в составе  $j$ -го устройства. Однако деление всего множества элементов каждого  $j$ -го устройства всего на два типа (контролируемые, неконтролируемые) не обеспечивает достаточной адекватности модели. Так как усредненные показатели оперативности поиска и замены отказавшего ТЭЗ существенно неоднородны среди всего множества  $g$ -х составных частей каждого  $j$ -го устройства, то следует учитывать степень локализации при конструктивном исполнении единого индикаторного устройства на группу ТЭЗ. В качестве такого показателя конструктивного исполнения  $j$ -го устройства, характеризующего оперативность поиска и замены отказавшего ТЭЗ, может быть использована глубина контроля  $\gamma_{j_\psi}$  [5]. От глубины контроля  $\gamma_{j_\psi}$  техниче-

ского состояния зависит длительность отыскания и замены неисправного ТЭЗ в группе, для которой средствами индикации технического состояния выдана «ненорма». Каждому элементу (группе элементов), обладающему индикацией о техническом состоянии, соответствует собственный показатель глубины контроля, нормированный к интенсивности отказов множества контролируемых составных частей каждого  $j$ -го устройства. Индекс  $\psi = \overline{1, \Psi}$  в обозначении глубины контроля  $j$ -го устройства  $\gamma_{j_\psi}$  определяет уровень глубины контроля, объединяя все составные части  $j$ -го устройства, имеющие в своем составе одинаковое количество ТЭЗ, включенных в единый контур индикации о техническом состоянии. Для расчета глубины контроля каждого  $\psi$ -го уровня используется следующая зависимость:

$$\gamma_{j_\psi} = \frac{\sum_{g_\psi=1}^{G_\psi} \lambda_{j_{g_\psi}}}{\sum_{g_{\text{кон}}=1}^{G_{\text{кон}}} \lambda_{j_{g_{\text{кон}}}}}, \quad (4)$$

где  $j = \overline{1, J}$  – множество устройств ПРТО, обслуживаемых по состоянию;

$g_{\text{кон}} = \overline{1, G_{\text{кон}}}$  – множество контролируемых ТЭЗ в составе  $j$ -го устройства;

$g_\psi = \overline{1, G_\psi}$  – множество ТЭЗ  $\psi$ -го уровня глубины контроля в составе  $j$ -го устройства,  
 $g_\psi \in g_{\text{кон}}$ ;

$\lambda_{j_{g_\psi}}$  – интенсивности отказов каждого  $g$ -го ТЭЗ,  $\psi$ -го уровня глубины контроля в составе  $j$ -го устройства;

$\lambda_{j_{g_{\text{кон}}}}$  – интенсивности отказов каждого  $g$ -го контролируемого ТЭЗ в составе  $j$ -го устройства.

Каждый уровень глубины контроля характеризуется своим значением средней длительности ( $\bar{T}_{j_{\text{зам}1}}, \dots, \bar{T}_{j_{\text{зам}\psi}}, \dots, \bar{T}_{j_{\text{зам}\Psi}}$ ) поиска и замены отказавшего ТЭЗ, что обусловлено необходимостью поочередно проверять работоспособность  $j$ -го устройства после замены каждого из множества ТЭЗ, включенных в единый контур индикации технического состояния. Такая конструктивная схема построения устройства предоставляет возможность варьирования длительностью устранения неисправности  $j$ -го устройства за счет выбора одного из двух вариантов восстановления работоспособного состояния. *Первый вариант* – поочередная замена каждого ТЭЗ в составе сборки, после замены проводится проверка на функционирование устройства в целом, при отрицательном результате выполняется замена следующего ТЭЗ и т. д. *Второй вариант* – одновременная замена всех ТЭЗ в составе сборки, объединяющей контролем технического состояния несколько ТЭЗ. Второй вариант обеспечивает оперативность восстановления работоспособного состояния  $j$ -го устройства, но требует больших эксплуатационных затрат для отправки на предприятие всех ТЭЗ и последующего ремонта одного ТЭЗ. Для обоснованного принятия решения о применении того или иного способа устранения отказа  $j$ -го устройства необходима соответствующая модель. Такая модель, в отличие от известных, должна быть чувствительна не только к конструктивному исполнению устройства и надежности ТЭЗ, но и к показателям, характеризующим систему ТОиР. Для рассматриваемого ПРТО к числу таких показателей отнесем полноту и глубину контроля, средние длительности устранения неисправности  $j$ -го устройства при условии возникновения

отказа на неконтролируемом ТЭЗ и контролируемом до  $\psi$ -го уровня глубины, а также ресурсоемкости устранения отказа  $j$ -го устройства перечисленными выше способами. Описываемая модель формально представляет собой зависимость

$$P_{\text{ТОС}_j} = f(\text{Str}_j, \eta_j, \gamma_{j\psi}, \lambda_{jg}, \bar{T}_{j\text{зам}1}, \dots, \bar{T}_{j\text{зам}\psi}, \dots, \bar{T}_{j\text{зам}\Psi}, \bar{T}_{j\text{рем}}), \quad (5)$$

где  $\bar{T}_{j\text{рем}}$  – средняя длительность выполнения ремонта представителями предприятия промышленности, прибывающими для устранения неисправности ТЭЗ номенклатуры, которая отсутствует в составе комплекта ЗИП, в соответствии с планом авторского и технического надзора (сервисного обслуживания).

Посредством воздействия на организационно-техническую систему технического обслуживания и ремонта возможно варьирование показателем коэффициента готовности ПРТО в определенных пределах за счет изменения ресурсоемкости эксплуатационных процессов.

Аналогично зависимостям (2) и (5), позволяющим рассчитывать коэффициент готовности, для двух описанных выше способов ТОиР составлены зависимости, позволяющие рассчитывать эксплуатационные затраты. Эти зависимости имеют вид:

$$C_i = f(\text{Str}_i, n_i, m_i, \lambda_i, t_{\text{ТО}_i}, \bar{T}_{\text{от}_i}, C_{v_i}), \quad (6)$$

$$C_j = f(\text{Str}_j, \eta_j, \gamma_{j\psi}, \lambda_{jg}, \bar{T}_{j\text{зам}1}, \dots, \bar{T}_{j\text{зам}\psi}, \dots, \bar{T}_{j\text{зам}\Psi}, \bar{T}_{j\text{рем}}, C_{v_j}), \quad (7)$$

где  $C_{v_j}$  – средняя ресурсоемкость выполнения эксплуатационных мероприятий для каждого  $v$ -го состояния.

Подводя итог постановки задачи выбора оптимальных параметров системы технического обслуживания и ремонта ПРТО, отметим, что для обеспечения требуемых показателей надежности ПРТО при минимальных эксплуатационных затратах необходимо разработать и использовать совместно:

- логико-вероятностную модель, устанавливающую зависимость коэффициента готовности ПРТО в целом от показателей надежности ТЭЗ  $P = f(P_{\text{РТО}_i}, P_{\text{ТОС}_j})$ , где  $P_{\text{РТО}_i}, P_{\text{ТОС}_j}$  – показатели надежности устройств с регламентированным ТО ( $i$ -е устройства), ТО по состоянию ( $j$ -е устройства);

- модель поддержания готовности  $i$ -х устройств, позволяющую оценить влияние параметров регламентированного технического обслуживания на процесс поддержания готовности ПРТО, представленную в виде формул (2) и (6);

- модель поддержания готовности  $j$ -х устройств, позволяющую оценить влияние параметров технического обслуживания по состоянию на процесс поддержания готовности ПРТО, представленную в виде формул (5) и (7);

- методику обоснования параметров системы ТОиР, позволяющую выбрать такие параметры системы ТОиР, которые обеспечат заданные требования к надежности ПРТО при минимальных затратах на поддержание его готовности.

Постановка задачи разработки методики обоснования параметров системы ТОиР может быть представлена в следующем виде: при имеющихся исходных данных о прогнозируемых значениях показателей надежности типовых элементов замены и допустимых параметрах системы технического обслуживания и ремонта ПРТО выбрать такие их значения, при которых требуемое значение коэффициента готовности ПРТО будет обеспечено с минимальными эксплуатационными затратами.

Дано:

- $Str$  – структурная схема ПРТО;
- $\lambda_{j_g}$  – интенсивность отказов контролируемых и неконтролируемых  $i$ -х ТЭЗ;
- $t_{ТО}$  – периодичность выполнения контрольно-профилактических мероприятий в отношении устройств с регламентированным ТО;
- $\bar{T}_{дто_i}, C_{v_i}$  – длительность и ресурсоемкость проведения контрольно-профилактических мероприятий в отношении устройств с регламентированным ТО;
- $n_i, m_i$  – количество ТЭЗ ( $n_i$ ), работоспособное состояние которых обеспечивает минимальные требования к работоспособности функциональной подсистемы в составе ( $m_i$ ) резервных элементов;
- $\bar{T}_{j_{замц}}$  – средняя длительность устранения неисправности устройства заменой ТЭЗ;
- $\bar{T}_{j_{рем}}$  – средняя длительность устранения неисправности устройства при неисправности неконтролируемых ТЭЗ;
- $C_{v_j}$  – ресурсоемкость проведения эксплуатационных мероприятий при нахождении в состоянии  $v_j$ .

Разработать методику выбора параметров системы ТОиР ПРТО, которая позволит при известной структуре ( $Str$ ) ПРТО, параметрах надежности  $i$ -х и  $j$ -х устройств найти

$$\vec{X}^* \rightarrow \arg \min_{P(\vec{X}) \geq P^{треб}} C(\vec{X}), \quad (8)$$

где  $\vec{X}$  – вектор параметров системы ТОиР ПРТО, при этом

$$\vec{X} = \{\vec{A}, \vec{B}\}.$$

Здесь  $\vec{A}$  – вектор параметров регламентированной системы технического обслуживания, каждый элемент которого представляет собой период проведения мероприятий регламентированного технического обслуживания  $i$ -го устройства;

$$\vec{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_I\}, I \in N;$$

$\vec{B}$  – вектор параметров системы технического обслуживания по состоянию, каждый элемент которого представляет собой вектор

$$\vec{b}_j = \{\eta_j, \vec{\Gamma}_j\},$$

где  $\eta_j$  – полнота контроля  $j$ -го устройства, при этом  $\vec{B} = \{\vec{b}_1, \vec{b}_2, \dots, \vec{b}_j, \dots, \vec{b}_J\}, J \in N;$

$\vec{\Gamma}_j$  – вектор, характеризующий глубину контроля  $j$ -го устройства,

$$\vec{\Gamma}_j = \{\gamma_{j1}, \gamma_{j2}, \dots, \gamma_{j\psi}, \dots, \gamma_{j\psi}\}.$$

Для каждого  $j$ -го устройства вектор  $\vec{\Gamma}_j$  имеет индивидуальное количество элементов, которое соответствует количеству различных уровней глубины контроля в данном устройстве. Обозначим  $\psi_j$  – максимальное число уровней глубины контроля  $j$ -го устройства. Каждой группе ТЭЗ, имеющих аналогичную в  $j$ -м устройстве глубину контроля  $\gamma_{j\psi}$ , соответствует свое значение средней длительности устранения неисправности  $\bar{T}_{j_{замц}}$  и величины затрат  $C_{v_j}$ .

Значение коэффициента готовности ПРТО и средняя величина годовых затрат на поддержание готовности, кроме конструктивно-компоновочной схемы и неизменных в рамках данной статьи параметров (таких как кратность резервирования, интенсивность отказов ТЭЗ),

зависит от вектора варьируемых параметров  $\vec{X} = \{\vec{A}, \vec{B}\}$ , значение которого необходимо найти.

## МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖАНИЯ ГОТОВНОСТИ УСТРОЙСТВ С ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ПО СОСТОЯНИЮ

Как показано выше, для обеспечения требуемого коэффициента готовности ПРТО необходимо разработать методику, в основе которой должна лежать модель, устанавливающая зависимость готовности ПРТО от надежности ТЭЗ и параметров системы технического обслуживания и ремонта по состоянию. Модель системы регламентированного технического обслуживания и ремонта изложена в работе [6] и в представленной статье подробно не рассматривается. Анализ известных моделей ТОиР показал их недостаточную приспособленность к применению в составе рассматриваемой методики. Ниже представлена модель, которая, в отличие от известных, позволяет установить зависимость коэффициента готовности ПРТО от параметров системы технического обслуживания по состоянию с учетом полноты и глубины контроля технического состояния.

Рассмотрим устройство 15А312, в отношении которого выполняется техническое обслуживание по состоянию. Как представлено на рис. 2, в составе устройства имеется пять ТЭЗ, имеющих индивидуальную индикацию технического состояния и интенсивности отказов  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ . При отказе любого из них проводится замена исправным ЗИП из состава всего ЗИП. В таком случае восстановление работоспособности устройства 15А312 потребует  $\bar{T}_{зам1}$  времени и  $C_{S5_j}$  эксплуатационных затрат. Также в составе устройства имеется две сборки, содержащих по восемь типовых устройств. Устройство контроля технического состояния указывает на неработоспособность сборки, в составе ТЭЗ с интенсивностями отказов  $\lambda_6 - \lambda_{13}$  или  $\lambda_{14} - \lambda_{21}$ , после чего оператор проводит мероприятия по поиску отказавшего ТЭЗ в составе сборки. Восстановление работоспособности сборки, имеющей глубину контроля  $\gamma_j$  потребует  $\bar{T}_{зам8}$  временных затрат, а величина эксплуатационных затрат составит  $C_{S6_j}$ . Представим модель поддержания готовности блока 15А312 в виде графа на рис. 3, на котором обозначим интенсивности переходов между состояниями как  $\mu$ . Далее определим порядок расчета всех интенсивностей переходов между состояниями, который представлен в табл. 1.

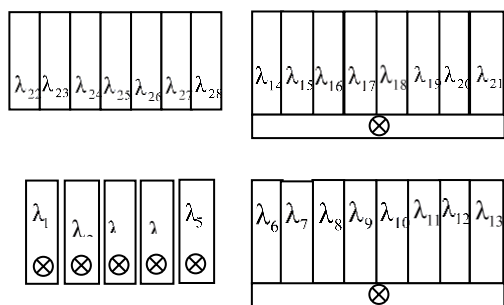


Рис. 2. Состав ТЭЗ устройства 15А312

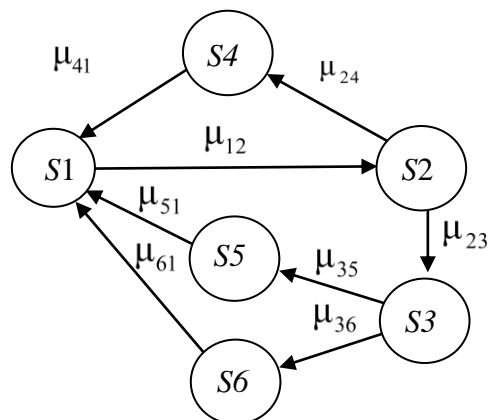


Рис. 3. Графовая модель поддержания готовности 15А312



В составе устройства имеются неконтролируемые ТЭЗ, с интенсивностями отказов  $\lambda_{22} - \lambda_{28}$ . При проектировании ПРТО и его системы ТОиР отказы указанных составных частей не прогнозировались в течение всего срока службы, поэтому обслуживание и ремонт рассматриваемых элементов личным составом боевого расчета не планировались, технология проведения работ не описана в эксплуатационной документации. При возникновении отказов неконтролируемых составных частей восстановление работоспособности устройства 15А312 выполняется представителями промышленности в соответствии с планом авторского и технического надзора (сервисного обслуживания). Проведение ремонтных мероприятий в отношении составных частей с интенсивностями отказов  $\lambda_{22} - \lambda_{28}$  требует временных затрат  $\bar{T}_{\text{ремПП}_j}$  и затрат материальных ресурсов  $C_{S4_j}$ . Обозначим  $S1$  – работоспособное состояние устройства 15А312. При возникновении отказа происходит переход устройства в неработоспособное состояние  $S2$  с интенсивностью перехода  $\mu_{12}$ , которая в данном случае рассчитывается как  $\mu_{12} = \sum_{g=1}^G \lambda_g$ . Далее устройство переходит в состояние ремонта силами боевого расчета  $S3$  с интенсивностью перехода  $\mu_{23}$  либо силами представителей предприятий промышленности  $S4$  с интенсивностью перехода  $\mu_{24}$ , которая зависит от показателя полноты контроля. В случае возникновения отказа ТЭЗ из числа контролируемых, интенсивности переходов в состояния  $S5$  и  $S6$  определяются длительностью диагностирования (нахождение в состоянии  $S3$ ) и показателями глубины контроля. Построим модель поддержания готовности устройства 15А312, обслуживаемого по состоянию. Поток переходов между состояниями принимается простейшим, в данном случае может быть использована система уравнений Колмогорова с финальными вероятностями состояний.

Назовем вероятностью  $\nu$ -го состояния вероятность  $p_\nu(t)$ , т. е. вероятность того, что в момент времени  $t$  составная часть будет находиться в состоянии  $S_\nu$ . Очевидно, что для любого момента времени сумма всех вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{\nu=1}^Y p_\nu = 1, \quad (9)$$

где  $\nu = \overline{1, Y}$  – количество состояний графа.

Найдем все вероятности состояний, для чего составим и решим систему уравнений Колмогорова аналогично [7, 8]. Опуская подробное описание, запишем систему уравнений для состояний  $S1, S2, S3, S4, S5, S6$ , показанных на рис. 3:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = \mu_{61}p_6 + \mu_{51}p_5 + \mu_{41}p_4 - \mu_{12}p_1, \\ \frac{dp_2}{dt} = \mu_{12}p_1 - (\mu_{23} + \mu_{24})p_2, \\ \frac{dp_3}{dt} = \mu_{23}p_2 - (\mu_{35} + \mu_{36})p_3, \\ \frac{dp_4}{dt} = \mu_{24}p_2 - \mu_{41}p_4, \\ \frac{dp_5}{dt} = \mu_{35}p_3 - \mu_{51}p_5, \\ \frac{dp_6}{dt} = \mu_{36}p_3 - \mu_{61}p_6. \end{cases}$$

Решим систему уравнений, добавив нормировочное  $\sum_{\nu=1}^Y p_\nu = 1$ .

В результате получим зависимость для расчета вероятности заставить  $j$ -е устройство в работоспособном состоянии, в данном случае  $P = p_\nu$ , при  $\nu = 1$ :

$$P = \frac{1}{1 + \mu_{12} + \mu_{23}\mu_{12} + \frac{\mu_{24}\mu_{12}}{\mu_{41}} + \frac{\mu_{35}\mu_{23}\mu_{12}}{\mu_{51}} + \frac{\mu_{36}\mu_{23}\mu_{12}}{\mu_{61}}}, \quad (10)$$

где интенсивности переходов между  $\nu$ -ми состояниями рассчитываются в соответствии с выражениями, представленными в табл. 1. Также при решении системы уравнений получены зависимости для расчета  $p_\nu$  при  $\nu = \overline{2, Y}$ , которые будут далее использованы при расчете показателей ресурсоемкости процесса поддержания готовности.

Таблица 1

Интенсивности переходов между  $\nu$ -ми состояниями

$\mu_{12} = \sum_{g=1}^G \lambda_g$	Обобщенная характеристика интенсивности отказов $j$ -го устройства
$\mu_{23} = \frac{\eta_j}{t_{об}} = \frac{\sum_{g_{кон}=1}^{G_{кон}} \lambda_{j_{g_{кон}}}}{t_{об} \sum_{g=1}^G \lambda_{j_g}}$	Полнота контроля $\eta_j$ – доля отказов контролируемых ТЭЗ в составе $j$ -го устройства, $t_{об}$ – длительность обнаружения неисправности $j$ -го устройства
$\mu_{35} = \frac{\gamma_{j_{\psi=1}}}{t_d} = \frac{\sum_{g_{\psi=1}=1}^{G_{\psi=1}} \lambda_{j_{g_{\psi=1}}}}{t_d \sum_{g_{кон}=1}^{G_{кон}} \lambda_{j_{g_{кон}}}}$	Глубина контроля $\gamma_{j_{\psi=1}}$ – доля отказов приходящаяся на группу элементов контролируемых до единственного ( $\psi = 1$ ) ТЭЗ, $t_d$ – длительность диагностирования неисправного контролируемого ТЭЗ
$\mu_{36} = \frac{\gamma_{j_\psi}}{t_d} = \frac{\sum_{i_\psi=1}^{G_\psi} \lambda_{j_{i_\psi}}}{t_d \sum_{g_{кон}=1}^{G_{кон}} \lambda_{j_{g_{кон}}}}$	Глубина контроля $\gamma_{j_\psi}$ – доля отказов приходящаяся на группу элементов контролируемых до $1, 2, \dots, \psi_j, \dots, \Psi_j$ ТЭЗ, $t_d$ – длительность диагностирования неисправного контролируемого ТЭЗ
$\mu_{41} = \frac{1}{\overline{T}_{ремПП_j}}$	Интенсивность восстановления неконтролируемых ТЭЗ
$\mu_{51} = \frac{1}{\overline{T}_{замj_{\psi=1}}}$	Интенсивность устранения отказа $j$ -го устройства, выполняемого путем замены контролируемых ТЭЗ (рассчитывается отдельно для каждого уровня глубины контроля $\psi$ ).
$\mu_{61} = \frac{1}{\overline{T}_{замj_\psi}}$	

Принимая во внимание то, что при эксплуатации  $j$ -е устройство в любой момент времени находится в одном из  $Y$  состояний, ресурсоемкость процесса поддержания готовности в таком случае может быть рассчитана как

$$C_j = \sum_{\nu=1}^Y C_{\nu_j} p_\nu, \quad (11)$$

где  $C_{\nu_j}$  – нормированный показатель ресурсоемкости поддержания готовности устройства для каждого состояния  $\nu$  [в данном случае такие показатели полагаются достоверно известными при решении задачи (8)].

Аналитические зависимости (10) и (11), в отличие от известных, позволяют установить зависимость коэффициента готовности ПРТО (в части устройств обслуживаемых по состоянию) от параметров системы ТОиР и могут быть использованы в составе методики обоснования параметров системы ТОиР ПРТО.

С целью апробации модели поддержания готовности устройства 15А312 при организации ТОиР по состоянию проведем расчет показателей надежности при исходных данных, представленных в табл. 2.

Таблица 2

**Показатели надежности (интенсивности отказов  $g$ -х ТЭЗ)  
устройства 15А312**

Обозначение	Значение	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
$\lambda_1$	0,0001	$\lambda_{10}$	0,0002	$\lambda_{19}$	0,0004
$\lambda_2$	0,0003	$\lambda_{11}$	0,0004	$\lambda_{20}$	0,00002
$\lambda_3$	0,0003	$\lambda_{12}$	0,00002	$\lambda_{21}$	0,0001
$\lambda_4$	0,0001	$\lambda_{13}$	0,0001	$\lambda_{22}$	0,00001
$\lambda_5$	0,0001	$\lambda_{14}$	0,0002	$\lambda_{23}$	0,00002
$\lambda_6$	0,0002	$\lambda_{15}$	0,0015	$\lambda_{24}$	0,00001
$\lambda_7$	0,0015	$\lambda_{16}$	0,0015	$\lambda_{25}$	0,00001
$\lambda_8$	0,0015	$\lambda_{17}$	0,00001	$\lambda_{26}$	0,00002
$\lambda_9$	0,00001	$\lambda_{18}$	0,0002	-	-

На основе исходных данных проведены расчеты показателей, используемых в составе модели (10) и представленных в табл. 3.

Таблица 3

**Рассчитанные исходные данные  
системы технического обслуживания и ремонта 15А312**

Обозначение	$\mu_{12}$	$\mu_{23}$	$\mu_{35}$	$\mu_{36}$	$\mu_{41}$	$\mu_{51}$	$\mu_{61}$
Значение	0,0202	0,8312	0,0009	0,0046	0,045	0,4	0,1

При указанных исходных данных расчетное значение коэффициента готовности блока 15А312 составит 0.903, что сопоставимо со значением, полученным на практике. Изменение параметров системы ТОиР приводит к плавному изменению значения целевой функции. Робастность функции можно оценить по рис. 4, где представлены в двух проекциях зависимости коэффициента готовности и величины затрат от глубины и полноты контроля при проведении технического обслуживания по состоянию.

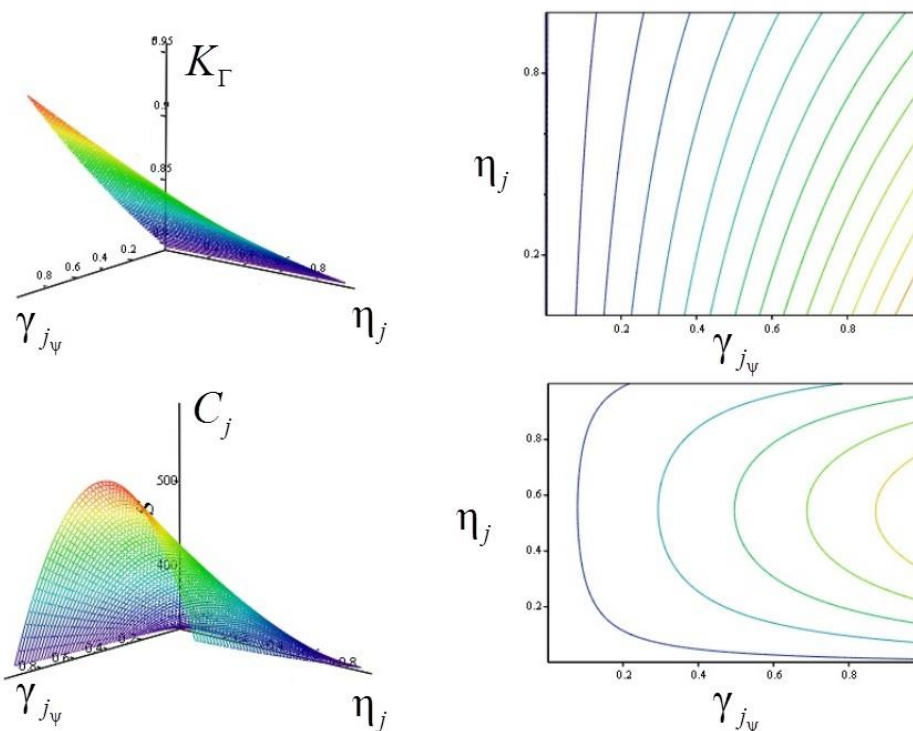


Рис. 4. Зависимость  $K_G$  (сверху) и величины эксплуатационных затрат (снизу) от глубины  $\gamma_j$  и полноты  $\eta_j$  контроля

Разработанная модель, в отличие от известных, чувствительна к изменению параметров системы ТОиР устройств, для которых назначена стратегия технического обслуживания по состоянию. Применение разработанной модели в составе методики позволяет выбрать значения глубины и полноты контроля технического состояния, обеспечивающие требуемое значение коэффициента готовности ПРТО с минимальными эксплуатационными затратами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена актуальная задача по обоснованию параметров системы технического обслуживания и ремонта передающего радиотехнического устройства. Представлена вербальная и формальная постановка задачи выбора значений вектора параметров ТОиР, при которых обеспечивается требуемый коэффициент готовности ПРТО с минимальными эксплуатационными затратами. С целью решения поставленной задачи (8) обоснована необходимость разработки соответствующей модели процесса поддержания готовности устройств, чувствительной к влиянию параметров применяемого способа технического обслуживания ПРТО. Кратко описана сущность разработанной модели, устанавливающей зависимости коэффициента готовности ПРТО и величины эксплуатационных затрат от таких показателей, как полнота и глубина контроля, интенсивности восстановления  $j$ -го устройства при отказах ТЭЗ для каждой составной части уровня глубины  $\Psi_j$ , чем и определяется ее новизна.

Кроме того, в статье предложены зависимости, позволяющие рассчитать показатели глубины и полноты контроля, которые также являются новыми применительно к представленной постановке задачи. Адекватность модели подтверждается результатами апробации методики, в ходе которой рассчитан коэффициент готовности для представленных исходных данных устройства 15А312 (на рис. 4 изображены трехмерные графики, характеризующие

зависимости коэффициента готовности и величины эксплуатационных затрат от глубины и полноты контроля).

На рис. 4 наглядно показана применимость градиентного метода оптимизации в отношении полученных зависимостей, что позволяет решить задачу (8) и найти такие значения вектора  $\vec{X}$ , при которых требуемая готовность ПРТО будет обеспечиваться с минимальными эксплуатационными затратами.

Методика обоснования системы технического обслуживания и ремонта ПРТО, в которой используется известный градиентный метод оптимизации в отношении зависимостей (2), (5)–(7), позволяет обеспечить тактико-технические требования с минимальными эксплуатационными затратами, что определяет ее практическую значимость.

### Список используемых источников

1. *Борисов Ю.И.* Основные направления развития вооружения, военной и специальной техники // Оборонно-промышленный комплекс России: федеральный справочник. – 2014. – Т. 10. – С. 211–216. – URL: <http://federalbook.ru/files/opk/Soderjanie/OPK-10III/Borisov.pdf> (дата обращения: 12.07.2020).
2. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
3. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
4. *Викторова В.С., Степаняц А.С.* Проектный анализ контролепригодности технических систем (теория, методы расчета, программное обеспечение). – М.: ИПУ РАН, 2010. – 71 с.
5. DoD 3235.1-H. Test and Evaluation of System Reliability, Maintainability, Reliability // Office of the Director Defense Test and Evaluation. – Washington, 1982.
6. *Дьяков А.Н.* Расчет показателей эксплуатационно-экономической эффективности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 660. – С. 180–189.
7. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. Задачи, принципы, методология: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2004. – 208 с.
8. *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.

В.В. Звонарев,  
кандидат техн. наук;  
В.Ф. Пименов,  
кандидат техн. наук  
А.С. Попов,  
доктор техн. наук, профессор

## МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СИМВОЛЬНЫХ И БИТОВЫХ ОШИБОК ДЛЯ QPSK СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ СО СДВИГОМ ЧАСТОТЫ

Исследуется влияние гармонической помехи с частотой, отличающейся от частоты несущего колебания четырехпозиционного фазоманипулированного радиосигнала, на помехоустойчивость QPSK сигнала в спутниковом канале передачи информации. Исследования проводились на основе методики с применением корректного математического аппарата, при использовании которого учитывается свойство биортогональности сигнала. Выведены формулы средних вероятностей символьной и битовой ошибок для четырехпозиционного фазоманипулированного сигнала. Построены графики зависимостей этих вероятностей от уровня сигнала и величины отклонения частоты помехи при заданных ее уровнях. Полученные результаты позволяют достоверно определять качество радиоканала в различных условиях сигнально-помеховой обстановки.

Ключевые слова: вероятность символьной и битовой ошибки, гармоническая помеха, сдвиг частоты, четырехпозиционная фазовая манипуляция, помехоустойчивость.

### ВВЕДЕНИЕ

Сигналы с квадратурной фазовой манипуляцией QPSK в различных модификациях, вследствие своих энергетических и спектральных характеристик, получили широкое применение в цифровых каналах спутниковой связи, каналах управления. Кроме того, они заложены в коммуникационные стандарты DVB-S, DVB-S2/S2X, IEEE 802.16 и т. д. Важнейшим показателем качества приема информации является помехоустойчивость, определяемая средними вероятностями символьной и битовой ошибок при наличии помех. Одной из простейших, но эффективных помех является гармоническая помеха. В настоящее время анализ влияния гармонической помехи на достоверность приема информации при передаче сигналами QPSK приведен в ряде статей [1–6]. Однако на сегодняшний день в рассматриваемых методиках не учитывается особенность, которая заключается в том, что биортогональные сигналы, такие как M, M-ФМ, в том числе и QPSK, не являются ортогональными и они должны описываться многомерными плотностями вероятностей. В указанных статьях совместная статистика выходов канальных корреляторов представлена произведением одномерных плотностей вероятностей, что справедливо только для ортогональных сигналов. Вследствие этого данные методики расчета помехоустойчивого приема сигнала требуют корректировки и доработки для получения более точных и правильных результатов расчета.

Рассматриваемая гармоническая помеха эффективна и в других применениях, например при подавлении приемных устройств навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем [7, 8]. Корректная методика для прицельной по частоте гармонической помехи представлена в работах [9, 12]. Однако для полноты исследования необходимо проанализировать влияние отклонения частоты помехи от средней частоты сигнала.

Таким образом, целью исследования является вывод формул для расчета вероятности символьной и битовой ошибок приема четырехпозиционного фазоманипулированного ра-

диосигнала в присутствии гармонической помехи со сдвигом частоты на основе применения корректной методики, учитывающей многомерные плотности вероятностей биортогональных сигналов.

Для достижения поставленной цели в статье использовались методы преобразования линейного пространства представления вероятностной меры четырехмерного вектора выходов корреляционных каналов приемного устройства в пространстве собственных векторов ковариационной матрицы этого вектора, методы сведения четырехмерного интеграла к двумерному, а также представление этого интеграла в нормированных переменных.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке эффективности воздействия помех в канале связи, так как в основе вычисления достоверности передачи информации лежит определение вероятностей символьных и битовых ошибок. Применение разработанной методики позволит точно определить условия, при которых достигается необходимое качество приема информации в присутствии гармонической помехи.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для расчета помехоустойчивости когерентного приема ФМ-4 радиосигнала в присутствии гармонической помехи необходимо задать математическую модель сигнально-помеховой обстановки.

В несколько упрощенном виде сигнал ФМ-4 на  $l$ -м тактовом интервале длительностью  $T$ , сигнал  $s_i(t)$  и помеху  $s_{\Pi}(t)$  можно записать следующим образом:

$$s_i(t) = A_c \cos(\omega_0 t + \varphi_i), \varphi_i = (i - 1) \frac{\pi}{2}, t \in [(l - 1)T, lT], i = 1, 2, 3, 4;$$

$$s_{\Pi}(t) = A_{\Pi} \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_{\Pi})t + \varphi_{\Pi}],$$

где  $A_c$  – амплитуда сигнала,  $A_c = \sqrt{2P_c}$ ;

$A_{\Pi}$  – амплитуда помехи,  $A_{\Pi} = \sqrt{2P_{\Pi}}$ ;

$\omega_0$  – частота несущего колебания сигнала;

$\omega_{\Pi}$  – сдвиг частоты помехи относительно  $\omega_0$ ;

$\varphi_{\Pi}$  – сдвиг фазы помехи;

$P_c$  – мощность сигнала;

$P_{\Pi}$  – мощность помехи.

На вход корреляционного демодулятора, функциональная схема которого представлена в работах [9, 12], поступает аддитивная смесь сигнала и помех [1–12]:

$$u^j(t) = s_j(t) + s_{\Pi}(t) + n(t),$$

где  $j$  – номер позиции принятого информационного символа;

$n(t)$  – шумовая помеха, моделируемая белым гауссовым шумом (БГШ) с корреляционной функцией, при этом

$$\langle n(t)n(t') \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t - t'),$$

где  $N_0$  – односторонняя спектральная плотность БГШ;

$\delta(t - t')$  – дельта-функция Дирака [10].

Необходимо вывести формулы для расчета средних вероятностей символьных и битовых ошибок когерентного приема радиосигнала *QPSK* в присутствии гармонической помехи со сдвигом частоты, в том числе и когерентной. Определить зависимости средних вероятностей символьных и битовых ошибок от отношения сигнал/шум и от параметра сдвига частоты.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Показателями помехоустойчивости когерентного приема ФМ-4 радиосигнала при воздействии гармонической помехи являются средние вероятности ошибок приема информационного символа и бита. Для определения значений вероятности ошибки необходимо выполнить следующие действия.

1. Вычислить ковариационную матрицу вектора напряжений.
2. Вычислить многомерную плотность вероятности вектора напряжений.
3. Определить верхние и нижние пределы интегрирования вероятности правильного приема.
4. Выполнить расчет средней вероятности правильного приема информационных символов.
5. Вычислить среднюю вероятность ошибки приема информационного символа и бита.

Для расчета ковариационной матрицы необходимо определить значение напряжения на выходе  $i$ -го коррелятора при приеме  $j$ -й позиции сигнала  $\xi_i^j$  в момент отсчета  $T$  по формуле [1–12]

$$\xi_i^j = \frac{1}{N_0} \int_0^T [s_j + s_{\text{п}} + n(t)] s_i dt = \frac{1}{N_0} \int_0^T s_j s_i dt + \frac{1}{N_0} \int_0^T s_{\text{п}} s_i dt + \frac{1}{N_0} \int_0^T n(t) s_i dt,$$

где  $i, j \in (1, 2, 3, 4)$ .

Помеховая и случайная шумовая составляющие величины  $\xi_i^j$  не зависят от номера (позиции) информационного символа принимаемого сигнала, а определяются только номером коррелятора  $i$ . Значение  $\frac{1}{N_0} \int_0^T n(t) s_i dt$  является случайной величиной и обозначено в статье символом  $\zeta_i$ .

Правило решения при оптимальном приеме многопозиционного ФМ радиосигнала в данном случае может быть представлено в формализованном виде [10]:

$$\hat{x}_i = \max_i^{-1} \xi_i^j, i = 1, 2, 3, 4 \text{ или иначе } \xi_j^j > \xi_i^j; j \neq i, i = 1, 2, 3, 4.$$

Напряжения, формируемые на выходе вычислителей-интеграторов, сравниваются, и выбирается тот номер вычислителя, на котором значение напряжения в заданный момент времени  $T$  является наибольшим [9]. Вектор напряжений в статье обозначен индексом

$$\xi^j = (\xi_1^j, \xi_2^j, \xi_3^j, \xi_4^j)^T.$$

Тогда вектор напряжений случайных составляющих вектора  $\xi^j$  можно представить следующим образом:

$$\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4)^T,$$

а его математическое ожидание будет вычисляться по формуле

$$\langle \xi^j \rangle = \xi^j - \zeta = \frac{1}{N_0} \int_0^T s_j s dt + \frac{1}{N_0} \int_0^T s_{\text{п}}(t) s dt. \quad (1)$$

где  $s$  – вектор копий принимаемых радиосигналов информационных позиций:  $s = (s_1, s_2, s_3, s_4)^T$ .



Тогда из выражения (1) можно выразить вектор  $\xi^j$ :

$$\xi^j = \langle \xi^j \rangle + \zeta.$$

Общая формула для расчета многомерной плотности вероятности (ПВ)  $w_4(\xi^j)$  вектора  $\xi^j$  в векторно-матричном представлении будет иметь вид [9, 10]

$$w_4(\xi^j) = \frac{1}{(2\pi)^{-2} |K_{\xi^j}|} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\xi^j - \langle \xi^j \rangle)^T K_{\xi^j}^{-1} (\xi^j - \langle \xi^j \rangle) \right], \quad (2)$$

где  $K_{\xi^j} = \langle (\xi^j - \langle \xi^j \rangle)(\xi^j - \langle \xi^j \rangle)^T \rangle$  – ковариационная матрица вектора  $\xi^j$ .

Ковариационная матрица вектора  $\xi^j$  для всех индексов  $j \in \{1, 2, 3, 4\}$  определяется следующим выражением:

$$K_{\xi^j} = \langle (\xi^j - \langle \xi^j \rangle)(\xi^j - \langle \xi^j \rangle)^T \rangle = \langle \zeta \zeta^T \rangle = K_{\zeta}.$$

Если принимаемая смесь радиосигнала, помехи и шума  $u^j(t) = s_j(t) + s_n(t) + n(t)$  содержит сигнал  $s_j(t) = s(x_j, t)$ , т. е. был передан информационный символ  $x_j$ , то вероятность правильного приема символа  $x_j$  вычисляется по формуле

$$P_{\text{прав } j} = P\{\xi_j^j > \xi_i^j; j \neq i; j, i = 1, 2, 3, 4\} = P(\hat{x}_j/x_j).$$

Тогда средняя вероятность ошибки приема символа  $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$  (приема сигналов  $\{s_1(t), s_2(t), s_3(t), s_4(t)\}$ ) находится по формуле

$$P_{\text{ош ср}} = \sum_{j=1}^4 P_j (1 - P_{\text{прав } j}). \quad (3)$$

Далее необходимо перейти в новую систему координат, в которой ковариационная матрица  $K_{\xi^j}$  становится диагональной, и определить вероятности правильного приема каждого информационного символа.

Для выполнения расчета вероятности правильного приема информационного символа требуется определить матрицу преобразования  $V$  вектора  $\xi^j$  в новую систему координат, используя методику, представленную в работах [9, 12]. Структурная схема определения матрицы преобразования в новой системе координат в компактном виде показана на рис. 1.

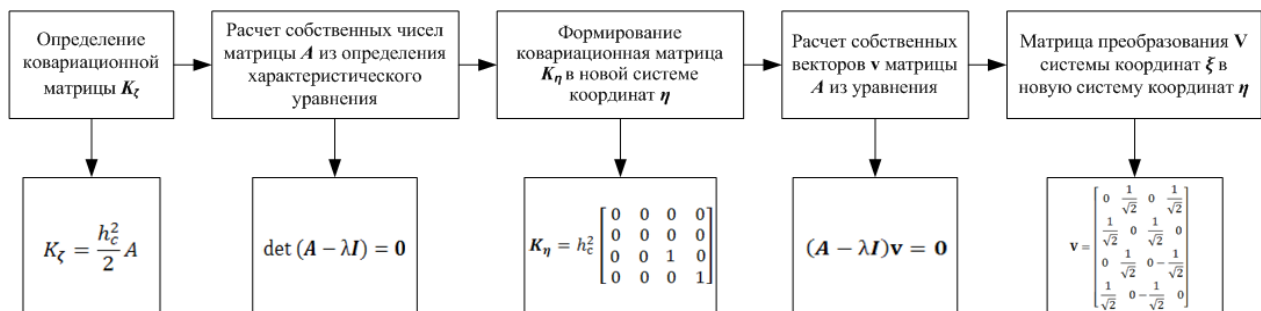


Рис. 1. Структурная схема определения матрицы преобразования в новой системе координат

Матрица  $\mathbf{A}$  имеет вид [9, 12]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим вектор  $\langle \xi^j \rangle$  для первой позиции, где  $s_1(t) = A_c \cos \omega_0 t$ . Путем непосредственных вычислений получим вектор математических ожиданий вектора  $\xi^1$  для первой позиции принимаемого сигнала:

$$\langle \xi^1 \rangle = \begin{bmatrix} h_c^2 + h_c h_{\Pi} \frac{\sin(\Delta\omega_{\Pi} T + \varphi_{\Pi}) - \sin\varphi_{\Pi}}{\Delta\omega_{\Pi} T} \\ -h_c h_{\Pi} \frac{\cos(\Delta\omega_{\Pi} T + \varphi_{\Pi}) - \cos\varphi_{\Pi}}{\Delta\omega_{\Pi} T} \\ -[h_c^2 + h_c h_{\Pi} \frac{\sin(\Delta\omega_{\Pi} T + \varphi_{\Pi}) - \sin\varphi_{\Pi}}{\Delta\omega_{\Pi} T}] \\ h_c h_{\Pi} \frac{\cos(\Delta\omega_{\Pi} T + \varphi_{\Pi}) - \cos\varphi_{\Pi}}{\Delta\omega_{\Pi} T} \end{bmatrix},$$

где  $h_{\Pi}^2$  – отношение помеха/шум,  $h_{\Pi}^2 = E_{\Pi}/N_0$  [10, 11];

$E_{\Pi}$  – энергия помехи на длительности информационного символа,  $E_{\Pi} = P_{\Pi} T$ .

Используя матрицу преобразования  $\mathbf{V}$ , получаем вектор математических ожиданий в новой системе координат  $\langle \eta^1 \rangle$ :

$$\langle \eta^1 \rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\sqrt{2} h_c h_{\Pi} \frac{\cos(\Delta\omega_{\Pi} T + \varphi_{\Pi}) - \cos\varphi_{\Pi}}{\Delta\omega_{\Pi} T} \\ \sqrt{2} [h_c^2 + h_c h_{\Pi} \frac{\sin(\Delta\omega_{\Pi} T + \varphi_{\Pi}) - \sin\varphi_{\Pi}}{\Delta\omega_{\Pi} T}] \end{bmatrix}.$$

Следовательно, вероятностная мера задана на двумерной плоскости  $(\eta_3, \eta_4)$  в новой системе координат  $\eta$ . В этой системе координат четырехмерная ПВ  $w_4(\eta)$ , вычисляемая по формуле (2), будет определяться произведением одномерных ПВ:

$$w_4(\eta^1) = w_1(\eta_1^1) w_1(\eta_2^1) w_1(\eta_3^1) w_1(\eta_4^1).$$

Первые два сомножителя имеют дисперсию, равную нулю, и представляют собой дельта-функцию Дирака, а именно:

$$w_1(\eta_1^1) = \delta(\eta_1^1 - \langle \eta_1^1 \rangle), w_1(\eta_2^1) = \delta(\eta_2^1 - \langle \eta_2^1 \rangle).$$

Кроме того, имеем  $\langle \eta_1^1 \rangle = \langle \eta_2^1 \rangle = 0$ . Интегрирование дельта-функции в данном случае приводит к единице, и четырехкратный интеграл становится двукратным.

Тогда расчет вероятности приема первого информационного символа для обеих систем координат  $\xi^1$  и  $\eta^1$  будет выполняться по формуле [9, 12]

$$P_{\text{прав1}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\xi_1^1} \int_{-\infty}^{\xi_1^1} \int_{-\infty}^{\xi_1^1} w_4(\vec{\xi}/s_1) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 d\xi_4 =$$

$$= \int_{\eta_{1н}^1}^{\eta_{1в}^1} w_1(\eta_1^1) d\eta_1 \int_{\eta_{2н}^1}^{\eta_{2в}^1} w_1(\eta_2^1) d\eta_2 \int_{\eta_{3н}^1}^{\eta_{3в}^1} w_1(\eta_3^1) d\eta_3 \int_{\eta_{4н}^1}^{\eta_{4в}^1} w_1(\eta_4^1) d\eta_4,$$

где  $\eta_{iн}^1$  и  $\eta_{iв}^1$  – нижний и верхний пределы интегрирования, которые надо найти.

Первые два сомножителя равны единице, поэтому выражение упрощается:

$$P_{\text{прав } 1} = \int_{\eta_{3н}}^{\eta_{3в}} w_1(\eta_3) d\eta_3 \int_{\eta_{4н}}^{\eta_{4в}} w_1(\eta_4) d\eta_4. \quad (4)$$

Для расчета вероятности приема первого информационного символа необходимо определить нижние и верхние пределы интегрирования выражения (4). Подробное изложение методики вычисления верхних и нижних пределов интегрирования представлено в статье [9, 12].

Пределы интегрирования для интегралов в формуле (4) имеют значения  $\eta_{4н} = 0$ ,  $\eta_{4в} = \infty$ ,  $\eta_{3н} = -\eta_4$ ,  $\eta_{3в} = \eta_4$ , а одномерные ПВ определены выражениями:

$$w_1(\eta_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_c} \exp\left(-\frac{(\eta_3 - \langle \eta_3 \rangle)^2}{2h_c^2}\right);$$

$$w_1(\eta_4) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_c} \exp\left(-\frac{(\eta_4 - \langle \eta_4 \rangle)^2}{2h_c^2}\right).$$

Для вывода окончательной формулы, позволяющей определить значение вероятности правильного приема первого информационного символа  $P_{\text{прав } 1}$ , необходимо определить переменные [10]:

$$x = \frac{\eta_4 - \langle \eta_4 \rangle}{h_c};$$

$$y = \frac{\eta_3 - \langle \eta_3 \rangle}{h_c}.$$

Нормированные ПВ для переменных  $x$  и  $y$  выберем равными:

$$\begin{cases} w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right); \\ w(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right). \end{cases}$$

Полученные значения ПВ подставляют в формулу (3) для вычисления вероятности правильного приема информационного символа  $P_{\text{прав } 1}$ .

Подробное описание методики определения верхних и нижних пределов интегрирования в нормированных переменных представлено в статьях [9, 12]. Пользуясь этой методикой, можно показать, что нижние ( $x_{н1}$ ,  $y_{н1}$ ) и верхние ( $x_{в1}$ ,  $y_{в1}$ ) границы определяются следующими выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{H1} = -\sqrt{2} \left\{ h_c + h_n \left[ \frac{\sin \Delta\omega_n T}{\Delta\omega_n T} \cos \varphi_n - \frac{\left( \sin \frac{\Delta\omega_n T}{2} \right)^2}{\Delta\omega_n T} \sin \varphi_n \right] \right\}, \quad x_{B1} = \infty; \\ y_{H1} = -x - \sqrt{2} \left\{ h_c + h_n \left[ \frac{\sin \Delta\omega_n T}{\Delta\omega_n T} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) + \frac{\left( \sin \frac{\Delta\omega_n T}{2} \right)^2}{\Delta\omega_n T} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) \right] \right\}; \\ y_{B1} = x + \sqrt{2} \left\{ h_c + h_n \left[ \frac{\sin \Delta\omega_n T}{\Delta\omega_n T} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) - \frac{\left( \sin \frac{\Delta\omega_n T}{2} \right)^2}{\Delta\omega_n T} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) \right] \right\}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Рассмотрим следующую составляющую последней группы формул:

$$\Delta\omega_n T = 2\pi\Delta f_n T = 2\pi(\Delta f_n T) = 2\pi k,$$

где  $k$  – число периодов частоты  $\Delta f_n$ , укладывающихся на длительности  $T$  информационного символа.

Тогда формула для расчета вероятности правильного приема первого информационного символа с учетом найденных пределов интегрирования (5) будет иметь вид

$$P_{\text{прав } 1} = \frac{1}{2\pi} \int_{x_{H1}}^{x_{B1}} \int_{y_{H1}}^{y_{B1}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right) dx dy = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sqrt{2} \left[ h_c + h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} \cos \varphi_n - \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} \sin \varphi_n \right] \right]}^{\infty} dx \int_{-x - \sqrt{2} \left[ h_c + h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) + \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) \right] \right]}^{x + \sqrt{2} \left[ h_c + h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) - \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) \right] \right]} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right) dy.$$

Если техническую скорость передачи символов *QPSK* обозначить  $R = 1/T$ , то  $k = \Delta f_n / R$  есть отношение частоты сдвига помехи к технической скорости передачи символов.

Представленная методика позволяет вывести формулы для расчета вероятности правильного приема второго  $P_{\text{прав } 2}$ , третьего  $P_{\text{прав } 3}$  и четвертого  $P_{\text{прав } 4}$  информационных символов, имеющие для каждой из вероятностей свои пределы интегрирования  $(x_{H2}, x_{B2}, y_{H2}, y_{B2})$ ,  $(x_{H3}, x_{B3}, y_{H3}, y_{B3})$  и  $(x_{H4}, x_{B4}, y_{H4}, y_{B4})$ :

$$P_{\text{прав } 2} = \frac{1}{2\pi} \int_{x_{H2}}^{x_{B2}} \int_{y_{H2}}^{y_{B2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right) dx dy = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sqrt{2} \left[ h_c + h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} \sin \varphi_n - \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} \cos \varphi_n \right] \right]}^{\infty} dx \int_{-\sqrt{2} \left[ h_c + h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} \sin \varphi_n - \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} \cos \varphi_n \right] \right]}^{\infty} dy$$

$$\begin{aligned}
 & \left. x + \sqrt{2} \left[ h_c - h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) - \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) \right] \right] \right. \\
 & \int \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dy. \\
 & \left. -x - \sqrt{2} \left[ h_c + h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) + \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) \right] \right] \right]
 \end{aligned}$$

$$P_{\text{прав3}} = \frac{1}{2\pi} \int_{x_{\text{Н3}}}^{x_{\text{В3}}} \int_{y_{\text{Н3}}}^{y_{\text{В3}}} \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dx dy = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sqrt{2} \left[ h_c - h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} \cos \varphi_n - \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} \sin \varphi_n \right] \right]}^{\infty} dx$$

$$\begin{aligned}
 & \left. x + \sqrt{2} \left[ h_c - h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) + \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) \right] \right] \right. \\
 & \int \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dy. \\
 & \left. -x - \sqrt{2} \left[ h_c - h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) - \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) \right] \right] \right]
 \end{aligned}$$

$$P_{\text{прав4}} = \frac{1}{2\pi} \int_{x_{\text{Н4}}}^{x_{\text{В4}}} \int_{y_{\text{Н4}}}^{y_{\text{В4}}} \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dx dy = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sqrt{2} \left[ h_c - h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} \sin \varphi_n + \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} \cos \varphi_n \right] \right]}^{\infty} dx$$

$$\begin{aligned}
 & \left. x + \sqrt{2} \left[ h_c - h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) + \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) \right] \right] \right. \\
 & \int \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dy. \\
 & \left. -x - \sqrt{2} \left[ h_c + h_n \left[ \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (\cos \varphi_n - \sin \varphi_n) - \frac{(\sin(\pi k))^2}{\pi k} (\cos \varphi_n + \sin \varphi_n) \right] \right] \right]
 \end{aligned}$$

Средняя вероятность правильного приема символа  $P_{\text{прав}}$  составит

$$P_{\text{прав}} = \frac{1}{4} (P_{\text{прав1}} + P_{\text{прав2}} + P_{\text{прав3}} + P_{\text{прав4}}).$$

Средние вероятности символьной и битовой ошибок приема при кодированию по Грея, соответственно, определяется по следующим формулам:

$$P_{\text{ош симв}} = 1 - P_{\text{прав}} ; P_{\text{ош бит}} = 1 - \sqrt{P_{\text{прав}}}.$$

Вывод формул для расчета вероятности правильного приема информационных символов и средней вероятности ошибки приема символа являются главной целью данной статьи.

## ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ ПРИЕМА ИНФОРМАЦИОННОГО СИМВОЛА И БИТА

Фазовый сдвиг гармонической помехи  $\varphi_{\text{п}}$  может принимать любые значения как в течение времени одного сеанса связи, так и от сеанса к сеансу. Значит, целесообразно рассмотреть вероятности символьной и битовой ошибок при усреднении формул по случайному значению фазы  $\varphi_{\text{п}}$ .

Примем, что случайная величина  $\varphi_{\text{п}}$  имеет равномерное распределение в пределах значений  $(-\pi, \pi)$ . Конкретные расчеты показывают, что в таком случае значения вероятности правильного приема всех четырех позиций оказываются одинаковыми и равными среднему значению вероятности правильного приема символа *QPSK*. Отсюда следует, что при расчетах графиков достаточно использовать только одну формулу, усредненную по случайной величине  $\varphi_{\text{п}}$ . При моделировании необходимо учесть, что  $h_c^2 = E_c/N_0 = 2 E_b/N_0 = 2h_b^2$ , где  $E_b$  – энергия одного бита. Отсюда  $h_c = \sqrt{2}h_b$ .

На рис. 2 показаны графики зависимостей вероятностей символьных  $P_{\text{ош симв}}(E_b/N_0)$  и битовых ошибок  $P_{\text{ош бит}}(E_b/N_0)$  от отношения сигнал/шум для бита ( $E_b/N_0$ ) при трех значениях коэффициента  $k$  сдвига частоты помехи: 0; 0,5 и 1, и при значении отношения помеха/шум 14 дБ. При  $k = 0$  гармоническая помеха является когерентной с несущим колебанием сигнала и степень ее влияния максимальна. При  $k = 1$  влияние помехи полностью отсутствует.

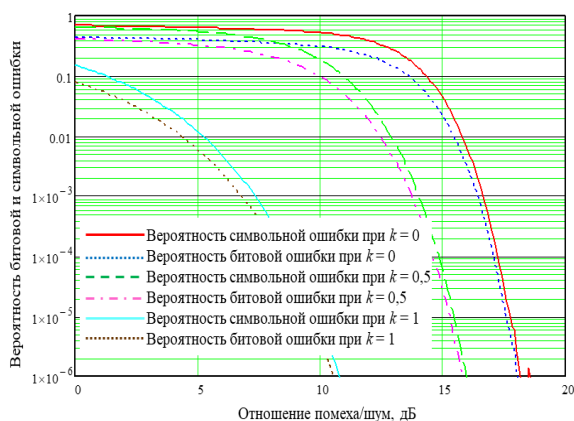


Рис. 2. Зависимости вероятности ошибок приема символа и бита от отношения сигнал/шум при заданных значениях коэффициента сдвига частоты помехи:  $k = 0$ ,  $k = 0,5$  и  $k = 1$

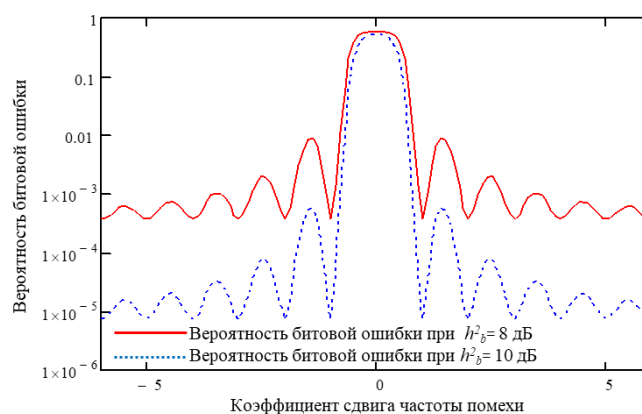


Рис. 3. Зависимость средней вероятности битовой ошибки от коэффициента  $k$  сдвига частоты помехи при заданных значениях отношений сигнал/шум:  $h_c^2 = 18$  дБ и  $h_c^2 = 20$  дБ, помеха/шум  $h_{\text{п}}^2 = 14$  дБ

На рис. 3 представлены графики зависимостей вероятностей битовых ошибок от коэффициента  $k$  сдвига частоты помехи при заданных значениях отношения сигнал/шум  $h_b^2 = 8$  дБ и  $h_b^2 = 10$  дБ для бита ( $h_b^2 = E_b/N_0$ ) и при отношении помеха/шум  $h_{\text{п}}^2 = 14$  дБ. Расчеты сделаны для случая кодирования по Греху. Моделировалось превышение помехи над сигналом на 6 дБ и на 4 дБ соответственно. Сигнал в пределах и чуть шире верхнего плато графика полностью подавлен, средняя вероятность битовой ошибки близка к значению 0,5. Влияние помехи полностью отсутствует при значении параметра  $k$ , равном целому числу. При нецелом  $k$  влияние помехи волнообразно уменьшается с увеличением его абсолютного значения, а при  $|k| > 5$  становится малозначительным. Таким образом, методика позволяет точно определить степень влияния помехи на достоверность приема сигналов *QPSK* в спутниковых радиоканалах передачи информации при наличии гармонической помехи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанная методика расчета помехоустойчивого когерентного приема четырехпозиционных фазоманипулированных радиосигналов при воздействии гармонической помехи со сдвигом частоты позволяет точно определить вероятность символьной и битовой ошибок при заданных значениях уровня помехи и коэффициента сдвига частоты помехи.
2. Наличие гармонической помехи существенно ухудшает качество канала связи, полностью нарушая прием информации. Кривые средних вероятностей символьной и битовой ошибок имеют пороговый характер при значениях уровня помехи  $h_n \geq h_c$ .
3. Представленные на рис. 2 и 3 графики показывают, что гармоническая помеха оказывает максимальное влияние на вероятности ошибок приема символа и бита при значении коэффициента сдвига частоты помехи  $k < 0,5$ . В результате установлено, что для нарушения приема информации нет необходимости в точном совпадении частоты гармонической помехи с частотой несущего колебания сигнала *QPSK*.

## Список используемых источников

1. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Помехоустойчивость когерентного приемника сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией при наличии ретранслированной помехи // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65, № 8. – С. 804–808.
2. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи / Г.В. Куликов [и др.] // Научные технологии. – 2018. – № 11. – С. 32–38.
3. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 11. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/9/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.9 (дата обращения: 13.02.2021).
4. Нгуен Ван Зунг Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 3. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/4/text.pdf> (дата обращения: 13.02.2021). – Doi: 10.30898/1684-1719.2019.3.4.
5. Чигрин Д.Н., Куликов Г.В., Суворцева И.В. Анализ помехоустойчивости в технологии беспроводной передачи и приема дискретных сигналов // Материалы 14-й Всероссийской конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий». г. Агой, 16–20 сентября 2019 г. / под ред. акад. Б.Ф. Мясоедова. – М.: МЦАИ РАН, 2019. – С. 314–320.
6. Модельное исследование помехоустойчивости приема радиосигналов с QPSK, BPSK, 8PSK и DBPSK / Е.В. Волхонская [и др.] // Известия КГТУ. – 2017. – № 46. – С. 165–174.
7. Тяпкин В.Н., Дмитриев Д.Д., Мошкина Т.Г. Потенциальная помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – Вып. № 3(43). – С. 113–119.
8. Шогенов Т.К. Вопросы совместного использования мобильных систем подавления радиолиний управления взрывом и спутниковой навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС/GPS в составе бортовых комплексов специального транспорта // Инженерный вестник Дона: электрон. науч. журн. – 2016. – № 3. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/p3y2016/3693](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/p3y2016/3693) (дата обращения: 13.02.2021).

9. *Звонарев В.В., Попов А.С.* Потенциальная помехоустойчивость когерентного приема четырехпозиционного фазоманипулированного радиосигнала в присутствии когерентной гармонической помехи // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 1. – С. 45–54.
10. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Сов. радио, 1975. – 400 с.
11. *Прокис Дж.* Цифровая связь / пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
12. *Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Попов А.С.* Методика расчета помехоустойчивости приема четырехпозиционной квадратурной фазовой манипуляцией при воздействии гармонической когерентной помехи // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 673. – С. 79–89.



Д.Н. Чунин

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

Рассмотрены вопросы эксплуатации навигационной аппаратуры потребителя системы ГЛОНАСС, интегрированной в систему управления потребителей, связанные с отсутствием контроля точностных характеристик в процессе функционирования навигационной аппаратуры потребителя (НАП). Экспериментально подтверждено, что ненаблюдаемые аппаратные погрешности навигационной аппаратуры в реальных условиях эксплуатации могут значительно возрасти и повлиять на качество координатно-временного обеспечения потребителей. Обоснована необходимость изменения нормативно-технических документов, регламентирующих контроль производства и эксплуатации интегрированной навигационной аппаратуры потребителя. Кроме того, показана необходимость разработки дистанционных методов контроля точностных характеристик и технического состояния навигационной аппаратуры потребителя, встроенной в систему управления объектами, находящимися в высокой степени готовности к применению.

Ключевые слова: навигационная аппаратура потребителя системы ГЛОНАСС, аппаратные погрешности навигационных измерений.

### **ВВЕДЕНИЕ**

*Система ГЛОНАСС* – это система двойного назначения с приоритетом решения задач координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) в интересах обеспечения обороны и безопасности Российской Федерации [8], эта система по сути является ядром КВНО государства.

Навигационная аппаратура потребителя (НАП) – это ключевое звено в выполнении системой ГЛОНАСС задач оперативного КВНО. Одновременно НАП входит в состав системы КВНО государства в качестве отдельного элемента. В ВС РФ предъявляются достаточно жесткие требования к разрабатываемой технике. Военным потребителем системы ГЛОНАСС признается любой образец ВВТ, включающий в свой состав НАП. С развитием технологий производства облик НАП меняется. Сейчас разрабатываются образцы НАП, имеющие качественно новые технические и функциональные характеристики, такие как массогабаритные размеры, помехоустойчивость, энергопотребление, перечень решаемых задач, возможности комплексирования и интеграции со средствами связи, передачи данных и другими навигационными системами. Одновременно происходит повышение роли и значения НАП, это находит отражение в качественном изменении НАП и переходе ее из разряда вспомогательных и резервных систем в разряд основных, чему немало способствовало активное использование НАП в системах управления движением и наведения оружия.

### **ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

На текущей стадии технического перевооружения идеология построения системы навигационного обеспечения ВС РФ относительно роли в ней НАП разделилась на разные направления. Нужно отметить, что выпущено некоторое количество ведомственных распорядительных документов, регулирующих деятельность организаций Минобороны РФ в

отношении НАП, относящейся к средствам измерения военного назначения (СИВН) [3]. Так, Военно-топографическое управление Генерального штаба ВС РФ отвечает за выработку идеологии построения системы навигационного обеспечения ВС РФ, организацию эксплуатации аппаратуры спутниковой навигации и средств функциональных дополнений, предназначенных для наземного навигационного обеспечения воинских частей и подразделений видов и родов войск (сил) ВС РФ и заинтересованных органов военного управления. В то же время НАП не СИВН в основном не предназначается для наземной навигации и, как правило, интегрируется в бортовые средства управления оружием и техникой. Развитием НАП не СИВН занимаются научные организации видов и родов войск ВС РФ обособленно друг от друга, что создает трудности, в первую очередь в возможности систематизации сведений о параметрах их разработки и результатах применения. Комплексное сопровождение сегмента НАП не СИВН осуществляет Главное оперативное управление Генерального штаба ВС РФ.

Сформированное «разделение» наглядно изображено на рис. 1, где представлена классификация НАП согласно ГОСТ 31380-2009.



*Рис. 1. Классификация навигационной аппаратуры специальных потребителей глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС*

Отнесение НАП к различным группам определяет порядок разработки, производства и контроля технического состояния аппаратуры на различных этапах эксплуатации. Накопленный опыт работы военного представительства по контролю предприятий промышленности, производящих НАП, а также анализ технической и эксплуатационной документации позволяют выделить различия в свойствах НАП, относящейся к средствам измерения военного назначения и не относящейся к ним, а также различия в подходах к контролю технического состояния и точностных характеристик аппаратуры. Указанные различия представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты сравнительного анализа групп НАП

Группа НАП/ сравниваемое свойство (отношение)	СИВН	НЕ СИВН
Стратегическая значимость	Ниже уровнем	Выше уровнем
Период проведения ТО (поверки) при эксплуатации	От 3 до 5 лет	Не определен
Набор проверок в рамках ТО при эксплуатации	Достаточный, с учетом метрологии	Ограниченный, без оценки ТХ
Наименование характеристик	Метрологические	Точностные (ТХ)
Состав точностных (метрологических) характеристик	Одинаковый	
Типы погрешностей	Одинаковые	
Бюджет погрешностей	Одинаковый	
Факторы, влияющие на точность	Одинаковые	
Требования к точности и темпу выдачи измерений	Ниже	Выше
Оперативный и объективный контроль ТХ на стадии эксплуатации	Доступен	Невозможен
Знание действительных ТХ на стадии эксплуатации	Возможно	Невозможно
Состав мероприятий на стадии разработки, в ходе которых проверяются (подтверждаются) ТХ	Одинаковый (с имитатором сигналов ГНСС)	
Состав мероприятий на стадии производства в ходе которых проверяются (подтверждаются) ТХ	Полный (с имитатором сигналов ГНСС)	Неполный (с имитатором сигналов ГНСС)
Периодическая поверка, контроль технических и точностных характеристик на этапе эксплуатации	Проводится	Не проводится
Применение имитатора сигналов ГНСС на стадии эксплуатации	Возможно	Невозможно
Доступность реперной геодезической точки при оценке ТХ	Доступна	Недоступна
Ограничения по накоплению измерительной информации	Нет	Есть
Требование ТЗ о стабильности ТХ в течение всего срока службы	Присутствуют	
Случаи отклонений ТХ	Присутствуют	
Причины отклонений ТХ	Одинаковы	
Возможность компенсации ТХ	Присутствует	Отсутствует
Применение	Персонального использования	Интегрированная

Основной вывод, который можно сделать из проведенного анализа, заключается в том, что вопросы контроля точностных характеристик, как и в целом технического состояния НАП, не относящейся к средствам измерения военного назначения, в период ее эксплуатации должным образом не проработаны. Научно-методический аппарат, направленный на решение данной задачи, весьма ограничен. Те методы и модели, которые известны, официально не приняты, не реализованы на практике и находятся в процессе проработки. Для новых изделий военной техники, на которые НАП ставится впервые, не рассматривается вопрос о каком-либо варианте контроля точностных характеристик, как и полного состава проверок технического состояния в целом, после ввода в эксплуатацию. Данная проблема требует незамедлительного решения, так как отсутствие технического контроля интегрированной навигационной аппаратуры не позволяет прогнозировать изменение ее технического состояния и точностных характеристик, а значит, не позволяет и осуществлять планирование применения потребителями навигационной информации.

Погрешности определения координат местоположения, составляющих вектора скорости движения и шкалы времени, – главные показатели работоспособности НАП в ходе штатной эксплуатации. Как показывает опыт эксплуатации аппаратуры, случаи существенных отклонений в определении координат, составляющих вектора скорости движения и шкалы време-

ни, встречаются систематически [4, 6, 7]. Причинами данного факта могут служить аппаратные погрешности НАП, вызванные изменением ее технического состояния.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

Вклад, вносимый аппаратной погрешностью самой НАП, в общем бюджете погрешностей навигационных определений невелик и составляет в пересчете на погрешность определения псевдодальности величину дециметрового порядка [2]. Источниками могут быть нелинейность фазочастотной характеристики радиотракта, тепловые шумы, нестабильность опорного генератора, программные сбои. Как правило, в режиме стандартной точности специальных мер по борьбе с данным типом погрешностей не применяют, их считают случайными и компенсируют на этапе обработки измерений.

В настоящее время происходит значительная модернизация системы ГЛОНАСС, направленная прежде всего на повышение точности позиционирования за счет снижения ключевых погрешностей эфемеридного и частотно-временного обеспечения. Согласно федеральной целевой программе «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» (ФЦП), утвержденной постановлением Правительства РФ от 3 марта 2012 года погрешность определения местоположения в реальном времени в государственной геоцентрической системе координат за счет космического сегмента без использования систем функциональных дополнений должна составлять 0,6 метра [8]. То есть в бюджете погрешностей инструментальная погрешность НАП, наряду с ионосферной и тропосферной погрешностью, будет занимать центральное место и потребует применения специальных мер по компенсации либо учету при обработке измерений.

Опыт эксплуатации НАП показывает, что встречаются случаи отклонений значений точностных характеристик аппаратуры вплоть до выхода за установленные пределы по причине неправильного учета аппаратных погрешностей. Данные случаи прежде всего связаны с несоответствием калибровочных данных, полученных при производстве аппаратуры с использованием имитаторов, действительным условиям эксплуатации при работе по реальным сигналам [1, 4]. Кроме того, значительные погрешности может вызывать старение элементной базы в процессе эксплуатации НАП. Особенно это актуально для штатной эксплуатации НАП, когда она интегрирована в систему управления объектом навигации, непосредственно влияет на точность местоопределения и вместе с тем не проходит периодическую метрологическую поверку.

В работе [7] представлены результаты экспериментального подтверждения влияния плановой замены орбитальной группировки на такую важную составляющую аппаратной погрешности, как групповое время запаздывания. В работе показано, что калибровочные поправки, полученные при испытаниях аппаратуры по сигналам имитатора и подтвержденные по сигналам существующей на тот момент орбитальной группировки навигационных космических аппаратов (НКА), могут стать совершенно неактуальными в результате плановой замены НКА. И более того, могут привести к значительным погрешностям местоопределения потребителя.

Помимо возможного изменения орбитальной группировки НКА еще одним фактором, влияющим на возрастание аппаратных погрешностей НАП, является деградация характеристик электронной компонентной базы (ЭКБ) НАП. Целью эксперимента, рассматриваемого в рамках данной статьи, являлось подтверждение гипотезы о влиянии деградации ЭКБ на значения погрешностей навигационных определений.

В качестве объекта контроля использовалась многофункциональная навигационная аппаратура потребителя (МНАП), которая является образцом аппаратуры, интегрированной в си-

стему управления объектом. Основные заявленные технические характеристики МНАП приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Характеристики МНАП

Точностные характеристики МНАП	Значение
Предельные (по уровню вероятности 0,997) погрешности определения МНАП текущих значений параметров при использовании многочастотных ВТ сигналов ГНСС ГЛОНАСС не превышают:	-
плановых координат в стандартном режиме;	15 м
плановых координат в дифференциальном режиме;	5 м
высоты в стандартном режиме;	20 м
высоты в дифференциальном режиме;	7 м
составляющих вектора скорости	0,03...0,05 м/сек
Предельная (по уровню вероятности 0,997) погрешность определения МНАП текущих значений углов пространственной ориентации объекта (при разnose антенн на расстояние 2 м) не превышает:	-
в режиме без использования информации инерциальной системы объекта-носителя;	6 угл. мин
предельная (по уровню вероятности 0,997) погрешность формирования шкалы времени относительно системной шкалы КНС не превышает	0,1 мкс

При производстве аппаратуры в 2010 году указанные характеристики были подтверждены в лабораторных условиях с использованием имитатора сигналов ГНСС. В 2019 году данный образец был демонтирован из системы управления и были произведены повторные испытания на имитаторе ГНСС в тех же условиях.

Целью экспериментов, проводимых с помощью специального поверочного комплекса, построенного на базе имитатора сигналов, являлась фиксация всех составляющих погрешностей дальномерных измерений за исключением ненаблюдаемых аппаратных погрешностей, обусловленных прежде всего аналоговой частью аппаратуры.

В качестве анализируемых данных использовались «сырые» псевдодальномерные измерения, записанные в *Rinex* файлы. С учетом того, что навигационное поле формируется имитатором (все погрешности дальномерных измерений известны), справедливо допущение, о том, что единственным фактором, влияющим на дисперсию псевдодальномерных измерений, стали аппаратные погрешности самой НАП.

Используя дисперсионный однофакторный метод [9], было произведено сравнение полученных данных.

Для примера рассмотрим фрагменты массивов дальномерных измерений, полученных НАП в процессе испытаний в 2010 и 2019 годах:

$$D_0 = \begin{bmatrix} 2,8328240811 \cdot 10^6 & 2,1927284001 \cdot 10^6 & 5,2596448022 \cdot 10^6 \\ 2,8328240797 \cdot 10^6 & 2,1927284031 \cdot 10^6 & 5,2596447988 \cdot 10^6 \\ 2,832824075 \cdot 10^6 & 2,1927283977 \cdot 10^6 & 5,2596447967 \cdot 10^6 \\ & \dots & \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$D_n = \begin{bmatrix} 2,8462105237 \cdot 10^6 & 2,201613369 \cdot 10^6 & 5,2487565509 \cdot 10^6 \\ 2,8462105232 \cdot 10^6 & 2,2016133705 \cdot 10^6 & 5,2487565486 \cdot 10^6 \\ 2,8462105236 \cdot 10^6 & 2,2016133738 \cdot 10^6 & 5,248756551 \cdot 10^6 \\ & \dots & \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Далее алгоритм сравнения выглядит следующим образом.

На первом шаге вычисляется количество полученных измерений в каждом массиве:

$$N_{old} := \text{rows}(D) - 1 = 208, \quad (3)$$

$$N_{new} := \text{rows}(D) - 1 = 187. \quad (4)$$

Затем вычисляются векторы расстояний для каждого набора данных:

$$D_{old} = \left\| \left\| \begin{array}{c} \text{for } i \in n, \dots, N_{old} \\ D_{old_i} \leftarrow \sqrt{D_{0,i,0}^2 + D_{0,i,1}^2 + D_{0,i,2}^2} \\ D_{old} \end{array} \right\| \right\|. \quad (5)$$

$$D_{new} = \left\| \left\| \begin{array}{c} \text{for } i \in n..N_{new} \\ D_{new_i} \leftarrow \sqrt{D_{n_i,0}^2 + D_{n_i,1}^2 + D_{n_i,2}^2} \\ D_{new} \end{array} \right\| \right\|. \quad (6)$$

$$D_{old} = \begin{bmatrix} 6,3637106751 \cdot 10^6 \\ 6,3637106727 \cdot 10^6 \\ 6,3637106634 \cdot 10^6 \\ \dots \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$D_{new} = \begin{bmatrix} 6,3637615529 \cdot 10^6 \\ 6,3637615513 \cdot 10^6 \\ 6,3637105557 \cdot 10^6 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Потом векторы уравнивались по размерности, в сторону вектора с меньшим количеством измерений.

Вычислялось среднее арифметическое для каждой выборки:

$$M_{old} := \text{mean}(D_0) = 6,3637106625 \cdot 10^6, \quad (9)$$

$$M_{new} := \text{mean}(D_n) = 6,3637618315 \cdot 10^6. \quad (10)$$

Создавался массив из двух векторов:

$$D := \text{augment}(D_0, D_n). \quad (11)$$

Затем считалось среднее арифметическое по выборкам:

$$y_{vid} := \left\| \left\| \begin{array}{c} \text{for } i \in 0, \dots, N \\ y_{vid_i} \leftarrow \text{mean}(D^{\{i\}}) \\ y_{vid} \end{array} \right\| \right\|. \quad (12)$$

Общая сумма квадратов отклонений полученных в эксперименте значений исследуемого параметра от среднего значения составила

$$C_Y := \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^1 (D_{i,j} - y_{vid_i})^2 = 2,4482658659 \cdot 10^5. \quad (13)$$

Факторная сумма квадратов отклонений групповых средних от общего среднего значения –

$$C_\Phi := \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^1 (M_j - y_{vid_i})^2 = 2,4613154757 \cdot 10^5. \quad (14)$$

Остаточная сумма квадратов отклонений полученных в эксперименте значений от групповых средних значений –

$$C_{ost} := \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^1 (D_{i,j} - M_j)^2 = 17,7781331629.$$

Общая дисперсия –

$$S_Y := \frac{C_Y}{N \cdot 2 - 1} = 656,3715458113. \quad (15)$$

Факторная дисперсия –

$$S_\Phi := C_\Phi = 2,4613154757 \cdot 10^5.$$

Остаточная дисперсия –

$$S_{ost} := \frac{C_{ost}}{2(N-1)} = 0,0477906805. \quad (16)$$

Задавался уровень значимости:  $\alpha := 0,01$ .

Статистика Фишера определялась формулой

$$F := \frac{S_\Phi}{S_{ost}} = 5,1501996782 \cdot 10^6. \quad (17)$$

Квантиль распределения Фишера – выражением

$$F_{1-\alpha}(L-1, L(N-1)) = F_{1-\alpha}(1, 186) = 6365,864, \quad (18)$$

$$F > F_{1-\alpha}(L-1, L(N-1)). \quad (19)$$

Из последнего неравенства следует, что дисперсии псевдодальномерных измерений, проведенных в идеальных условиях по сигналам имитатора, но с разницей в 9 лет, значительно отличаются друг от друга. При этом в суммарной дисперсии дальномерных измерений существенно возрастает роль дисперсии ненаблюдаемых аппаратных погрешностей. Одним из ключевых факторов, влияющих на это, является деградация и изменение состояния элементной базы. Специалистами предприятия-изготовителя было установлено [1, 5], что наиболее критичным элементом, подверженным старению, является применяемый на промежуточной частоте фильтр на поверхностных акустических волнах (ПАВ фильтр). Под этим термином понимают изменения диэлектрических характеристик керамики (главным образом, их электропроводности и пробивного напряжения) за счет термо- и электродиффузии атомов материала электродов встречно-штыревого преобразователя и микрополоскового ответвителя внутри диэлектрика. Наиболее заметно такого рода старение при высоких температурах, повышенной влажности и в сильных электрических полях.

Таким образом, аналоговая часть навигационной аппаратуры потребителей (НАП) вносит аппаратурные погрешности в результаты навигационных измерений, которые заключаются в изменении в зависимости от температуры и времени фазовых и групповых задержек сигнала в аналоговых трактах – трактовых задержек.

Несмотря на применяемые меры по обеспечению стабильности работы аппаратуры, процесс старения неизбежен, и единственным способом учета дополнительных погрешностей является периодический контроль технического состояния НАП и ее точностных характеристик. Однако это потребует выведения носителя интегрированной НАП из эксплуатации и демонтажа аппаратуры, что для некоторых образцов техники, находящихся в высокой готовности к применению, не представляется возможным.

Таким образом, возникает необходимость разработки методик систематического сбора и обработки информации о параметрах НАП не СИВН и происходящих в ней процессов в целях наблюдения за изменениями и прогнозирования состояния без выведения из штатной эксплуатации изделий вооружения и военной техники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе эксплуатации НАП, интегрированной в системы управления объектами, было установлено, что в процессе эксплуатации в реальных условиях технические и точностные характеристики НАП могут меняться. Причинами являются изменения аппаратурных погрешностей, вызванные различными факторами. Результаты эксперимента, представленного в данной статье, показали, что изменение аппаратурных погрешностей может привести к значительным погрешностям в определении местоположения потребителя.

Вместе с тем существующие нормативно-технические документы не предписывают проводить достаточный перечень контрольных проверок для интегрированной НАП в отличие от навигационной аппаратуры, которая отнесена к средствам измерения военного назначения. Кроме того, для многих образцов НАП проведение контрольных проверок невозможно без демонтажа аппаратуры и выведения образца техники из эксплуатации.

Одной из необходимых составляющих повышения качества координатно-временного и навигационного обеспечения ВС РФ должно служить совершенствование методики дистанционной оценки точностных характеристик и технического состояния НАП на стадии эксплуатации. Длительность выполнения указанного процесса контроля необходимо установить на интервале с момента ввода в эксплуатацию изделия до момента ее прекращения.

## Список используемых источников

1. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: приемники-потребители навигационной информации / А.Д. Борискин [и др.]; под ред. М.И. Жодзишского. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 292 с.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – Изд. 4-е, перераб. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
3. ГОСТ РВ 8.560-95. ГСИ. Средства измерений военного назначения. Испытание и утверждение типа. – М.: Госстандарт, 1995. – 35 с.
4. Пат. на изобретение № 2525853 (RU) от 20.08.2014 г. Эталонное рабочее место абсолютной прецизионной калибровки запаздывания огибающих литерных частот в приемнике сигналов ГЛОНАСС / Ю.С. Дубинко [и др.]. – Заявка № 2011137798.
5. Ланин В.А. Старение пьезокерамики системы ЦТС под действием электрических и механических напряжений: дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Томск, 2005.



6. *Оганесян А.* Помехоустойчивая аппаратура глобальной навигационной системы ГЛОНАСС для современных образцов вооружения, военной и специальной техники // Национальная оборона. – 2018. – № 12.

7. *Авдеев В.А., Балакирев С.Н., Чунин Д.Н.* Проблемы контроля точностных характеристик аппаратуры спутниковой навигации на стадии эксплуатации // Навигация и гидрография. – 2019. – № 58. – С. 7–15.

8. Тактико-технические требования к глобальной навигационной системе ГЛОНАСС.: утв. Минобороны России 15 февраля 2008 года и Роскосмосом 14 февраля 2008 года. Ч. 1. Общие требования. – М., 2008. – 54 с.

9. *Задорина Н.А.* Обработка экспериментальных данных на ЭВМ: учеб. пособие. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 100 с.

С.Г. Алёхин,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
Р.Д. Иванов;  
В.А. Шемелов,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЕЗОНОВ ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА**

На основе разработанного авторами научно-методического аппарата определения естественных климатических сезонов года проведено исследование их структуры для отдельных районов Арктического региона. Продемонстрирована практическая применимость этого аппарата для задач рациональной организации деятельности и максимально эффективного использования естественных природных ресурсов, а также для планирования социально-экономического развития Арктики.

Ключевые слова: Арктический регион, естественные климатические сезоны, среднесуточная температура воздуха.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современные перспективы развития Арктического региона вызывают профессиональный интерес у широкого круга специалистов в политике, оборонной сфере, экономике, и, конечно, в науке. В первую очередь Арктика интересна своими огромными запасами природных ресурсов. Кроме того, в Арктике развиты речная и морская навигация, ведутся разработки месторождений полезных ископаемых [1, 2].

В Арктике в течение последних десятилетий наблюдаются сильные и быстрые климатические изменения, которые проявляются в значимом уменьшении ледовитости арктического бассейна. Это, например, открывает возможности для круглогодичного судоходства по трассе Северного морского пути при уменьшении топливных и временных затрат и использования минеральных ресурсов арктического шельфа.

Такие климатические изменения имеют свои особенности формирования, которые могут быть выявлены при условии исследования их относительно сезона. При этом речь идет не о традиционных календарных сезонах года, ограниченных неизменными периодами трехмесячной длительности, а имеются в виду естественные климатические сезоны (ЕКС) – как периоды времени года, характеризующиеся однотипным ходом метеорологических процессов и определенным термическим режимом [3, 4].

Ранее в статьях [5, 6] были опубликованы разработки авторов, посвященные научно-методическому аппарату определения дат смены ЕКС на основе метода корреляционного анализа и метода разложения полей метеорологических величин по естественным ортогональным функциям. Суть методов и примеры их практического использования изложены в указанных работах и здесь не приводятся. Цель опубликования настоящей статьи – продемонстрировать пригодность разработанных теоретических положений для определения числа ЕКС, их продолжительности и дат их начала и окончания для Арктического региона.

По мнению авторов, результаты их исследований будут полезны на практике при рациональной организации деятельности и максимально эффективного использования естественных природных ресурсов, а также планирования социально-экономического развития Арктики.

## СТРУКТУРА ЕСТЕСТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЕЗОНОВ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

В климатологии и метеорологии нет установившегося мнения о числе и продолжительности ЕКС в различных физико-географических районах. Существуют научные подходы к определению ЕКС на основе астрономических, синоптических, климатических и фенологических факторов, однако они обладают значимой долей субъективизма [7].

В качестве критерия структуры ЕКС (их числа и продолжительности) принимается среднесуточная температура воздуха, так как ее поле хорошо отражает состояние основных климатообразующих факторов: радиационных процессов и изменения солнечной активности, характера общей циркуляции атмосферы, состояния подстилающей поверхности. Временные ряды значений среднесуточной температуры воздуха подвергаются корреляционному анализу, в результате которого выделяются сезонные циклы.

Из анализа аналогичных исследований предшественников, подробный обзор которых приведен в работе [7], известно, что число ЕКС зависит от многих факторов, среди которых выделяют степень континентальности климата, форму рельефа земной поверхности и годовой ход метеорологических величин. Особенно число ЕКС зависит от температурных характеристик, которые достаточно четко выявляют сезонные условия. Используем эти знания для проверки соответствия числа ЕКС значениям площади поверхности районов ( $S$ , км<sup>2</sup>), для которых определяются ЕКС, и значениям средних годовых среднесуточных температур воздуха каждого исследуемого района ( $\bar{T}_{\text{ср.сут.}}$ , °С).

Для примера приведем данные пяти станций в Арктическом регионе (табл. 1, рис. 1), по которым получены архивы значений среднесуточной температуры воздуха за 60 лет с 1953 по 2013 год с помощью web-технологии удаленного доступа «АИСОРИ».

Таблица 1

### Характеристики гидрометеорологических станций в Арктическом регионе

№ п/п	Индекс	Наименование станции	Географический объект	Координаты		$\bar{T}_{\text{ср.сут.}}$ , °С	S, км <sup>2</sup>
				с. ш.	в. д.		
1	20107	Баренцбург	арх. Шпицберген	78°04	14°15	-7,01	61022
2	20046	Им. Э.Т. Кренкеля	арх. Земля Франца-Иосифа	80°37	58°03	-14,91	16134
3	20069	Остров Визе	о. Визе	79°30	76°59	-14,80	288
4	20087	Им. Г.А. Ушакова	арх. Северная Земля	79°33	90°37	-13,58	37000
5	20292	Им. Е.К. Федорова	п-в Таймыр	77°43	104°18	-17,77	16000

Результаты определения ЕКС для районов выбранных станций представлены в табл. 2, где для каждого ЕКС зафиксированы средние даты начала сезона ( $\overline{data}_n$ ) и его средняя продолжительность ( $\bar{P}$ , сут.) в течение года. Из анализа таблицы видно, что число ЕКС для разных станций различно. Рассмотрим факторы, определяющие это различие.



Рис. 1. Расположение гидрометеорологических станций в Арктическом регионе

Таблица 2

Результаты определения ЕКС для станций Арктического региона

№ ЕКС		Индекс станции				
		20107	20046	20069	20087	20292
1	$\overline{data}_n$	19.01	16.02	28.02	19.02	28.01
	$\overline{P}$ , суг.	28	25	13	19	25
2	$\overline{data}_n$	16.02	13.03	13.03	10.03	22.02
	$\overline{P}$ , суг.	22	34	34	34	22
3	$\overline{data}_n$	10.03	16.04	16.04	13.04	16.03
	$\overline{P}$ , суг.	61	27	27	42	34
4	$\overline{data}_n$	10.05	13.05	13.05	25.05	19.04
	$\overline{P}$ , суг.	34	28	37	28	39
5	$\overline{data}_n$	13.06	10.06	19.06	22.06	28.05
	$\overline{P}$ , суг.	104	98	92	18	25
6	$\overline{data}_n$	25.09	16.09	19.09	10.07	22.06
	$\overline{P}$ , суг.	15	91	67	31	92
7	$\overline{data}_n$	10.10	14.12	23.11	10.08	22.09
	$\overline{P}$ , суг.	43	62	95	40	91
8	$\overline{data}_n$	22.11	—	—	19.09	20.12
	$\overline{P}$ , суг.	24	—	—	67	37
9	$\overline{data}_n$	14.12	—	—	25.11	—
	$\overline{P}$ , суг.	34	—	—	27	—
10	$\overline{data}_n$	—	—	—	20.12	—
	$\overline{P}$ , суг.	—	—	—	59	—

Первый фактор – площадь земной поверхности исследуемых районов. Известно, что изменчивость температуры воздуха над поверхностью морей и океанов почти в 6 раз меньше,

чем над поверхностью суши [8]. Следовательно, между количеством ЕКС и площадью поверхности суши существует прямая зависимость: чем больше площадь земной поверхности исследуемого района, тем большее количество ЕКС в нем наблюдается. Наглядно это показано на рис. 2.

*Второй фактор* – среднесуточная температура воздуха. При более высоких значениях среднесуточной температуры воздуха уменьшается роль крупномасштабных атмосферных процессов и увеличивается роль мелкомасштабных процессов за счет изменения астрономических, синоптических, климатических и других факторов. Поэтому число ЕКС больше в тех районах, где значения среднесуточной температуры воздуха выше, что также показано на рис. 2.



Рис. 2. Факторы, определяющие структуру ЕКС Арктического региона

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования дали удовлетворительные результаты по определению числа ЕКС. В свою очередь, оценки продолжительности ЕКС, а также дат их начала и окончания получены с усреднением, так как они не определяются только двумя рассмотренными фак-

торами. В науке задача точной (в заданном смысле) оценки продолжительности ЕКС и дат их начала и окончания до сих пор не решена. Для более точных оценок требуются знания и учет большого числа физических закономерностей, лежащих в основе формирования климатических условий того или иного района, что на практике реализовать сложно. Например, получено недостаточно надежных данных о тепловом балансе системы «Земля – атмосфера».

С другой стороны, требования к высокой точности оценок определения ЕКС исходят от практических задач, для решения которых используются знания о структуре сезонов. Предположительно для задач организации деятельности и планирования развития Арктического региона эти требования не так высоки. Вместе с тем при необходимости можно повысить точность оценивания продолжительности ЕКС за счет учета таких факторов, как географическая широта места, высота над уровнем моря, степень континентальности климата, близость морей и океанов. Результаты этих и подобных исследований для районов различных климатических зон будут опубликованы в дальнейшем.

### Список используемых источников

1. *Васильев Л.Ю., Думанская И.О.* Природа и климат Арктики. – М.: Паулсен, 2019. – 232 с.
2. *Анисимов О.А., Кокорев В.А.* Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век. – 2016. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/295531815> (дата обращения: 5.04.2020).
3. *Лебедев А.Н., Писарева Г.П.* Климатические сезоны СССР // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1956. – Вып. 62(124). – С. 67–84.
4. *Чувашина И.Е.* Корреляционный метод определения климатических границ сезонов года // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1976. – Вып. 367. – С. 68–80.
5. *Алехин С.Г., Иванов Р.Д., Чернышов С.В.* Классификация естественных климатических сезонов года на основе анализа временных рядов среднесуточной температуры воздуха // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: сб. тез. Всерос. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 14-15 марта 2019 г. – СПб.: РГГМУ, 2019. – С. 46–47.
6. *Алехин С.Г., Иванов Р.Д.* Определение границ климатических сезонов года на основе метода разложения полей среднесуточной температуры воздуха по естественным ортогональным функциям // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 80–85.
7. *Галахов Н.Н.* Изучение структуры климатических сезонов года. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 181 с.
8. Естественные составляющие метеорологических полей: моногр. / А.В. Мещерская [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 199 с.

А.В. Астапович,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
К.К. Жбанов;  
Д.О. Медяников,  
*кандидат техн. наук;*  
А.И. Яковлев,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА НЕДОСТУПНОЙ ТЕРРИТОРИИ, ПОСТРОЕННАЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ РАЗНОРОДНОЙ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Предложен подход к совместной обработке высотной информации, получаемой по данным оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии со средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования. Описан основанный на методе наименьших квадратов алгоритм его реализации.

Выполнена совместная обработка радиолокационных и оптических данных на двух территориях, отличающихся по сложности рельефа. На основе результатов эксперимента сформулированы требования к обработке разнородных данных.

Ключевые слова: ДЗЗ, цифровая модель рельефа, нормальная высота, оптическая стереосъемка, радиолокационная интерферометрия, метод наименьших квадратов, совместная обработка разнородных данных ДЗЗ.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Системы дистанционного зондирования Земли космического базирования являются эффективным и зачастую единственным средством получения высотной информации о недоступных физико-географических районах. Дистанционное зондирование Земли может выполняться активными или пассивными методами. Активные методы основаны на генерировании и последующей регистрации космическим аппаратом какого-либо излучения. Для пассивных методов характерна регистрация космическим аппаратом отраженного солнечного или естественного излучения предметов. Получение высотной информации с помощью технологий космического ДЗЗ в настоящее время реализовано или с помощью радиолокационной интерферометрии, относящейся к активным методам, или с помощью оптической стереосъемки, которая относится к пассивным методам.

Получение геодезических данных методами оптической и радиолокационной съемки основано на различных физических принципах. Каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны. Вместе с тем оба метода съемки нашли широкое распространение в геодезической практике. Уровень пространственного разрешения лучших съемочных систем составляет несколько дециметров, точность получения нормальной высоты (далее – высоты) космическими методами характеризуется средней квадратической ошибкой (СКО) 4–7 м [1].

Повышение точности определения высот точек местности на недоступных территориях средствами ДЗЗ является актуальной задачей, решение которой позволит расширить спектр их применения.

Одним из путей повышения точности определения нормальных высот космическими методами является комплексирование результатов оптической и радиолокационной съемки. В данной статье описан метод совместной обработки данных оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, который основан на использовании математического аппарата метода наименьших квадратов.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Широкое распространение средств ДЗЗ пассивного и активного типа обеспечило наличие практически на всей территории земного шара как оптических стереопар, так и радиолокационных снимков. Вполне очевидно, что снимки обоих типов, как правило, имеют взаимное перекрытие.

В случае использования высотных данных, полученных двумя различными методами в одних и тех же точках земной поверхности, возникает неоднозначность искомых величин, что вызывает необходимость решения задачи уравнивания высот таких точек. Однако предварительно следует оценить возможное повышение точности определения высот при совместном использовании двух видов измерений. Приведем формулу среднего соотношения весов [2]

$$\frac{P}{p} \approx \frac{n}{k}, \quad (1)$$

где  $P$  – вес уравненного значения измеренной величины;

$p$  – вес измеренного значения величины;

$k$  – число необходимых величин;

$n$  – число измеренных величин.

Применительно к задаче уравнивания высот, определенных методами оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, в формуле (1) можно принять:  $p$  – вес измерения высоты одним методом = 1,  $k$  – число необходимых методов измерения высоты = 1,  $n$  – число используемых методов определения высоты = 2. Тогда вес уравненного значения высоты, определенной двумя методами, будет составлять  $P = 2$ .

Поскольку СКО уравненного значения высоты ( $M_H$ ) вычисляется из выражения [3]

$$M_H = \mu \sqrt{\frac{1}{P}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – СКО единицы веса, то величина  $\mu$  принимается равной  $m_H$  – СКО определения высоты с помощью только одного метода ДЗЗ. Следовательно,

$$M_H = m_H \sqrt{0,5} = 0,7m_H. \quad (3)$$

Таким образом, в случае совместной обработки данных оптической и радарной съемки теоретически возможно повысить точность определения высот на 30% относительно использования только одного вида информации.

Алгоритмы обработки измерительной информации, получаемой с использованием методов оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, основаны на реализации метода наименьших квадратов (МНК). Кратко опишем основные принципы получения высотной информации методами оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии.

Стереосъемка основана на возможности наблюдать поверхность Земли как объемную, вследствие возникновения стереоскопического эффекта изображения на двух перекрывающихся фотоснимках (стереопаре). При установке фотоснимков друг относительно друга в то положение, которое они занимали во время фотографирования, проектирующие лучи обоих снимков будут пересекаться, образуя модель, подобную объекту [4].

Процесс обработки стереопар включает в себя: восстановление связей проектирующих лучей, называемое внутренним ориентированием снимков, снимки, ориентированные взаимно друг относительно друга в положение, которое существовало в момент фотографирования. Результатом взаимного ориентирования снимков является стереомодель произвольного масштаба в фотограмметрической системе отсчета. Наконец, внешнее ориентирование осуществляется путем приведения модели к заданному масштабу в геодезической системе координат.



При фотограмметрической обработке измеренными величинами являются пиксельные координаты космических снимков, а определяемыми параметрами – координаты и высоты точек местности, а также элементы внешнего ориентирования модели [5].

Процесс радиолокационной интерферометрической съемки заключается в излучении и последующей регистрации радиолокатором с синтезированной апертурой антенны (РСА) электромагнитных волн, которые, распространяясь в среде, достигают поверхности и отражаются от нее.

Физической основой радиолокационных измерений является постоянство направления и скорости распространения электромагнитных волн. В методе радиолокационной интерферометрии получение высотной информации основано на многократном измерении расстояний от зондирующей аппаратуры до поверхности Земли, которые вычисляются по разности фаз принимаемого в пространственно разнесенных точках (интерферометрический базис) сигнала, отраженного от земной поверхности.

При интерферометрической обработке измеренными величинами являются разности фаз, а определяемыми параметрами – координаты и высоты точек местности, а также угол съемки главного изображения.

Таким образом, результатом как фотограмметрической, так и интерферометрической обработки данных ДЗЗ будет являться массив точек (как правило, расположенных регулярно) с известным пространственным положением, для которого выполнена оценка точности в виде ковариационной матрицы ошибок.

Совместную обработку данных ДЗЗ предлагается также выполнять по методу наименьших квадратов, который подробно описан в работах [2, 6].

В качестве определяемых параметров  $T_{1..k}$  принимаются высоты точек местности  $H_{1..k}$ , число которых равняется  $k$ . Уравниваемыми величинами будут являться высоты одноименных точек, определенных методами оптической стереосъемки  $H_{1..k}^I$  и радиолокационной интерферометрии  $H_{1..k}^{II}$ .

Решая задачу совместной обработки двух массивов разнородных данных, в качестве предварительных значений параметров целесообразно взять любой из двух массивов,  $H_{1..k}^I$  или  $H_{1..k}^{II}$ . Понятно, что число уравниваемых величин  $n$  будет вдвое больше числа определяемых параметров  $k$ . Для данной задачи параметрические уравнения связи будут выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} H_1^I = T_1 \\ H_2^I = T_2 \\ \dots \\ H_k^I = T_k \\ H_1^{II} = T_1 \\ H_2^{II} = T_2 \\ \dots \\ H_k^{II} = T_k \end{array} \right\}$$

Так как уравниваемые величины  $H_{1..k}^I$  и  $H_{1..k}^{II}$  связаны с определяемыми параметрами  $T_{1..k}$  линейными функциями простейшего вида, то коэффициенты матрицы параметрических уравнений поправок будут равны или 0, или 1. Соответственно, матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок  $B$ , размеров  $n \times k$ , примет вид

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Матрица свободных членов уравнений поправок  $l$  будет выглядеть следующим образом:

$$l = \begin{pmatrix} H_1^I - H_1^I \\ H_2^I - H_2^I \\ \dots \\ H_k^I - H_k^I \\ H_1^{II} - H_1^I \\ H_2^{II} - H_2^I \\ \dots \\ H_k^{II} - H_k^I \end{pmatrix}.$$

Установление весовой матрицы  $P$  осуществляется на основе ковариационных матриц  $K^I$  и  $K^{II}$  ошибок уравниваемых величин  $H_{1..k}^I$  и  $H_{1..k}^{II}$  [3]. Поскольку уравниваемые величины получены разными методами независимо друг от друга, то взаимная корреляция их ошибок отсутствует. Поэтому весовая матрица уравниваемых высот будет иметь вид

$$P = \begin{pmatrix} K^{I^{-1}} & 0 \\ 0 & K^{II^{-1}} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Решение системы нормальных уравнений, для определения вектора поправок  $\tau$  к предварительным значениям высот определяемых точек, осуществляется по формуле

$$\tau = (B^T P B)^{-1} B^T P l. \quad (5)$$

После вычисления поправок уравненные значения высот точек получают по формуле

$$H_{1..k} = H_{1..k}^I + \tau_{1..k}. \quad (6)$$

Для оценки точности уравненных значений высот сначала вычисляется СКО единицы веса  $\mu$

$$\mu = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T P \mathbf{v}}{n - k}}, \quad (7)$$

где вектор поправок  $\mathbf{v}$  к уравниваемым величинам получают из выражения

$$\mathbf{v} = B\tau + l. \quad (8)$$

Затем вычисляется корреляционная матрица ошибок уравненных значений высот определяемых точек  $Q$

$$Q = (B^T P B)^{-1}. \quad (9)$$

В заключение необходимо сказать, что СКО уравненных значений высот определяемых пунктов  $M_H$  находятся по формуле

$$M_H = \mu \sqrt{Q_{kk}}, \quad (10)$$

где  $Q_{kk}$  – диагональные элементы матрицы  $Q$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментальной проверки данного метода была выполнена совместная обработка высотной информации, полученной по глобальным цифровым моделям рельефа (ЦМР) AW3D30 и SRTM. Модель AW3D30 создана методом оптической стереосъемки, а ЦМР SRTM – методом радиолокационной интерферометрии.

В качестве определяемых точек использовались пункты государственной геодезической сети (ГГС), которые расположены на двух участках, отличающихся между собой по сложности рельефа и разнообразию форм растительного покрова.

Первый участок располагается на территории Новгородской области. Он характеризуется слабохолмистым рельефом (перепад высот – 150 м) и средней степенью лесистости. На данном участке использовано 43 пункта ГГС.

Второй участок располагается на территории Свердловской области (Пермский край), в средней части Уральского горного хребта. Перепад высот составляет 530 м, имеются отдельные горные вершины, степень лесистости высокая. На данном участке использовано 53 пункта ГГС.

Выбор пунктов ГГС в качестве определяемых точек обусловлен тем, что их координаты и нормальные высоты известны с высокой точностью, а значит, становится возможным оценить точность определения высот как рассматриваемыми методами ДЗЗ по отдельности, так и по результатам комплексирования съемочных данных.

Точность модели рельефа, построенного методами ДЗЗ, оценивалась по отклонениям высот от известных значений на пунктах:

$$\Delta H = H_{ДЗЗ} - H_{ГГС}. \quad (11)$$

В качестве основных показателей точности определения высот были приняты следующие параметры [3]:

- минимальное  $\Delta H_{\min}$  и максимальное  $\Delta H_{\max}$  значения разностей высот;
- СКО определения высот  $m_H$  как наиболее распространенный критерий оценивания точности в отечественной геодезической практике,

$$m_H = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}, \quad (12)$$

где  $n$  – число контрольных пунктов.

Результаты оценки точности определения высот методами оптической стереосъемки (ОСС) и радиолокационной интерферометрии (РЛИ) для двух тестовых участков представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Результаты оценки точности определения высот с помощью методов ДЗЗ

Показатели точности, м	Участок 1		Участок 2	
	ОСС	РЛИ	ОСС	РЛИ
$\Delta H_{\min}$	-3,78	-9,11	-10,80	-20,80
$\Delta H_{\max}$	+9,75	+5,99	+9,70	+11,40
$m_H$	<b>2,85</b>	<b>3,81</b>	<b>4,62</b>	<b>6,89</b>

Из табл.1 видно, что точность определения высот снижается с увеличением сложности рельефа, а данные ДЗЗ AW3D30 точнее данных SRTM. При этом нельзя утверждать, что метод

оптической стереосъемки принципиально точнее метода радиолокационной интерферометрии. Вывод правомерен только для конкретного набора данных.

Точность определения высот методами ДЗЗ в значительной степени зависит также от типа подстилающей поверхности зондируемой местности. На территории участка 1 пункты ГГС классифицированы, как находящиеся на открытой территории (28 пунктов) и находящиеся в лесных массивах (15 пунктов). На территории участка 2 пункты располагаются в поле (16 пунктов), в лесу (30 пунктов) и на горных вершинах (7 пунктов). В табл. 2 приведены СКО определения высот методами ДЗЗ в соответствии с принятым разделением пунктов.

Таблица 2

**СКО определения высот методами ДЗЗ в зависимости от типа подстилающей поверхности**

Тип подстилающей поверхности	СКО определения высот, м			
	Участок 1		Участок 2	
	ОСС	РЛИ	ОСС	РЛИ
Поле	2,08	3,52	3,96	2,18
Лес	3,90	4,29	4,23	5,83
Горы			7,04	14,25

Таким образом, точность определения высот открытых участков выше, чем лесистых и значительно выше, чем горных.

Совместная обработка материалов оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии выполнена в соответствии с вышеописанным алгоритмом в программном продукте MathCad. Поскольку информация о корреляции ошибок высот в конкретных точках производителями данных моделей не предоставляется, весовая матрица  $P$  формировалась по данным табл. 2, в соответствии с формулой [2]

$$p = \frac{c}{m_H^2}, \quad (13)$$

где коэффициент  $c$  – произвольная величина, которую для упрощения вычислительных процессов целесообразно подбирать таким образом, чтобы веса были близки к единице.

В табл. 3 приведены сравнительные данные по результатам оценки точности высот, полученных по данным оптической стереосъемки, радиолокационной интерферометрии, а также по результатам совместной обработки материалов ДЗЗ.

Таблица 3

**Результаты оценки точности определения высот методами ДЗЗ и их комплексированием**

Показатели точности, м	Участок 1			Участок 2		
	ОСС	РЛИ	Комплексирование	ОСС	РЛИ	Комплексирование
$\Delta H_{\min}$	-3,78	-9,11	-4,55	-10,80	-20,80	-12,76
$\Delta H_{\max}$	+9,75	+5,99	+7,08	+9,70	+11,40	+8,67
$m_H$	<b>2,85</b>	<b>3,81</b>	<b>2,54</b>	<b>4,62</b>	<b>6,89</b>	<b>4,57</b>

Анализ данных табл. 3 показывает, что СКО определения высот методом совместной обработки данных выше, чем при получении высотной информации с использованием только одного метода. Для слабохолмистого участка точность получения высотной информации повысилась на 11%, а для участка со сложным рельефом – только на 1% относительно данных, полученных методом оптической стереосъемки. Незначительный эффект повышения точно-

сти определения высот от совместной обработки разнородных данных на участке 2 может быть объяснен полуторной разностью в точности исходных данных, а также не вполне оптимальным установлением системы весов. Вместе с тем использование альтернативного набора данных в любом случае повышает степень надежности и достоверности цифровой модели рельефа местности на недоступной территории.

На рис. 1 и 2 представлены графики отклонений значений высот, определенных методами оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии по отдельности, а также определенных при совместной обработке данных относительно высот пунктов ГГС для участков 1 и 2 соответственно.

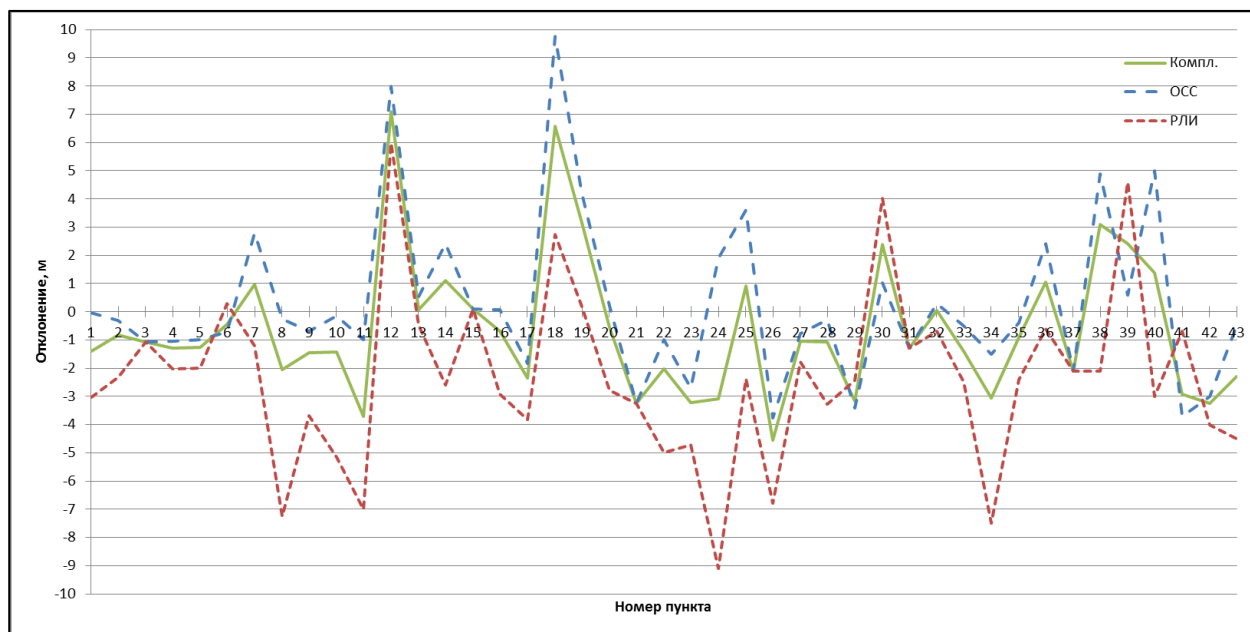


Рис. 1. Графики отклонений значений высот, определенных различными методами, от высот пунктов ГГС на участке со спокойным рельефом

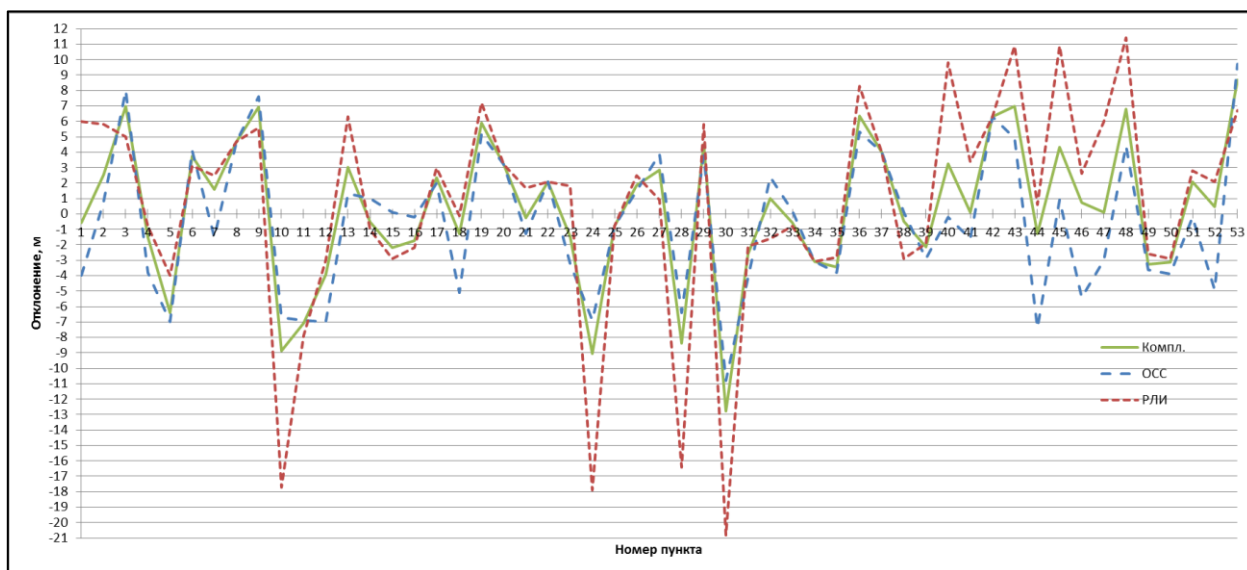


Рис. 2. Графики отклонений значений высот, определенных различными методами, от высот пунктов ГГС на участке со сложным рельефом

Необходимо отметить, что рис. 1 и 2 дают наглядное представление о том, что результаты совместно обработанных данных ДЗЗ с учетом весовых коэффициентов находятся между результатами оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии. Совместная обработка данных позволяет сгладить резкие отклонения от истинных значений высот и тем самым повысить точность высотных определений.

В табл. 4 приведены сравнительные результаты оценки точности определения высот пунктов, вычисленные в ходе совместной обработки данных и вычисленные по результатам сравнения с известными высотами пунктов ГГС.

Таблица 4

#### Сравнительный анализ оценки точности определения высот пунктов

Тип подстилающей поверхности	СКО определения высот, м			
	Участок 1		Участок 2	
	Совместная обработка	По пунктам ГГС	Совместная обработка	По пунктам ГГС
Поле	1,47	2,10	1,38	2,05
Лес	2,37	3,19	2,48	4,31
Горы			4,57	8,32

Оценка точности цифровой модели рельефа по результатам совместной обработки данных ДЗЗ дает более оптимистичный результат по сравнению с оценкой точности по отклонениям высот на пунктах ГГС. Однако по итогам совместной обработки данных, полученных разными методами, мы имеем объективную оценку сравнительной точности результатов внутри массива данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1) экспериментально подтверждено, что совместная обработка разнородных данных ДЗЗ позволяет повысить точность и достоверность цифровых моделей рельефа местности;

2) для достижения максимального эффекта от совместной обработки разнородных материалов ДЗЗ данные оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии должны иметь примерно одинаковый уровень точности;

3) большое значение для корректной совместной обработки разнородных данных имеет правильное установление системы весов на основе апостериорной оценки точности используемой информации.

Таким образом, предложенный метод совместной обработки разнородных данных ДЗЗ может применяться при одновременном наличии интерферометрических радарных снимков и стереоснимков оптического диапазона картографируемой территории. Трудоемкость выполняемых работ повышается незначительно, вследствие относительной простоты как интерферометрической, так и фотограмметрической обработки данных ДЗЗ. В то же время точность и надежность получаемых данных повышаются из-за привлечения измерительной информации различной физической природы.

### Список используемых источников

1. Яковлев А.И., Жбанов К.К. Основные направления совершенствования глобальных цифровых моделей рельефа // Молодежь. Техника. Космос: труды двенадцатой общерос. молодежн. научн.-техн. конф. БГТУ. – 2020. – Т. 3. – С. 189–197.
2. Большаков В.Д., Гайдаев П.А. Теория математической обработки геодезических измерений. – М.: Недра, 1977. – 367 с.
3. Астапович А.В. Теория математической обработки измерений: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Ч. 1: Ошибки измерений. – 194 с.
4. Хрущ Р.М. Фотограмметрия: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 541 с.
5. Безменов В.М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции: учебно-метод. пособие. – Казань: КГУ, 2009. – 86 с.
6. Астапович А.В., Богачев А.Н., Макаров С.А. Теория математической обработки измерений: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – Ч. 2: Метод наименьших квадратов. – 106 с.

И.Ю. Еремеев,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
А.В. Передрий,  
*доцент;*  
К.В. Семенов,  
*доктор техн. наук;*  
Е.Ю. Шиловский

## **МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ РЕТРАНСЛЯТОРОВ НА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ КОМПЛЕКСОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ КАНАЛОВ РЕТРАНСЛЯЦИИ**

В статье исследованы факторы влияния параметров функционирования бортовой специальной аппаратуры (БСА) ретрансляторов на беспилотных летательных аппаратах (БЛА), формирующих пространственную базу в составе комплексов радиомониторинга (РМ), на точность определения местоположения (ОМП) источников радиоизлучений (ИРИ) в условиях ресурсных ограничений на пропускную способность каналов ретрансляции.

В отличие от известной модели прямой цифровой ретрансляции сигналов, в предлагаемой модели функционирования БСА ретрансляторов на БЛА используется технология устранения избыточности представления цифровых данных с потерями на основе клиппирования спектральных коэффициентов быстрого преобразования Фурье (БПФ) в скользящем временном окне.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования предложенного научно-практического подхода к ОМП ИРИ с учетом эффектов, обусловленных реализацией процедур сокращения избыточности представления данных (ПСИПД) с потерями.

Результаты проведенного имитационного моделирования свидетельствуют, что применение предлагаемого подхода к устранению избыточности представления цифрового образа радиоэлектронной обстановки (РЭО) обеспечивает оценивание взаимной задержки ретранслированных сигналов со среднеквадратической ошибкой (СКО) не хуже 0,3 мкс при значении отношения сигнал/шум (ОСШ) не менее 10 дБ. Полученные результаты могут быть использованы как для обоснования тактико-технических характеристик БСА комплексов РМ с использованием БЛА, так и для дальнейшего исследования вопросов согласования высокопроизводительных датчиков с ограниченными по пропускной способности каналами связи пространственно-распределенных комплексов РМ.

Ключевые слова: радиомониторинг, цифровой ретранслятор, определение местоположения источников радиоизлучений, сокращение избыточности представления данных, беспилотный летательный аппарат.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современные системы РМ гражданского назначения, имеющие в своем составе БЛА, применяются как для отыскания потерпевших в зоне стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций, так и для определения местоположения ИРИ при мониторинге заданного района на предмет нелегитимного использования радиочастотного спектра [1]. Для систем обеспечения безопасности критически важных объектов инфраструктуры задача определения местоположения ИРИ особенно актуальна в условиях действия широкого спектра террористических угроз.

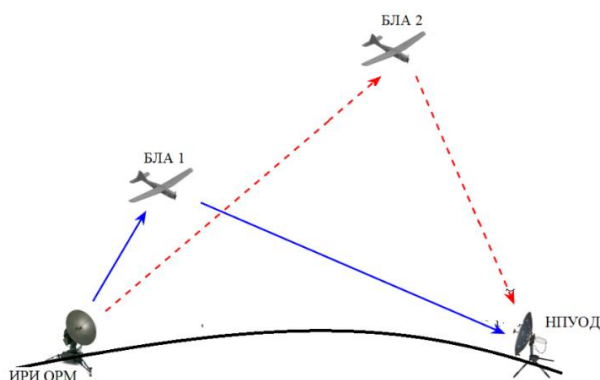
В условиях широкой априорной неопределенности частотных и временных параметров радиосигналов ИРИ основными задачами РМ для служб технического контроля являются:

– оценивание технических параметров радиоизлучений, таких как несущая частота, ширина спектра, мощность, а также вид модуляции радиосигнала;



– определение координат ИРИ, несанкционированно использующих частотный ресурс или несанкционированно находящихся в зоне отчуждения критически важных объектов инфраструктуры.

Для обнаружения кратковременных радиоизлучений и ОМП их источников необходимо реализовать «моноимпульсный» режим работы комплекса РМ, что обуславливает необходимость использования не менее двух БЛА, оснащенных ретрансляторами, функционирующих в заданном частотном диапазоне. В основе применения ретрансляторов на БЛА комплексов РМ лежит схема, представленная на рис. 1.



*Рис 1. Схема ОМП ИРИ с использованием ретрансляторов на БЛА (НПУОД – наземный пункт управления БЛА и обработки данных; БЛА1, БЛА2 – БЛА в составе комплекса РМ; ИРИ ОРМ – ИРИ объекта РМ)*

В системе, представленной на рис. 1, ОМП ИРИ осуществляется разностно-дальномерным методом на основе вычисления взаимной задержки, сигналов от ИРИ ОРМ, ретранслируемых через БЛА 1 и БЛА 2.

Исходными данными для ОМП ИРИ на основе вычислений, осуществляемых в НПУОД, являются:

- совокупность ретранслированных сигналов по линии «ИРИ-БЛА1- НПУОД» и по линии «ИРИ-БЛА2- НПУОД»;
- совокупность координат БЛА 1 и БЛА 2 в моменты измерения координатно-информативных параметров (КИП);
- координаты комплекса НПУОД.

Вопросы ОМП ИРИ на основе разностно-дальномерного метода с формированием пространственной базы системы ОМП за счет применения ретрансляторов на БЛА исследованы достаточно полно в работах [2–4]. В этих работах показано, что точность ОМП ИРИ определяется геометрическим фактором, т. е. взаимным расположением ИРИ и пространственных элементов измерительной системы, а также точностью оценивания КИП – взаимного временного сдвига сигналов от источников радиоизлучений, принимаемых элементами измерительной системы.

В рассматриваемой системе на НПУОД выполняются следующие этапы обработки исходных данных:

- прием ретранслированных сигналов от БЛА 1 и БЛА 2 и данных о пространственном положении БЛА 1 и БЛА 2;
- энергетическое обнаружение и частотно-временная селекция сигналов ИРИ в ретранслируемой смеси от БЛА 1 и БЛА 2;
- оценка КИП путем вычисления взаимной задержки между сигналами ИРИ, принимаемыми от различных БЛА;

- расчет параметра положения ИРИ по результатам оценивания КИП и данным о пространственном положении НПУОД, БЛА 1, БЛА 2 в моменты проведения измерений;
- расчет координат ИРИ.

Такой подход к организации обработки данных требует наличия широкополосных каналов для трансляции принятых радиосигналов от БЛА 1 и БЛА 2 на НПУОД. В работе [5] показано, что в условиях априорной неопределенности несущей частоты радиосигнала в широком частотном диапазоне реализация прямой цифровой ретрансляции в комплексах РМ является технически неоправданной. Прежде всего по той причине, что суммарная полоса частот, занимаемая полезными сигналами ИРИ, во много раз меньше полосы пропускания широкополосного РПУ, входящего в состав ретранслятора на БЛА. Кроме того, существующие хорошо апробированные в комплексах видеоконтроля технологические решения по построению каналов сброса специальной информации, обеспечивающие высокий уровень помехоустойчивости передачи данных с БЛА, обеспечивают скорость передачи информации на уровне до нескольких десятков мегабит в секунду. Этого вполне достаточно для ретрансляции сигналов ИРИ в комплексах РМ, но только после устранения априорной неопределенности относительно несущей частоты и ширины спектра.

В работе [5] предложен подход к сокращению нагрузки на канал передачи данных от БЛА на НПУОД за счет переноса на БСА БЛА функций по обнаружению и частотно-временной селекции сигналов от ИРИ. Такой подход базируется на ПСИПД с потерями на основе клиппирования спектральных коэффициентов БПФ в скользящем временном окне.

В свете сказанного остается открытым вопрос о степени и характере влияния параметров указанной процедуры, реализуемой в БСА БЛА, на реализуемую точность ОМП ИРИ комплексом РМ.

Таким образом, целью данной статьи является возможность представить исследование факторов влияния параметров ПСИПД с потерями на основе клиппирования спектральных коэффициентов БПФ в скользящем временном окне, реализуемой БСА БЛА из состава комплексов РМ, формирующих пространственную базу пеленгования, на точность ОМП ИРИ в условиях ресурсных ограничений на пропускную способность каналов передачи данных.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно [2–4], точность ОМП ИРИ пространственно-распределенной системой в составе двух подвижных измерительных элементов, реализующей разностно-дальномерный метод для определения параметра положения, по  $L$  независимым измерениям определяется выражением

$$\sigma_{x,y,z} = f\left(\Gamma\left((x, y, z), \left\{\left(x_i^{(1)}, y_i^{(1)}, z_i^{(1)}\right)\right\}_L, \left\{\left(x_i^{(2)}, y_i^{(2)}, z_i^{(2)}\right)\right\}_L\right), \sigma_\tau\right), \quad (1)$$

где  $\sigma_{x,y,z}$  – среднеквадратическая линейная ошибка оценивания координат ИРИ;

$\Gamma$  – геометрический фактор, определяемый взаимным расположением ИРИ и пространственных элементов измерительной системы [6],

$$\Gamma = \frac{1}{|\sin \gamma|} \sqrt{\frac{1}{|\text{grad } f(x_i, y_i, z_i)^{(1)}|^2} + \frac{1}{|\text{grad } f(x_i, y_i, z_i)^{(2)}|^2}}, \quad f(x_i, y_i, z_i) = P + \delta P. \quad (2)$$

Здесь  $P$ ,  $\delta P$  – истинное значение параметра положения и его ошибка измерения соответственно;

$\gamma$  – угол, под которым пересекаются поверхности положения;

$\sigma_\tau$  – СКО оценивания взаимного временного сдвига сигналов от ИРИ, принимаемых элементами измерительной системы.

Таким образом, для сравнения различных систем ОМП ИРИ с одинаковой пространственной конфигурацией необходимо использовать реализуемую ими точность оценивания взаимного временного сдвига, определяемую значением  $\sigma_\tau$ .

В свою очередь, в общем виде СКО оценивания взаимного временного сдвига сигналов от ИРИ, принимаемых элементами измерительной системы, определяется соотношением вида

$$\sigma_\tau^2 = f(q_1, q_2, |\dot{S}(f)|), \quad (3)$$

где  $q_1, q_2$  – ОСШ в радиолиниях «ИРИ-БЛА1», «ИРИ-БЛА2» соответственно;

$|\dot{S}(f)|$  – амплитудный спектр сигнала ИРИ.

Высокую точность при разностно-дальномерном методе можно получить измерением задержек от ИРИ непрерывных широкополосных сигналов, которое должно выполняться с учетом наличия амплитудной и фазовой модуляции, т. е. по комплексным огибающим сигналов с помощью корреляторов. Точность измерения задержки сигналов по комплексной огибающей корреляционным измерителем определяется выражением [6]

$$\sigma_\tau = \frac{2}{\Delta f_c \sqrt{q_1^2 q_2^2 \Delta f_c T}}, \quad (4)$$

где  $\Delta f_c$  – среднеквадратическое значение ширины спектра сигнала;

$T$  – время измерения, характеризующее число некоррелированных отсчетов.

Применение ПСИПД с потерями в тракте обработки сигналов ведет к тому, что образы сигналов, поступающие в НПУОД от БЛА 1 и БЛА 2, отличаются от сигналов, принимаемых БЛА 1 и БЛА 2. Данное обстоятельство обуславливает снижение реализуемой точности оценивания взаимной временной задержки по сравнению с выражением (4). Характер влияния параметров процедуры сокращения избыточности представления цифровых данных с потерями на точность оценивания взаимной задержки сигналов после преобразований процедурами сокращения избыточности, а следовательно, на точность ОМП ИРИ, в настоящее время не исследован.

В свете сказанного формальная постановка задачи исследований в рамках разработки модели функционирования БСА ретрансляторов на БЛА комплексов ОМП ИРИ в условиях ограничений на пропускную способность каналов ретрансляции имеет два аспекта.

Первый аспект состоит в отыскании характера функциональной зависимости точности оценивания взаимного временного сдвига сигналов от их параметров при заданных параметрах ПСИПД:

$$F_i^{(1)} : \sigma_\tau = F_i^{(1)}(p_i^{(\text{ИРИ})}, \tau) \Big| p_{j \neq i}^{(\text{ИРИ})} = \text{const}, P^{(\text{ПСИПД})} = \text{const}, \quad (5)$$

где  $F_i^{(1)}$  – вид функциональной зависимости  $\sigma_\tau$  от  $i$ -го параметра сигнала ИРИ при прочих фиксированных параметрах сигнала  $p_{j \neq i}^{(\text{ИРИ})}$  и параметрах ПСИПД  $P^{(\text{ПСИПД})} = \text{const}$ .

Второй аспект состоит в отыскании характера функциональной зависимости точности оценивания взаимного временного сдвига сигналов от параметров ПСИПД при заданных параметрах сигналов:

$$F_k^{(2)} : \sigma_\tau = F_k^{(2)}(p_k^{(\text{ПСИПД})}, \tau) \Big| p_{j \neq k}^{(\text{ПСИПД})} = \text{const}, P^{(\text{ИРИ})} = \text{const}, \quad (6)$$

где  $F_k^{(2)}$  – вид функциональной зависимости  $\sigma_\tau$  от  $k$ -го параметра сигнала ПСИПД при прочих фиксированных параметрах ПСИПД  $p_{j \neq i}^{(\text{ИРИ})}$  и параметрах сигнала  $P^{(\text{ИРИ})} = \text{const}$ .

## СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ В КОМПЛЕКСАХ ОМП ИРИ С СОКРАЩЕНИЕМ ИЗБЫТОЧНОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ В КАНАЛАХ РЕТРАНСЛЯЦИИ

Пусть на интервале наблюдения  $T_{\text{набл}}$  сканирующие широкополосные радиоприемные устройства (ШРПУ) БЛА 1 и БЛА 2 настроены на прием сигналов в одном частотном диапазоне, тогда поступающий на вход ШРПУ  $i$ -го сигнала от ИРИ можно представить в виде

$$\hat{u}_{\text{вх}}^{(i)}(t) = \hat{\mu}^{\text{ИРИ-БЛА}_i}(t) u^{\text{ИРИ}}(t - \tau^{\text{ИРИ-БЛА}_i}) + \hat{\delta}^{\text{БЛА}_i}(t), \quad 0 < t \leq T_{\text{набл}}, \quad (7)$$

где  $u^{(\text{ИРИ})}(t - \tau^{\text{ИРИ-БЛА}_i})$  – сигнал от ИРИ, принятый  $i$ -м БЛА;

$\tau^{(\text{ИРИ-БЛА}_i)}$  – время распространения сигнала от ИРИ до  $i$ -го БЛА;

$K^{(\text{ИРИ-БЛА}_i)}$  – коэффициент ослабления сигнала на трассе распространения от ИРИ до  $i$ -го БЛА;

$\hat{\delta}^{\text{БЛА}_i}(t)$  – ограниченный по полосе аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией  $\sigma^2=1$  в тракте  $i$ -го БЛА.

Рассмотрим содержание этапов преобразования принимаемой смеси (7) в ходе решения задач ОМП ИРИ.

**Этап 1.** На интервале  $T_{\text{набл}}$  специализированным ШРПУ осуществляются прием, усиление и квадратурное преобразование входной смеси (7) с последующим представлением в цифровом виде:

$$\dot{U}_{\langle L \rangle}^{(\text{ШРПУ})} = f_{\text{ШРПУ}}(u_{\text{вх}}^{\text{БЛА}}(t), F_d), \quad (8)$$

где  $\dot{U}_{\langle L \rangle}^{(\text{ШРПУ})}$  – массив комплексных отсчетов с выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП),  $\dot{U}_{\langle L \rangle}^{(\text{ШРПУ})} = \langle \dot{u}_1, \dot{u}_2, \dots, \dot{u}_L \rangle$ ;

$F_d$  – частота дискретизации АЦП;

$L$  – число отсчетов с выхода АЦП на интервале наблюдений,  $L = \lfloor T_{\text{набл}} F_d \rfloor$  (здесь  $\lfloor \cdot \rfloor$  – функция взятия целого числа).

В условиях априорной неопределенности частотных и временных параметров радиосигнала с целью реализации алгоритмов спектрального анализа в скользящем временном окне массив комплексных отсчетов с выхода АЦП формирователем выборок из состава БСА БЛА разбивается на перекрывающиеся сегменты по  $N$  элементов и формируется матрица вида

$$\dot{U}_{[N, H]}^{(\text{ФВ})} = \begin{bmatrix} \dot{u}_1 & \dot{u}_{1+\frac{N}{2}} & \dot{u}_{1+N} & \dots \\ \dot{u}_2 & \dot{u}_{2+\frac{N}{2}} & \dot{u}_{2+N} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{u}_N & \dot{u}_{N+\frac{N}{2}} & \dot{u}_{2N} & \dots \end{bmatrix}, \quad H = \left\lfloor \frac{2L}{N} \right\rfloor + 1, \quad N=2^r, \quad r - \text{целое число}. \quad (9)$$

В целях обеспечения возможности последующей реализации алгоритма поточной фильтрации в спектральной области каждый столбец матрицы (9) поэлементно умножается на элементы весового окна  $W_{\langle N \rangle} = \langle w_n \rangle$  (например, окна Барлетта, Ханна, Блэкмана и др. [7]):

$$\dot{U}_{[N,H]}^{(BO)} = \begin{bmatrix} \dot{u}_1 w_1 & \dot{u}_{1+\frac{N}{2}} w_1 & \dot{u}_{1+N} w_1 & \dots \\ \dot{u}_2 w_2 & \dot{u}_{2+\frac{N}{2}} w_2 & \dot{u}_{2+N} w_2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{u}_N w_N & \dot{u}_{N+\frac{N}{2}} w_N & \dot{u}_{2N} w_N & \dots \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Этап завершается формированием спектрограммы сигнала на интервале наблюдения путем расчета с использованием БПФ матрицы спектральных коэффициентов вида

$$\dot{S}_{[N,H]} = \begin{bmatrix} \dot{s}_{1,1} & \dot{s}_{1,2} & \dot{s}_{1,3} & \dots \\ \dot{s}_{2,1} & \dot{s}_{2,2} & \dot{s}_{2,3} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{s}_{N,1} & \dot{s}_{N,2} & \dot{s}_{N,3} & \dots \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \dot{s}_{1,h} \\ \dot{s}_{2,h} \\ \dots \\ \dot{s}_{N,h} \end{bmatrix} = FFT \left( \begin{bmatrix} \dot{u}_{1,h} \\ \dot{u}_{2,h} \\ \dots \\ \dot{u}_{N,h} \end{bmatrix} \right), \quad (11)$$

где

$$\dot{s}_{n,h} = \sum_{k=0}^{N-1} \dot{u}_{k,h} \cdot \exp\left(j \frac{2\pi nk}{N}\right)$$

– спектральные коэффициенты, рассчитываемые по временным отсчетам анализируемой смеси в  $h$ -м столбце матрицы  $\dot{U}_{[N,K]}^{(BO)}$ .

Необходимо заметить, что вследствие воздействия шумов на выходе входного фильтра и шумов квантования отсчеты  $\dot{s}_n$  содержат случайную составляющую, а задача спектрального анализа носит стохастический характер.

**Этап 2.** С целью выявления энергетически значимых спектральных коэффициентов, подлежащих передаче по каналу связи, осуществляется клиппирование элементов матрицы (11) по правилу

$$\dot{s}_{n,h}^{(клип)} = \begin{cases} \dot{s}_{n,h}, & \text{при } |\dot{s}_{n,h}| \geq \lambda_{n,h}, \\ 0, & \text{при } |\dot{s}_{n,h}| < \lambda_{n,h}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\lambda_{n,h}$  – пороговый уровень для  $n$ -го спектрального коэффициента на  $h$ -м интервале времени.

В частном случае обнаружения сигнала на фоне АБГШ пороговый уровень на всем интервале наблюдения для всех частот одинаков и задается, например, по критерию Неймана – Пирсона. В рамках данного подхода порог обнаружения устанавливается исходя из допустимой вероятности ложной тревоги с учетом закона распределения шумов на выходе блока БПФ схемы обработки в отсутствие сигнала.

Как известно, амплитуда спектральных составляющих шума на выходе  $N$ -точечного БПФ описывается Рэлеевским законом распределения:

$$W_{\hat{\rho}}(\rho) = \frac{\rho}{2N\sigma_{\text{ш}}^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{4N\sigma_{\text{ш}}^4}\right), \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}, \quad \hat{\rho} = \sqrt{\hat{A}^2 + \hat{B}^2},$$

где  $A, B$  – независимые вещественная и мнимая составляющие спектральных коэффициентов, распределенные по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями  $\sigma_A^2$  и  $\sigma_B^2$ ,  $\sigma_A^2 = \sigma_B^2$ .

В соответствии с критерием Неймана – Пирсона порог  $\lambda$  обнаружения сигнала определяется выражением

$$\lambda_{n,h} = \lambda : \int_{\lambda}^{\infty} W_{\rho}(\rho) d\rho \leq P_{\text{лт}}, \quad (14)$$

где  $P_{\text{лт}}$  – допустимое значение вероятности ложной тревоги при обнаружении спектральных составляющих неизвестного сигнала.

В общем случае обнаружения сигнала в условиях сложной РЭО пороговые значения  $\lambda_{n,h}$  могут задаваться адаптивно, исходя из конкретных значений спектральных коэффициентов на интервале наблюдения:

$$\lambda_{n,h} = f_{\text{АП}} \left( \left| \dot{S}_{[N,H]} \right|, P_{\text{АП}} \right), \quad (15)$$

где  $f_{\text{АП}}$  – функция адаптивного формирования порогового уровня;

$\left| S_{[N,H]} \right|$  – массив абсолютных значений элементов матрицы спектральных коэффициентов  $\dot{S}_{[N,H]}$  в окрестности  $h$ -го столбца;

$P_{\text{АП}}$  – параметры функции  $f_{\text{АП}}$ .

Таким образом, отсекаются малозначимые спектральные составляющие, что обеспечивает возможность представления фрагмента спектрограммы на текущем  $h$ -м интервале анализа в формате списка пар значений энергетически значимых спектральных коэффициентов и их номеров:

$$Z_{h, < n_{\text{max}} >} = \{ (n_1, \dot{s}_{n_1,h}^{(\text{клип})}), (n_2, \dot{s}_{n_2,h}^{(\text{клип})}), \dots, (n_{\text{max}}, \dot{s}_{n_{\text{max}},h}^{(\text{клип})}) \}, \quad (16)$$

где  $n_l$  – номер  $l$ -го энергетически значимого спектрального коэффициента.

Именно на данном этапе происходят потери качества представления сигнала. Преобразования данного этапа по своей сути соответствуют этапу устранения малозначимых спектральных составляющих, применяемому в стандартах сжатия изображений с потерями [8].

К особенностям функционирования рассматриваемой системы в условиях ограничений на пропускную способность канала следует указать то, что общее число выявленных энергетически значимых составляющих не должно превышать некоторого максимально допустимого числа. При этом номера и значения таких составляющих гарантированно могут быть переданы по каналу связи с учетом применяемых алгоритмов сжатия без потерь.

**Этап 3.** Список пар значений энергетически значимых спектральных коэффициентов и их номеров (12) подвергается одному из вариантов кодирования с сокращением избыточности представления данных без потерь и передается по каналу связи от БЛА на НПУОД [9]. На этом этапе совместно применяются алгоритмы компрессии данных, обеспечивающие сжатие данных без потерь [9, 10] и протоколы канального кодирования информации, обеспечивающие режим помехоустойчивой передачи сообщений с прямым исправлением ошибок [11].

**Этап 4.** На НПУОД полученные по каналу связи от БЛА1 и БЛА2 данные используются для оценивания взаимной временной задержки сигналов. Для определения временной задержки прихода сигналов необходимо вычислить максимум взаимно-корреляционной функции (ВКФ) сигналов, ретранслированных с соответствующих БЛА, поскольку данный подход применим как для импульсных, так и для непрерывных сигналов:

$$\tau = \arg \max |B(\tau)|, \quad (17)$$

где  $\tau$  – временная задержка, соответствующая параметру положения;

$B(\tau)$  – ВКФ ретранслированных сигналов.

В условиях сложной РЭО БСА ретрансляторов на БЛА, формирующих пространственную базу пеленгования ИРИ, сигнал от одного и того же ИРИ принимается с различным ОСШ, что обусловлено воздействием различных помех на трассе распространения сигнала и дальностью до БЛА:

$$\begin{cases} K^{(\text{ИРИ-БЛА1})} \neq K^{(\text{ИРИ-БЛА2})} \\ \hat{\delta}^{(\text{БЛА1})}(t) \neq \hat{\delta}^{(\text{БЛА2})}(t) \end{cases} \quad (18)$$

В этом случае сформированные в точках размещения БЛА цифровые образы РЭО будут различны, в общем виде их можно представить выражением

$$O_{\text{РЭО } i} = f_{\text{ФО}} \left( \dot{i}_i(t), \left\{ (x_{\text{БЛА}}(t), y_{\text{БЛА}}(t))_j \right\} \right), \quad (19)$$

где  $O_{\text{РЭО } i}$  –  $i$ -й образ РЭО;  
 $\dot{i}_i(t)$  – принимаемый сигнал от  $i$ -го ИРИ;  
 $(x_{\text{БЛА}}(t), y_{\text{БЛА}}(t))_j$  – функция изменения координат  $j$ -го БЛА.

С учетом сказанного переданные от различных БЛА на НПУОД списки энергетически значимых спектральных коэффициентов и их номеров (12) будут различны:  $Z_{h, <n_{\text{max}}>}^{\text{БЛА1}} \neq Z_{h, <n_{\text{max}}>}^{\text{БЛА2}}$ .

В указанном случае задача оценивания взаимной временной задержки сигналов (17) производится для спектральных коэффициентов, являющихся общими для цифровых образов РЭО, ретранслированных с различных БЛА.

Возможны два варианта оценивания ВКФ сигналов: первый – в спектральной области непосредственно с использованием переданных спектральных коэффициентов и второй – во временной области после восстановления сигнала на интервале наблюдения с использованием обратного БПФ (рис. 2).

В качестве исходных данных на каждом интервале наблюдения  $T_{\text{набл}}$  используются спектральные коэффициенты  $\dot{s}_n$ ,  $[n = 1(1)N]$  (12), которые можно представить в комплексном виде как

$$\dot{s}_n = A_n \exp(j\varphi_n), [n = 1(1)N], \quad (20)$$

где  $A_n$  – амплитуда  $n$ -й спектральной составляющей,  $A_n = |\dot{s}_n| = \sqrt{\text{Re}(\dot{s}_n)^2 + \text{Im}(\dot{s}_n)^2}$ ;

$\varphi_n$  – фаза  $n$ -й спектральной составляющей,  $\varphi_n = -\arctg \frac{\text{Im}(\dot{s}_n)}{\text{Re}(\dot{s}_n)}$ .

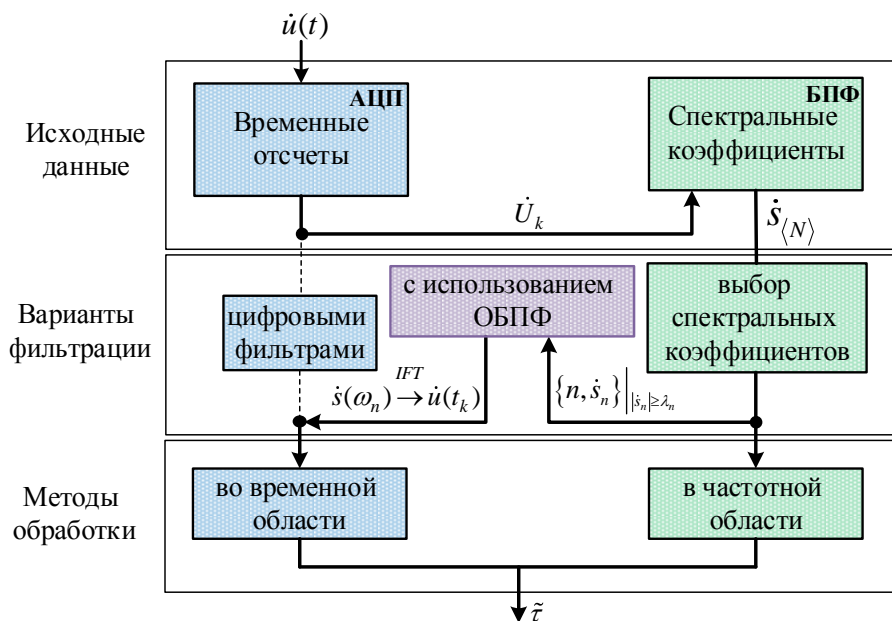


Рис. 2. Варианты обработки цифровых данных, где  $IFT$  – обратное преобразование Фурье;  $\dot{s}(\omega)$  – спектральная функция сигнала  $\dot{i}(t)$

По *первому варианту* в основе оценивания взаимной задержки сигналов лежит тот факт, что смещение сигнала во времени ведет к линейному набегу фазы спектральных составляющих. При преобразовании принимаемой смеси (7), применительно к решаемой задаче, должна быть реализована процедура оценивания знака и приращения скорости фазы обнаруженного сигнала. Данное положение можно пояснить следующим утверждением.

Пусть  $\overset{FT}{i_1(t)} \rightarrow \dot{s}_1(\omega)$ ,  $\varphi_1(\omega) = \arg(\dot{s}_1(\omega))$  и  $\overset{FT}{i_2(t)} \rightarrow \dot{s}_2(\omega)$ ,  $\varphi_2(\omega) = \arg(\dot{s}_2(\omega))$ , где  $FT$  – преобразование Фурье. Тогда при условии, что  $i_2(t) = i_1(t - \tau)$ , где знак « $\leftarrow$ » обозначает циклический сдвиг во времени, имеет место равенство

$$\varphi_2(\omega) = \varphi_1(\omega) - \omega\tau \bmod 2\pi. \quad (21)$$

В этом случае задержка определяется как значение  $\tau$ , обращающее выражение (20) в тождество. Непосредственно решать уравнение вида

$$\omega\tau = \varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega) \bmod 2\pi \quad (22)$$

относительно  $\tau$  с учетом модульного преобразования вычислительно затратно. Однако, учитывая, что зависимость разности фаз от частоты удобно представлять с использованием единичной окружности на комплексной плоскости в виде  $\dot{z}(\omega) = \exp(j(\varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega)))$ , величина задержки может быть оценена по положению максимума модуля результата обратного преобразования Фурье от  $\dot{z}(\omega)$ :

$$\tau : \arg \max |\dot{b}(\tau')|, \quad \dot{b}(\tau') = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{z}(\omega) \exp(j2\pi\omega\tau') dt'. \quad (23)$$

По *второму варианту* оценивание взаимной задержки осуществляется по положению максимума модуля ВКФ восстановленных сигналов [5]:

$$\tau : \arg \max |\dot{B}(\tau')|, \quad \dot{B}(\tau') = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \dot{i}_{(\text{восст})}^{(\text{БЛА}1)}(t - \tau') \dot{i}_{(\text{восст})}^{(\text{БЛА}2)}(t) dt, \quad (24)$$

где  $\dot{i}_{(\text{восст})}^{(\text{БЛА})}(t)$  – восстановленный комплексный сигнал на интервале наблюдения  $T$  по методике, изложенной в работе [5];

$\tau$  – величина задержки распространения второго сигнала относительно первого.

Следует обратить внимание, что реализация алгоритма оценивания задержки по фазовым составляющим спектра не требует передачи по каналу связи данных об амплитуде спектральных составляющих, что снижает нагрузку на канал «БЛА-НПУОД» в два раза.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью получения рабочих характеристик функционирования бортовой специальной аппаратуры ретрансляторов на БЛА комплексов ОМП ИРИ в условиях ограничений на пропускную способность каналов ретрансляции проведено имитационное моделирование в среде Matlab, реализующее рассмотренные этапы обработки сигналов.

В качестве тестовых сигналов выбраны сигналы единичной мощности с параметрами, указанными в табл. 1.

Моделирование проводилось на частоте дискретизации 100 МГц. Для каждого БЛА был сформирован свой АБГШ. Величина взаимной задержки сигналов  $\tau_{\text{зад}}$  изменялась в диапазоне от 0 до  $\tau_{\text{имп}}$  тестовых сигналов, ОСШ на входе БСА БЛА  $q_{\text{вх}}^{\text{БЛА}}$  изменялось в диапазоне от 5 до 20 дБ с шагом 0,5 дБ. Для каждого значения ОСШ была проведена серия из 1000 независимых испытаний.



Таблица 1

### Параметры сигналов при моделировании

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Значение
<b>Варьируемые параметры</b>			
1	Размер БПФ	$N_{\text{БПФ}}$	256, 512; 1024; 2048; 4096; 8192
<b>Параметры тестового сигнала №1</b>			
2	Скорость ППРЧ, скачков/сек	$F_{\text{ППРЧ}}$	100
3	Шаг сетки частот, кГц	$\Delta F$	25
4	Кратность фазовой манипуляции сигнала	$M$	2
5	Модуляционная скорость, бод	$F_b$	19200
<b>Параметры тестового сигнала №2</b>			
6	Скорость ППРЧ, скачков/сек	$F_{\text{ППРЧ}}$	20000
7	Шаг сетки частот, кГц	$\Delta F$	25
8	Кратность частотной манипуляции в режиме «быстрой» ППРЧ	$M$	8

В ходе проведения численных экспериментов порог клиппирования спектральных составляющих задавался по уровню, соответствующему порогу обнаружения сигнала с неизвестной частотой в спектральной области, обеспечивающему вероятность ложной тревоги на уровне не выше  $10^{-5}$ .

В табл. 2 приведены результаты расчета ширины частотного канала БПФ при различных значениях  $N_{\text{БПФ}}$ .

Таблица 2

### Ширина частотного канала БПФ

$N_{\text{БПФ}}$	256	512	1024	2048	4096	8192
Ширина частотного канала, Гц	390 625	195 312	97 656	48 828	24 414	12 212

Сравнение данных табл. 1 и 2 свидетельствует, что при заданной частоте дискретизации детализация спектра исследуемого сигнала в виде нескольких спектральных составляющих обеспечивается при  $N_{\text{БПФ}} > 2048$ . При меньших значениях  $N_{\text{БПФ}}$  ширина спектра сигнала не превышает ширину частотного канала БПФ, что ведет к тому, что расщепление спектра сигнала на несколько спектральных составляющих в ходе спектрального анализа носит вероятностный характер.

На рис. 3 и 4 представлены результаты оценивания взаимной задержки ретранслированных сигналов во временной (24) и в частотной (23) областях для тестовых сигналов № 1 и 2 соответственно.

Для сравнения на рис. 3 и 4 представлена зависимость потенциальной точности оценивания задержки, полученная в соответствии с выражением (4).

Из анализа данных, представленных на рис. 3 и 4, следует, что при оценке взаимной задержки ретранслированных сигналов по мере увеличения размера БПФ  $\sigma_\tau$  уменьшается. Увеличение  $N_{\text{БПФ}}$  приближает значение  $\sigma_\tau$  к предельному значению, но в практической задаче в условиях сложной РЭО при увеличении  $N_{\text{БПФ}}$  возрастает вероятность попадания на интервал анализа двух сигналов, что приведет к получению недостоверных данных о параметрах РЭО.

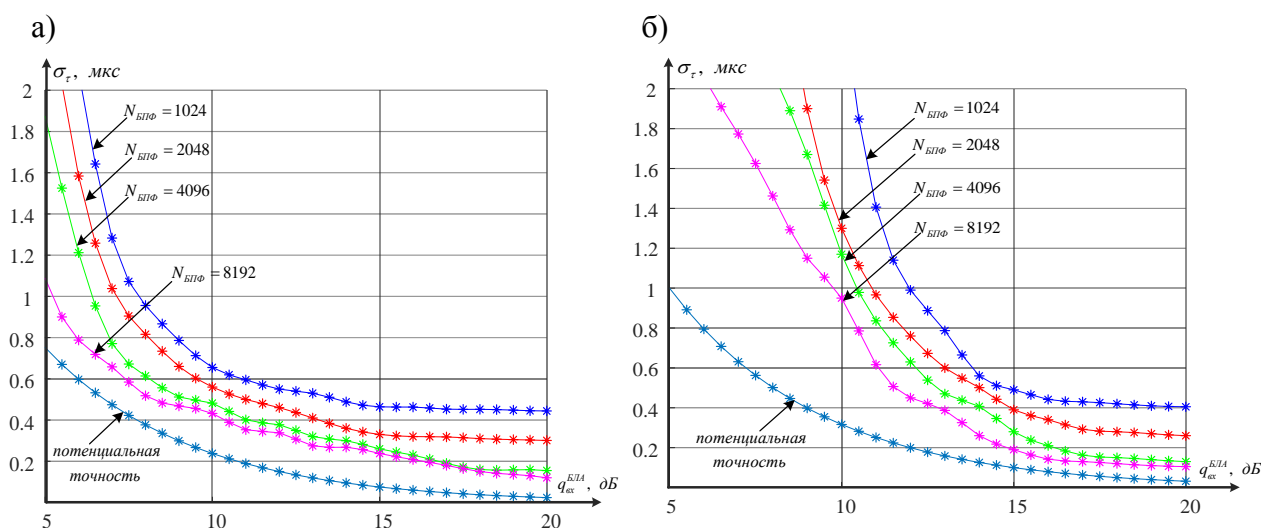


Рис. 3. Графики зависимости  $\sigma_\tau$  ретранслированных сигналов от ОСШ для различных значений  $N_{\text{БПФ}}$  при обработке во временной области:  
а – тестовый сигнал № 1; б – тестовый сигнал № 2

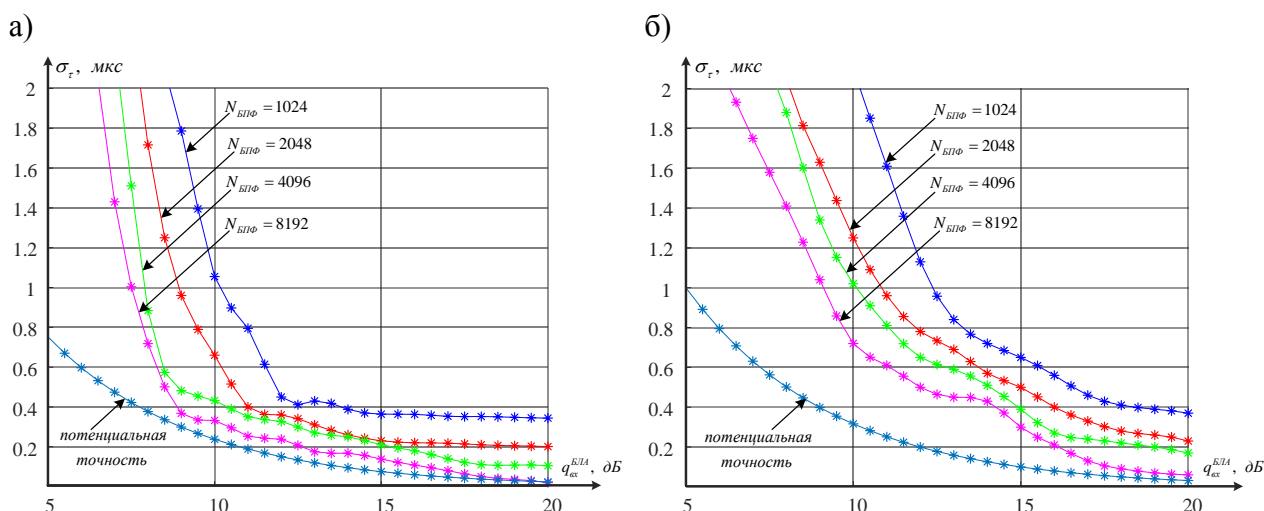


Рис. 4. Графики зависимости  $\sigma_\tau$  ретранслированных сигналов от ОСШ для различных значений  $N_{\text{БПФ}}$  при обработке в частотной области:  
а – тестовый сигнал № 1; б – тестовый сигнал № 2

Результаты исследования точности оценивания временной задержки в частотной области свидетельствуют о наличии порогового эффекта. В ходе снижения ОСШ при достижении некоторого порогового значения наблюдается резкое снижение точности оценивания взаимной временной задержки, выражающееся в резком росте СКО  $\sigma_\tau$ . Это явление обусловлено нелинейным эффектом от использования только фазовых составляющих комплексного спектра при малых значениях ОСШ.

Согласно методике, изложенной в работе [12], произведен расчет доверительного интервала оценок  $\sigma_\tau$  для доверительной вероятности 0,95. В качестве примера на рис. 5 изображены доверительные границы зависимости  $\sigma_\tau$  от ОСШ при  $N_{\text{БПФ}} = 2048$  для тестового сигнала № 2.

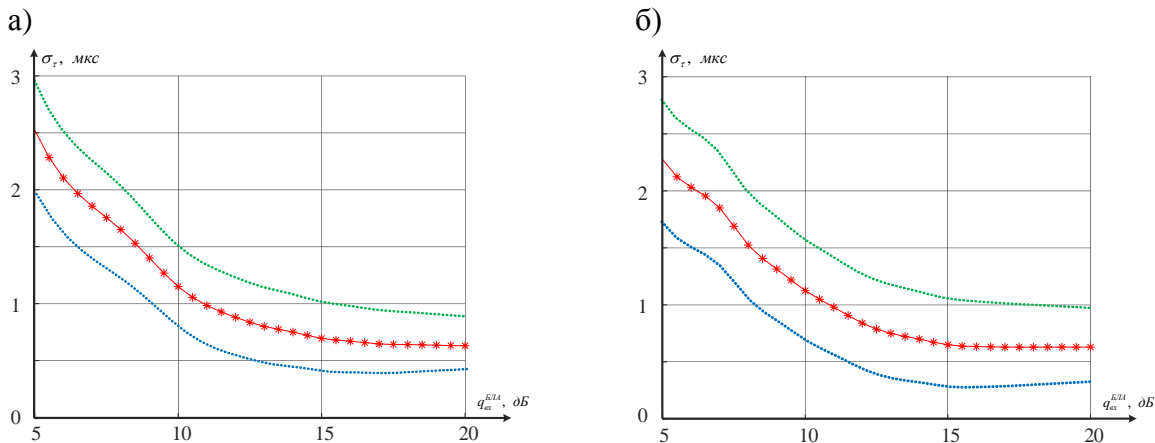


Рис. 5. Графики зависимости СКО временной задержки от ОСШ при  $N_{\text{БПФ}} = 2048$ :  
а – во временной области; б – в частотной области

На рис. 6 представлены графики зависимости  $\sigma_\tau$  от  $\tau_{\text{зад}}$  при фиксированном ОСШ и различных значениях  $N_{\text{БПФ}}$ .

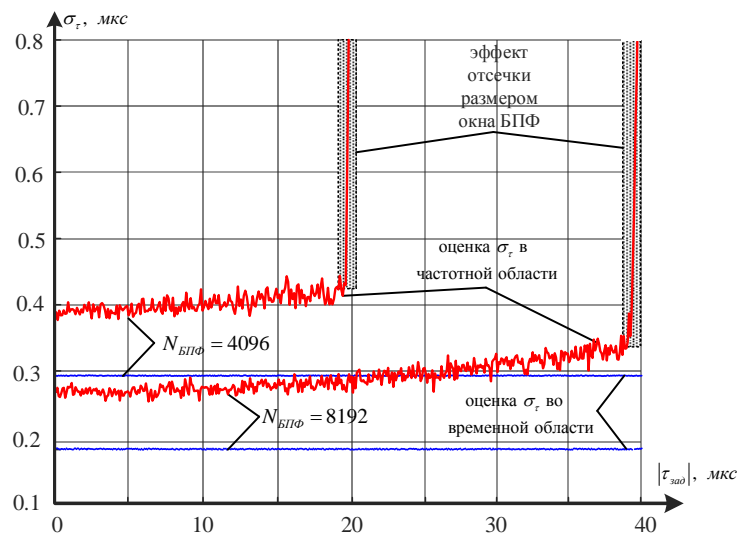


Рис. 6. Графики зависимости  $\sigma_\tau$  от  $\tau_{\text{зад}}$  при  $q_{\text{ex}}^{\text{БЛА}} = 15$  дБ и различных  $N_{\text{БПФ}}$   
для тестового сигнала № 2

Следует обратить внимание на эффект, обусловленный тем, что область оценивания временной задержки в частотной области ограничена примерно половиной временного окна преобразования Фурье. При значениях  $\tau_{\text{зад}}$ , превышающих интервал, на котором выполняется преобразование Фурье, оценивание задержки в частотной области невозможно.

Из анализа данных, показанных на рис. 6, следует, что при увеличении абсолютного значения взаимной задержки ретранслированных сигналов, точность оценивания задержки в частотной области снижается даже при больших значениях ОСШ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанной модели сокращения избыточности представления цифровых данных с потерями клиппированием спектральных коэффициентов БПФ в скользящем вре-

менном окне исследована взаимосвязь основных параметров БСА БЛА, обеспечивающих сокращение избыточности представления данных при выполнении задач ОМП ИРИ.

Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что применение предлагаемого подхода к устранению избыточности представления цифрового образа РЭО обеспечивает выполнение задач ОМП ИРИ в части касающейся оценивания взаимной временной задержки радиосигналов. Так, в заданном диапазоне значений параметров (см. табл. 1) при значении ОСШ на входе БСА БЛА, равном более 10 дБ, СКО временной задержки составляет не более 0,3 мкс.

В рамках первого аспекта (5) надо отметить, что в условиях априорной неопределенности относительно несущей частоты и ширины спектра радиосигналов на первом этапе целесообразно проводить оценивание РЭО во временной области с целью подбора параметров БСА, реализующей предлагаемые этапы преобразования сигналов. В последующем возможно применение алгоритмов оценивания параметров радиосигналов в частотной области. Так, при оценке взаимной задержки ретранслированных сигналов в частотной области выбор  $N_{\text{БПФ}}$  следует производить из условия, при котором  $\tau$  не превышает половины временного окна БПФ.

Ценность использования алгоритмов оценивания параметров радиосигналов в частотной области состоит в сокращении объема передаваемых данных. Так, после отбора значимых спектральных составляющих в БСА БЛА по каналу ретрансляции можно передавать только значения их фаз.

В рамках второго аспекта (6) следует отметить, что, с одной стороны, с увеличением  $N_{\text{БПФ}}$   $\sigma_{\tau}$  уменьшается и приближается к предельному значению, с другой стороны, выбор достаточно большого  $N_{\text{БПФ}}$  может привести к попаданию на интервал анализа двух и более сигналов, а малый  $N_{\text{БПФ}}$  не обеспечивает необходимой детализации спектра исследуемого сигнала. С учетом этого выбор размера БПФ должен определяться компромиссом между шириной спектра исследуемого сигнала и взаимной задержкой ретранслированных сигналов.

Проведенные исследования значимы для разработки предложений по техническому облику БСА ретрансляторов на БЛА в системе ОМП ИРИ.

### Список используемых источников

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / под ред. А.М. Рембовского. – 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 624 с.
2. Овчаренко К.Л. Определение координат источников радиоизлучения дальномерным методом на базе однопозиционного подвижного измерителя // Телекоммуникации. – 2013. – № 10. – С. 27–34.
3. Царик Д.В., Клишин А.В., Петров А.Ю. Определение координат ИРИ разностно-дальномерным методом с использованием двух БЛА // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 7. – С. 39–42.
4. Наумов А.С., Елизаров В.В. Определение координат ИРИ при пеленговании с летно-подъемного средства // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 7. – С. 56–61.
5. Научно-практический подход к сокращению избыточности представления данных в каналах ретрансляции комплексов радиомониторинга с подвижными ретрансляторами на беспилотных летательных аппаратах / А.С. Босый [и др.] // Радиотехника. – 2020. – Вып. 5 (10). – С. 31–42.
6. Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений / Р.В. Волков [и др.]; под ред. Р.В. Волкова: учеб. пособие. – СПб.: ВАС, 2013. – 116 с.

7. *Марпл-мл. С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

8. *Тропченко А.Ю., Тропченко А.А.* Методы сжатия изображений, аудиосигналов и видео: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 108 с.

9. *Чиров Д.С., Лобов Е.М.* Выбор сигнально-кодовой конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 10. – С. 21–28.

10. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин [и др.]. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2003. – 384 с.

11. *Локишин Б.А.* Сравнение видов модуляции в наземном цифровом вещании // Теле-Спутник: журн. – 2001. – № 3 (65).

12. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.

В.М. Маринин;  
 Р.Р. Саниев;  
 К.В. Семенов,  
*доктор техн. наук;*  
 С.С. Семенюк,  
*кандидат техн. наук*

## МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ СПУТНИКА-РЕТРАНСЛЯТОРА ПО СИГНАЛАМ ТРЕХ РЕПЕРНЫХ СТАНЦИЙ

Представлена аналитическая модель определения вектора скорости. Разработана имитационная модель оценивания вектора скорости спутника-ретранслятора по сигналам трех реперных станций. Получены результаты среднеквадратической ошибки оценивания модуля вектора скорости в зависимости от направления движения спутника-ретранслятора относительно системы реперных станций.

Ключевые слова: спутник-ретранслятор, реперная станция, определение местоположения, вектор скорости, доплеровское смещение частоты.

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из важнейших задач, решаемых государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ), состоит в определении местоположения источников радиоизлучений (ИРИ), незаконно использующих частотный ресурс спутников-ретрансляторов (СР). При определении координат ИРИ по ретранслированному сигналу могут применяться методы, рассмотренные в работах [1, 2]. Качество решения координатометрической задачи всеми методами зависит от точности определения параметров движения СР в момент ретрансляции.

Для решения данной задачи может использоваться система реперных станций (РС), излучающих сигнал на СР (рис. 1).

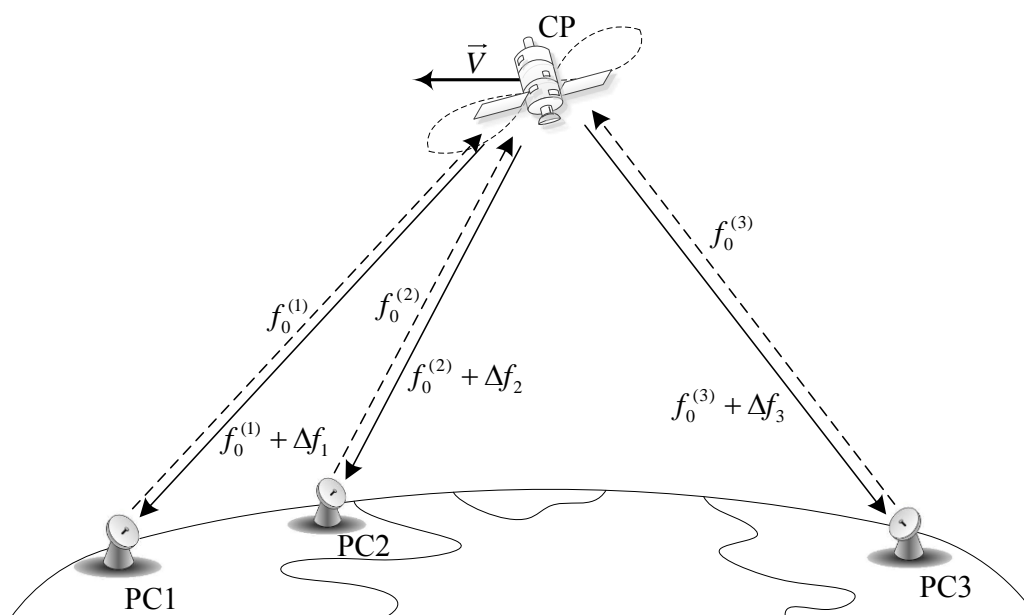


Рис. 1. Схема применения метода определения вектора скорости с помощью трех РС

По принимаемым сигналам определяются координаты СР дальномерным или суммарно-дальномерным методом. Однако для определения местоположения ИРИ разностно-доплеровским методом [3] кроме знания координат необходимо знать значение вектора скорости СР в момент ретрансляции. В этом случае вектор скорости СР может быть определен в момент ретрансляции доплеровским методом путем измерения доплеровского смещения частоты РС, ретранслированных СР.

В силу того что величина доплеровского смещения частоты зависит от угла между вектором скорости движущегося объекта и направлением на источник излучения, величина ошибки измерения скорости СР может отличаться в зависимости от взаимного размещения элементов системы РС и направления движения СР.

С целью исследования характера ошибок оценивания вектора скорости СР, в зависимости от его направления движения относительно системы реперных станций, разработана модель оценивания вектора скорости СР по сигналам трех РС.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть сигналы реперных станций ретранслируются спутником-ретранслятором в один и тот же момент времени при заданных параметрах. К таким параметрам относятся:

- координаты точки размещения  $i$ -й реперной станции –  $R_i(x_i; y_i; z_i)$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;
- координаты спутника-ретранслятора –  $S(x^{(s)}; y^{(s)}; z^{(s)})$ ;
- доплеровское смещение частоты сигнала  $i$ -й РС, ретранслированного спутником-ретранслятором, –  $\Delta f_i$ ;
- частота излучения сигнала земной станцией –  $f_0$ .

Скорость СР определяется вектором  $\overline{SE}$ , начало которого соответствует точке расположения СР в пространстве в момент ретрансляции сигнала (рис. 2,а). Радиальные скорости движения СР относительно реперных станций характеризуются векторами  $\overline{SC}_1, \overline{SC}_2, \overline{SC}_3$  и представляют собой проекции вектора  $\overline{SE}$  на отрезки  $SR_1, SR_2, SR_3$ .

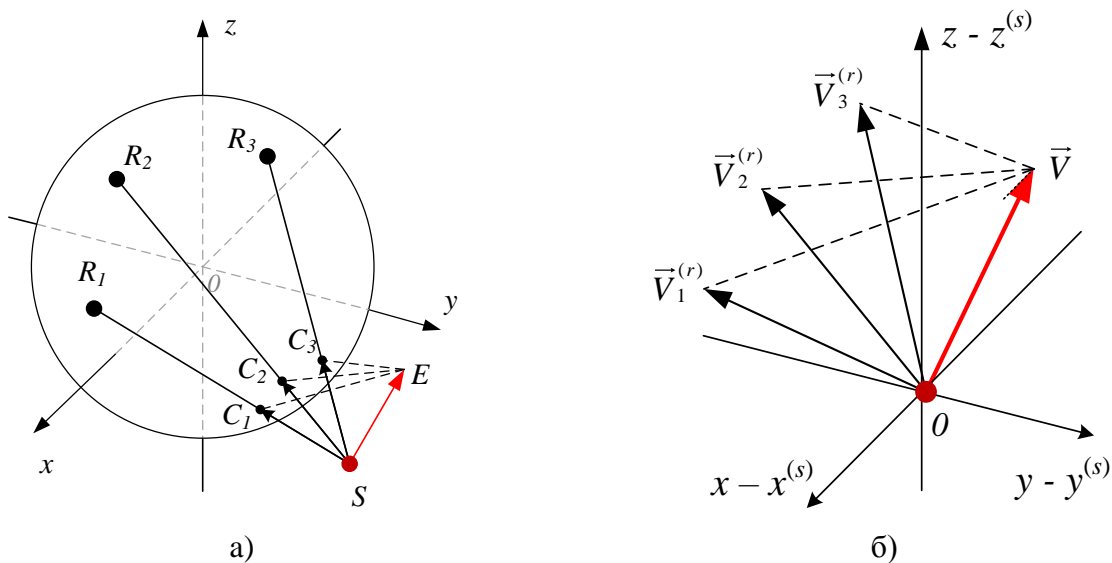


Рис. 2. Иллюстрация вектора скорости и векторов радиальных скоростей

Пусть имеет место декартова система координат, начало которой соответствует точке  $S$  в момент ретрансляции, как показано на рис. 2,б. На основе представленных исходных данных требуется аналитически определить вектор скорости СР  $\vec{V} = \langle x^{(v)}, y^{(v)}, z^{(v)} \rangle$ , получаемый пу-

тем параллельного переноса вектора  $\overline{SE}$  в начало координат и определяемый векторами радиальных скоростей  $\overline{V}_1^{(r)} = \langle x_1^{(r)}, y_1^{(r)}, z_1^{(r)} \rangle$ ,  $\overline{V}_2^{(r)} = \langle x_2^{(r)}, y_2^{(r)}, z_2^{(r)} \rangle$  и  $\overline{V}_3^{(r)} = \langle x_3^{(r)}, y_3^{(r)}, z_3^{(r)} \rangle$ . Указанные векторы радиальных скоростей могут быть получены параллельным переносом векторов  $\overline{SC}_1$ ,  $\overline{SC}_2$ ,  $\overline{SC}_3$  в начало координат.

В условиях аддитивного гауссова шума при приеме сигнала РС, ретранслированного СР, оценка доплеровского смещения имеет и может быть представлена выражением вида

$$\Delta f_i = \Delta f_i + \Delta \hat{f}_i^{(\text{ош})}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $\Delta f_i$  – истинное доплеровское смещение частоты ретранслированного сигнала  $i$ -й РС;

$\Delta \hat{f}_i^{(\text{ош})}$  – ошибка измерения доплеровского смещения частоты сигнала  $i$ -й РС.

Тогда искомым вектор скорости также будет иметь оценочный характер:  $\tilde{\vec{V}} = \langle \tilde{x}^{(v)}, \tilde{y}^{(v)}, \tilde{z}^{(v)} \rangle$ . В силу этого будут иметь место следующие ошибки.

1. Ошибка оценивания вектора скорости

$$\Delta v_{\text{ош}} = \sqrt{(\tilde{x}^{(v)} - x^{(v)})^2 + (\tilde{y}^{(v)} - y^{(v)})^2 + (\tilde{z}^{(v)} - z^{(v)})^2}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

характеризуемая среднеквадратической ошибкой (СКО) –  $\sigma_v$ .

2. Ошибка оценивания модуля вектора скорости

$$\Delta m_{\text{ош}} = |\tilde{V}| - |\vec{V}|, \quad (3)$$

характеризуемая среднеквадратической ошибкой –  $\sigma_m$ .

3. Ошибка оценивания направления вектора скорости

$$\Delta \varphi_{\text{ош}} = \frac{\tilde{\vec{V}} \cdot \vec{V}}{|\tilde{\vec{V}}| \cdot |\vec{V}|}, \quad (4)$$

характеризуемая среднеквадратической ошибкой –  $\sigma_\varphi$ .

Путем имитационного моделирования требуется оценить изменение параметров  $\sigma_v$ ,  $\sigma_m$  и  $\sigma_\varphi$  в зависимости от положения вектора скорости относительно реперных станций.

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ

Определим вектор радиальной скорости  $\overline{V}_i^{(r)}$  для каждого из направлений на РС, воспользовавшись выражением определения доплеровского смещения частоты

$$\Delta f_i = \frac{|\overline{V}_i^{(r)}| \cdot f_0}{c}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Тогда для каждого направления модули векторов радиальных скоростей могут быть определены по формуле вида

$$|\overline{V}_i^{(r)}| = \frac{c \cdot \Delta f_i}{f_0}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

По формуле расстояния между двумя координатами в декартовой системе координат вычислим расстояние между СР и каждой из РС [4]:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (7)$$

Определим координаты точек  $C_i(x_i^{(c)}, y_i^{(c)}, z_i^{(c)})$ , воспользовавшись формулой для нахождения координат точки, делящей отрезок в заданном отношении в пространстве,

$$L_i = \frac{|\overline{SC}_i|}{d_i - |\overline{SC}_i|}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (8)$$



где  $L_i$  – некоторое положительное действительное число, характеризующее соотношение модуля вектора радиальной скорости и расстояния между РС и точкой проекции вектора скорости  $\vec{V}$  на отрезки  $SR_1, SR_2, SR_3$  (рис. 2,б).

Тогда координаты точек  $C_i(x_i^{(c)}, y_i^{(c)}, z_i^{(c)})$  могут быть определены по формулам:

$$x_i^{(c)} = \frac{x^{(s)} + L_i \cdot x_i}{1 + L_i}; y_i^{(c)} = \frac{y^{(s)} + L_i \cdot y_i}{1 + L_i}; z_i^{(c)} = \frac{z^{(s)} + L_i \cdot z_i}{1 + L_i}, i = 1, 2, 3. \quad (9)$$

С учетом определения проекции одного вектора на другой выражение для модуля радиальной скорости можно представить в виде

$$\frac{c \cdot \Delta f_i}{f_0} = \frac{\vec{V}_i^{(r)} \cdot \vec{V}}{|\vec{V}_i^{(r)}|}, i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Исходя из определения параллельного переноса векторов в пространстве, координаты векторов  $\vec{V}_i^{(r)}$  и  $\vec{V}$  могут быть определены по формулам:

$$\begin{aligned} x_i^{(r)} &= x_i^{(c)} - x^{(s)}; y_i^{(r)} = y_i^{(c)} - y^{(s)}; z_i^{(r)} = z_i^{(c)} - z^{(s)}, i = 1, 2, 3; \\ x^{(v)} &= x^{(e)} - x^{(s)}; y^{(v)} = y^{(e)} - y^{(s)}; z^{(v)} = z^{(e)} - z^{(s)}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $x^{(e)}, y^{(e)}, z^{(e)}$  – координаты точки  $E$  (рис. 2,а).

На основе выражений (10) и (11) может быть составлена система уравнений, имеющая вид

$$\begin{cases} \frac{(x_1^{(c)} - x^{(s)}) \cdot (x^{(e)} - x^{(s)}) + (y_1^{(c)} - y^{(s)}) \cdot (y^{(e)} - y^{(s)}) + (z_1^{(c)} - z^{(s)}) \cdot (z^{(e)} - z^{(s)})}{\sqrt{(x_1^{(c)} - x^{(s)})^2 + (y_1^{(c)} - y^{(s)})^2 + (z_1^{(c)} - z^{(s)})^2}} = \frac{c \cdot \Delta f_1}{f_0}; \\ \frac{(x_2^{(c)} - x^{(s)}) \cdot (x^{(e)} - x^{(s)}) + (y_2^{(c)} - y^{(s)}) \cdot (y^{(e)} - y^{(s)}) + (z_2^{(c)} - z^{(s)}) \cdot (z^{(e)} - z^{(s)})}{\sqrt{(x_2^{(c)} - x^{(s)})^2 + (y_2^{(c)} - y^{(s)})^2 + (z_2^{(c)} - z^{(s)})^2}} = \frac{c \cdot \Delta f_2}{f_0}; \\ \frac{(x_3^{(c)} - x^{(s)}) \cdot (x^{(e)} - x^{(s)}) + (y_3^{(c)} - y^{(s)}) \cdot (y^{(e)} - y^{(s)}) + (z_3^{(c)} - z^{(s)}) \cdot (z^{(e)} - z^{(s)})}{\sqrt{(x_3^{(c)} - x^{(s)})^2 + (y_3^{(c)} - y^{(s)})^2 + (z_3^{(c)} - z^{(s)})^2}} = \frac{c \cdot \Delta f_3}{f_0}. \end{cases} \quad (12)$$

В результате решения данной системы могут быть найдены координаты точки  $E(x^{(e)}, y^{(e)}, z^{(e)})$ .

Для решения системы уравнений (12) воспользуемся методом Крамера [5]. Для этого упростим каждое уравнение в системе (12), т. е. перенесем все свободные члены в правую сторону, в результате чего получим систему вида

$$\begin{cases} (x_1^{(c)} - x^{(s)}) \cdot x^{(e)} + (y_1^{(c)} - y^{(s)}) \cdot y^{(e)} + (z_1^{(c)} - z^{(s)}) \cdot z^{(e)} = k_1; \\ (x_2^{(c)} - x^{(s)}) \cdot x^{(e)} + (y_2^{(c)} - y^{(s)}) \cdot y^{(e)} + (z_2^{(c)} - z^{(s)}) \cdot z^{(e)} = k_2; \\ (x_3^{(c)} - x^{(s)}) \cdot x^{(e)} + (y_3^{(c)} - y^{(s)}) \cdot y^{(e)} + (z_3^{(c)} - z^{(s)}) \cdot z^{(e)} = k_3, \end{cases} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} k_1 &= \left( \frac{c \cdot \Delta f_1}{f_0} \right)^2 + (x_1^{(c)} - x^{(s)}) \cdot x^{(s)} + (y_1^{(c)} - y^{(s)}) \cdot y^{(s)} + (z_1^{(c)} - z^{(s)}) \cdot z^{(s)}; \\ k_2 &= \left( \frac{c \cdot \Delta f_2}{f_0} \right)^2 + (x_2^{(c)} - x^{(s)}) \cdot x^{(s)} + (y_2^{(c)} - y^{(s)}) \cdot y^{(s)} + (z_2^{(c)} - z^{(s)}) \cdot z^{(s)}; \\ k_3 &= \left( \frac{c \cdot \Delta f_3}{f_0} \right)^2 + (x_3^{(c)} - x^{(s)}) \cdot x^{(s)} + (y_3^{(c)} - y^{(s)}) \cdot y^{(s)} + (z_3^{(c)} - z^{(s)}) \cdot z^{(s)}. \end{aligned}$$

Для решения данной системы линейных алгебраических уравнений (8) необходимо составить основную матрицу  $\mathbf{A}$  системы, элементами которой являются коэффициенты при неизвестных переменных, а также матрицу столбец  $\mathbf{B}$  свободных членов.

Матрица системы  $\mathbf{A}$  и матрица столбец свободных членов  $\mathbf{B}$  примут вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^{(c)} - x^{(s)} & y_1^{(c)} - y^{(s)} & z_1^{(c)} - z^{(s)} \\ x_2^{(c)} - x^{(s)} & y_2^{(c)} - y^{(s)} & z_2^{(c)} - z^{(s)} \\ x_3^{(c)} - x^{(s)} & y_3^{(c)} - y^{(s)} & z_3^{(c)} - z^{(s)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Будем считать, что матрица  $\mathbf{A}$  – невырожденная, т. е. ее определитель отличен от нуля. В этом случае система линейных алгебраических уравнений имеет единственное решение, которое может быть найдено методом Крамера. Тогда координаты точки  $E(x^{(e)}, y^{(e)}, z^{(e)})$  могут быть найдены по формулам:

$$x^{(e)} = \frac{\det(\mathbf{A}_x)}{\det(\mathbf{A})}; \quad y^{(e)} = \frac{\det(\mathbf{A}_y)}{\det(\mathbf{A})}; \quad z^{(e)} = \frac{\det(\mathbf{A}_z)}{\det(\mathbf{A})}, \quad (15)$$

где  $\det(\cdot)$  – операция вычисления определителя матрицы, а

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} k_1 & y_1^{(c)} - y^{(e)} & z_1^{(c)} - z^{(e)} \\ k_2 & y_2^{(c)} - y^{(e)} & z_2^{(c)} - z^{(e)} \\ k_3 & y_3^{(c)} - y^{(e)} & z_3^{(c)} - z^{(e)} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_y = \begin{bmatrix} x_1^{(c)} - x^{(e)} & k_1 & z_1^{(c)} - z^{(e)} \\ x_2^{(c)} - x^{(e)} & k_2 & z_2^{(c)} - z^{(e)} \\ x_3^{(c)} - x^{(e)} & k_3 & z_3^{(c)} - z^{(e)} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} x_1^{(c)} - x^{(e)} & y_1^{(c)} - y^{(e)} & k_1 \\ x_2^{(c)} - x^{(e)} & y_2^{(c)} - y^{(e)} & k_2 \\ x_3^{(c)} - x^{(e)} & y_3^{(c)} - y^{(e)} & k_3 \end{bmatrix}.$$

Координаты точки  $E(x^{(e)}, y^{(e)}, z^{(e)})$  позволяют вычислить координаты вектора скорости  $\vec{V} = \langle x^{(v)}, y^{(v)}, z^{(v)} \rangle$  по формуле (11).

## СТРУКТУРА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Представленная аналитическая модель расчета вектора скорости  $\vec{V}$  стала основой для разработки имитационной модели оценивания  $\sigma_m$  в зависимости от направления движения СР относительно реперных станций. Структура модели представлена на рис. 3.

Предусмотрено два режима, отличающихся вариантами исходных данных:

- моделирование движения существующих СР и размещения РС на поверхности Земли с учетом пространственно-временной доступности РС к СР;
- имитация произвольного взаимного размещения РС и СР, а также расчета скорости СР в зависимости от высоты орбиты.

В первом случае с использованием параметров орбиты формата TLE (two line elements) рассчитываются координаты  $S(x^{(s)}; y^{(s)}; z^{(s)})$  и вектор скорости  $\vec{V}$  реально существующих СР, РС размещаются на поверхности Земли, выбираются моменты пространственно-временной доступности РС к СР.

Во втором случае формируется произвольная геометрическая конфигурация взаимного размещения РС и СР, рассчитывается скорость СР, соответствующая его высоте. При этом следует учитывать, что расстояние между РС выбирается с учетом размеров зоны радиовидимости СР.

После формирования исходных данных осуществляется расчет истинных радиальных скоростей  $\vec{V}_i^{(r)}$ , расчет значений доплеровского смещения частоты  $\Delta f_i$  (5) сигнала каждой РС и заданной частоты излучения. Далее проводятся испытания, каждое из которых представляет собой внесение ошибок  $\Delta \hat{f}_i^{(ош)}$  в полученные значения доплеровского смещения частоты  $\Delta f_i$  и расчете оценки вектора скорости  $\vec{V}$  в соответствии с представленной аналитической моделью. По результатам проведенных испытаний осуществляется расчет СКО модуля  $\sigma_m$  и направления вектора скорости  $\sigma_\phi$ .

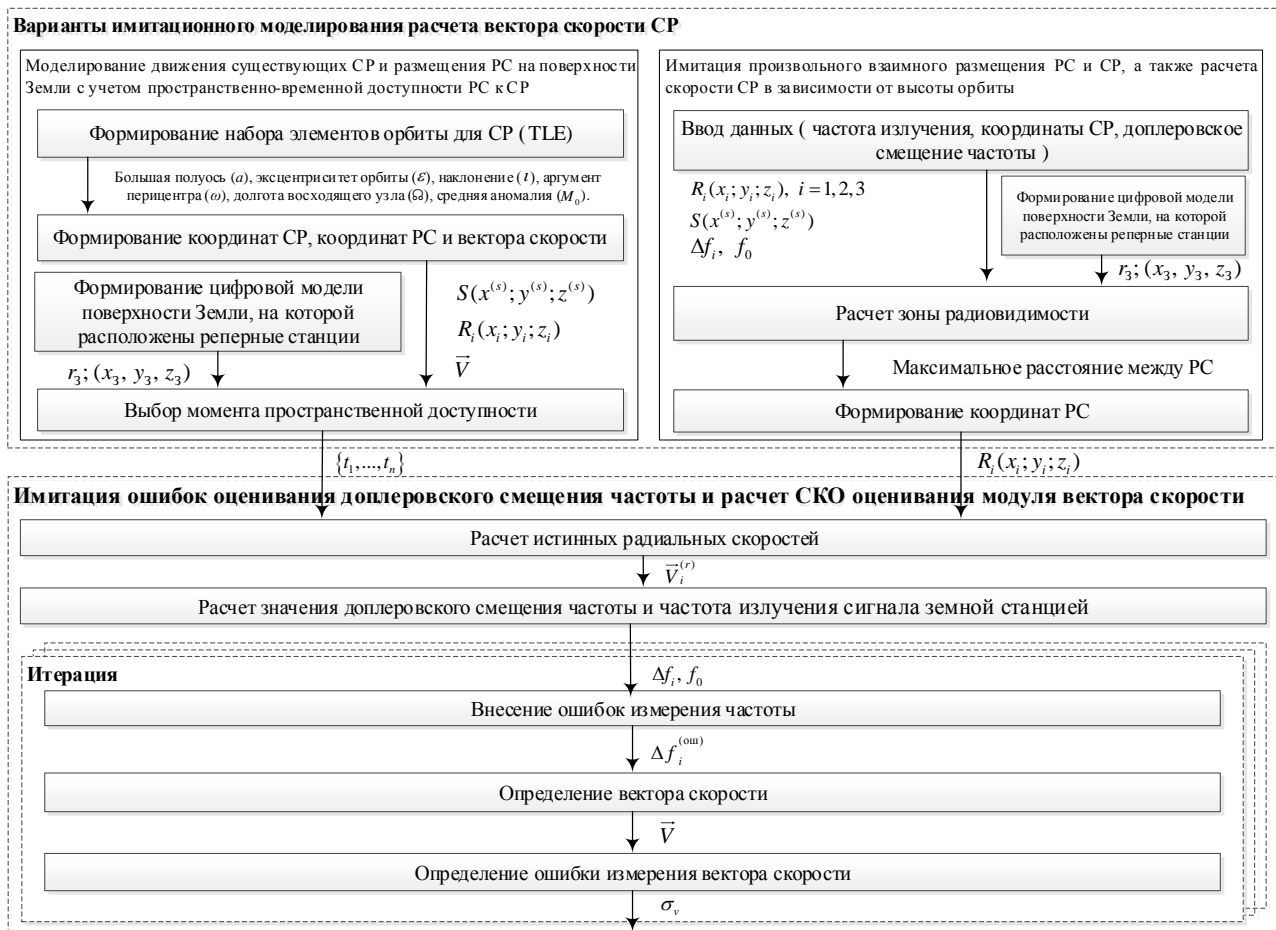


Рис. 3. Структура имитационного моделирования расчета вектора скорости СР по сигналам трех РС

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе разработанной имитационной модели проведены исследования влияния направления вектора скорости  $\vec{V}$  относительно РС на СКО  $\sigma_m$  и  $\sigma_\varphi$ . Исходные данные сформированы по второму варианту. При этом РС станции размещены в вершинах правильного треугольника, как показано на рис. 4.

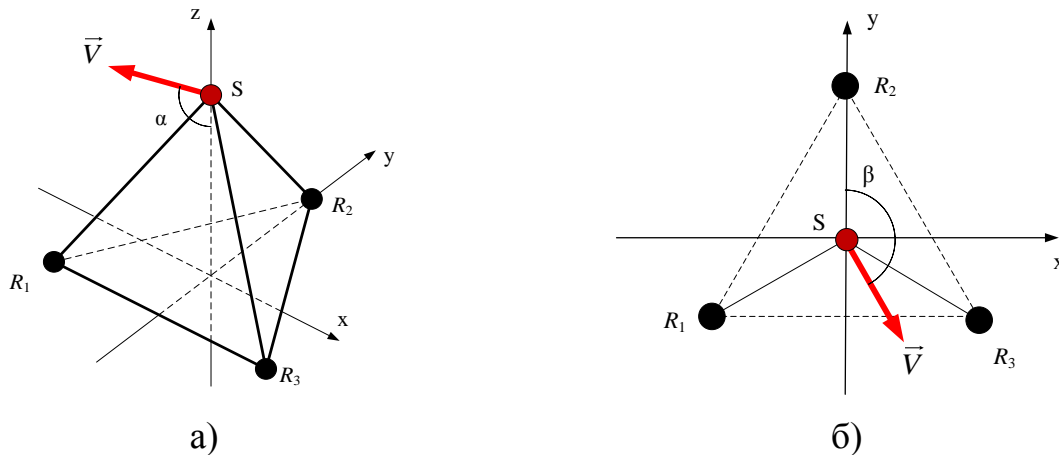


Рис. 4. Пример углов поворота вектора скорости в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

В ходе моделирования осуществлялся поворот вектора скорости  $\vec{V}$  по вертикали на угол  $\alpha$  (рис. 4,а) и по горизонтали на угол  $\beta$  (рис. 4,б). Результаты моделирования представлены на рис. 5–7.

Результаты моделирования свидетельствуют, что СКО оценивания модуля вектора скорости  $\sigma_m$  СР зависит от его положения в пространстве. Ошибка минимальна в случае, если вектор скорости  $\vec{V}$  направлен параллельно плоскости РС ( $\alpha = 90^\circ$ ), и максимальна при его вертикальном направлении ( $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 180^\circ$ ). При повороте вектора скорости  $\vec{V}$  в горизонтальной плоскости на угол  $\beta$  СКО оценивания вектора скорости  $\sigma_v$  увеличивается при его размещении в одной плоскости с ребрами тетраэдра, формируемого РС и СР. Вместе с тем ошибки оценивания направления вектора скорости  $\sigma_\varphi$ , наоборот, минимальны при  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 180^\circ$ .

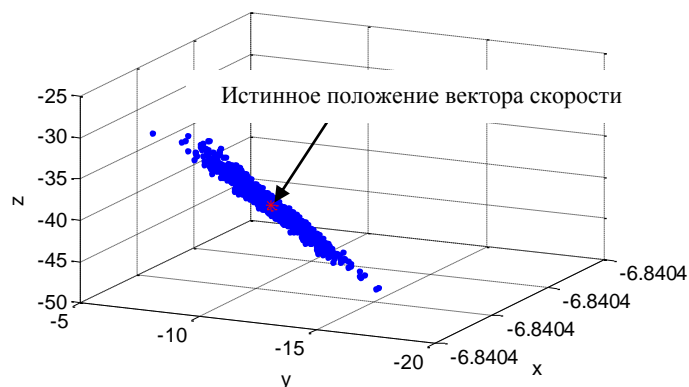


Рис. 5. Оценки вектора скорости, полученные в ходе испытаний при  $\alpha = 20^\circ$  и  $\beta = 150^\circ$

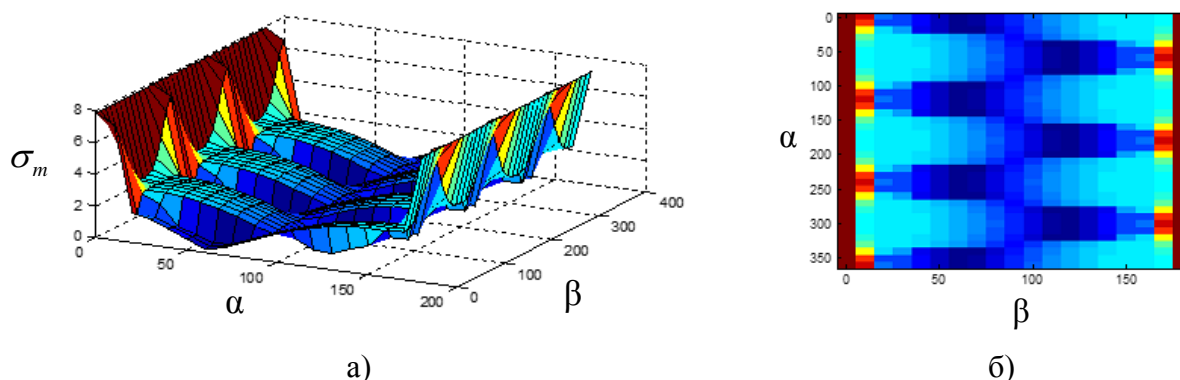


Рис. 6. Среднеквадратическая ошибка оценивания модуля вектора скорости в зависимости от направления движения СР относительно системы РС

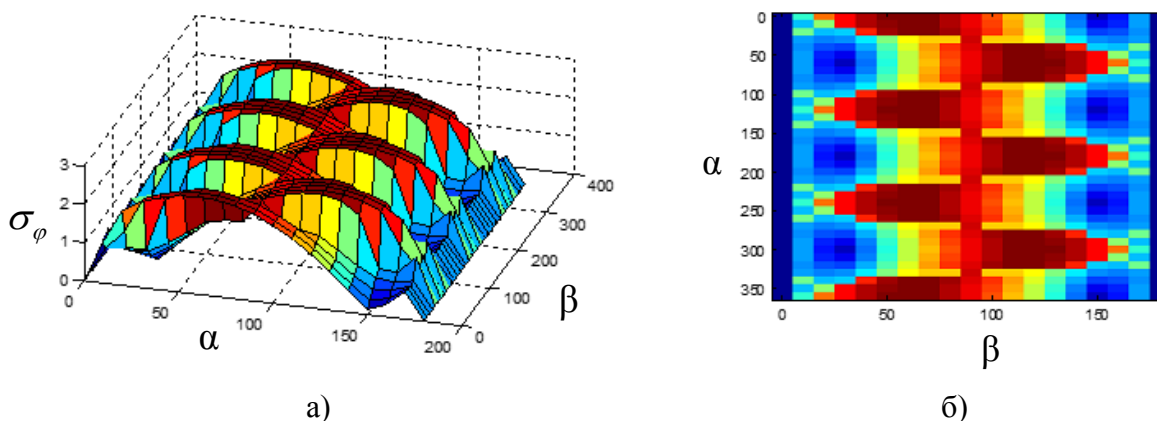


Рис. 7. Среднеквадратическая ошибка оценивания направления вектора скорости в зависимости от направления движения СР относительно РС

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точность определения местоположения ИРИ, которые незаконно используют частотный ресурс по сигналу, ретранслированному СР, разностно-доплеровским методом зависит от точности оценок вектора скорости СР в момент ретрансляции сигнала. Для оценивания влияния геометрической конфигурации, характеризующей взаимное размещение РС и СР, на точность оценок вектора скорости  $\sigma_v$ , разработана математическая модель, позволившая определить, что ошибка определения модуля вектора скорости  $\sigma_m$  минимальна при направлении движения СР параллельно плоскости размещения РС. Однако ошибка определения направления вектора скорости  $\sigma_\phi$ , напротив, увеличивается при уменьшении ошибки модуля вектора скорости  $\sigma_m$ .

Представленная модель может быть использована при проектировании и применении систем геолокации, реализующих разностно-доплеровский метод определения местоположения земных станций.

### Список используемых источников

1. Семенюк С.С., Уткин В.В., Бердинских Л.Н. Геометрический фактор разностно-дальномерной сети датчиков в пространстве // Научные технологии. – 2012. – Т. 13, № 8. С. 66–73.
2. Семенюк С.С., Абакумов А.Н. Исследование влияния геометрической конфигурации разностно-дальномерной системы на точность определения местоположения абонентских терминалов спутниковых систем связи // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. – Вып. 644. – 2014. – С. 40–50.
3. Севидов В.В. Варианты реализации разностно-дальномерного метода определения координат земных станций по сигналам спутников-ретрансляторов // Сборник докладов III Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь». – Омск: Издательский дом «Наука», 2015. – С. 303–308.
4. Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии, дополненные необходимыми сведениями из алгебры. – М.: Наука, 1968. – 911 с.
5. Курош А. Г. Курс высшей алгебры. – М.: Наука, 1965. – 431 с.
6. Привалов И.И. Аналитическая геометрия. – М.: Наука, 1966. – 272с.
7. Казанова Г. Векторная алгебра / пер. с франц. А.В. Булинского. – М.: Мир, 1979. – 118 с.

В.В. Октябрьский,

*кандидат техн. наук*

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

А.С. Островский,

*доктор техн. наук, доцент*

МГТУ имени Н.Э. Баумана (НИУ), г. Москва;

Р.С. Саламан

ЦНИИ ВВС (Минобороны России), г. Москва

## **МЕТОДИКА КОМПЕНСАЦИИ НЕРАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО СМАЗА АЭРОФОТОСНИМКОВ МНОГОМАТРИЧНЫХ ЦИФРОВЫХ АЭРОФОТОАППАРАТОВ ПЛАНОВО-ПЕРСПЕКТИВНОЙ СЪЕМКИ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ МЕСТНОСТИ**

Представлены результаты исследования воздействия условий эксплуатации и конструктивных особенностей многоматричных цифровых аэрофотоаппаратов планово-перспективной съемки на дешифровочные свойства регистрируемых аэрофотоснимков. На основании полученных результатов разработана методика обработки аэрофотоснимков многоматричных цифровых аэрофотоаппаратов планово-перспективной съемки, обеспечивающая компенсацию смаза при его неравномерном распределении на аэрофотоснимке.

Ключевые слова: методы фильтрации цифровых изображений, искажение аэрофотоснимка, дешифровочные свойства аэрофотоснимка.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При решении ряда задач мониторинга земной поверхности возникает необходимость выполнения аэрофотосъемки, в том числе в условиях недостаточной освещенности местности. При увеличении времени экспозиции в процессе проведения аэрофотосъемки на снимке возникает эффект «смаза» – искажения изображения, вызванного смещением аэрофотоаппарата относительно снимаемых объектов. Результаты анализа практического применения ряда многоматричных цифровых аэрофотоаппаратов планово-перспективной съемки (МЦАФА ППС) показали, что проявление смаза на аэрофотоснимках является основной причиной неуспешного выполнения большей части полетных заданий.

Результаты проведенных исследований по влиянию величины смаза изображения на разрешение аэрофотоснимка показали, что даже при незначительной величине смаза, равной 2 пикселям, разрешение аэрофотоснимка ухудшается на 30%, что может привести к уменьшению вероятности распознавания ряда типовых объектов интереса [1, 2].

Особенности конструктивного исполнения МЦАФА ППС (компоновка из большого числа объективов, широкий угол захвата) [3] в совокупности с условиями эксплуатации при недостаточной освещенности местности приводят к неравномерному проявлению смаза по ширине аэрофотоснимков, что ограничивает использование современных технологий компенсации линейного смещения аппаратуры во время экспозиции. Кроме того, следует учесть, что использование технологий оптической и матричной стабилизации технически сложно реализуемо, а применение электронной – не представляется возможным.

Применение в процессе обработки аэрофотоснимков МЦАФА ППС существующих методов фильтрации изображений позволяет в некоторой степени компенсировать влияние искажения типа «смаз», но наблюдаются значительные дефекты, ухудшающие дешифровочные свойства аэрофотоснимка, вызванные воздействием линейного трансляционно-инвариантного искажающего оператора, значения которого на практике принимаются посто-

янными по всему полю кадра. Таким образом, тема исследования, посвященного разработке методики компенсации неравномерно распределенного «смаза» аэрофотоснимков МЦАФА ППС при их эксплуатации в условиях недостаточной освещенности местности, является актуальной.

## ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУР ИСКАЖЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

С математической точки зрения процесс компенсации смещения МЦАФА ППС во время экспозиции может быть представлен в виде решения задачи восстановления искаженного смазом изображения [4]. Методы восстановления искаженных изображений основаны на моделировании процессов искажения и применении обратных процессов для воссоздания исходного изображения (рис. 1).

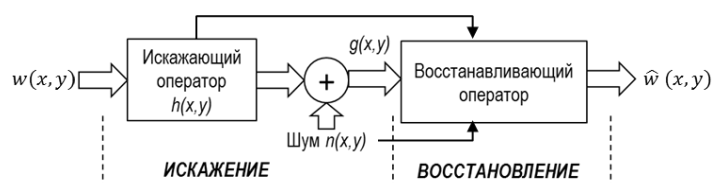


Рис. 1. Модель процессов искажения и восстановления изображения

Задача восстановления состоит в построении некоторого изображения  $\hat{w}(x, y)$ , максимально приближенного к исходному изображению  $w(x, y)$  по заданному искаженному изображению  $g(x, y)$  с использованием информации относительно искажающего оператора  $h(x, y)$  и параметров шума  $\eta(x, y)$ . Основой данного подхода является применение операторов (фильтров), восстанавливающих изображение.

В связи со сложностью технической реализации экспериментальных установок, для исследования процессов искажения и восстановления аэрофотоснимков ЦАФА используются методы математического моделирования. В их основу положена теория цифровой обработки изображений. В соответствии с работой [4] процесс искажения изображения при его линейном смещении за время экспозиции моделируется в виде воздействия функции искажения  $h(x, y)$  на исходное изображение  $w(x, y)$ , порождая искаженное изображение  $g(x, y)$ . При этом математическая модель процесса искажения изображения описывается выражением

$$g(x, y) = h(x, y) * w(x, y) + \eta(x, y), \quad (1)$$

где  $w(x, y)$  – двумерная функция яркости исходного изображения;

$g(x, y)$  – двумерная функция яркости искаженного изображения;

$h(x, y)$  – искажающий оператор (функция искажения);

$\eta(x, y)$  – двумерная функция яркости цифрового шума на аэрофотоснимке;

«\*» – символ, обозначающий операцию свертки.

Применение выражения (1) возможно только для моделирования искажений плановых аэрофотоснимков, так как функция  $h(x, y)$  должна представлять собой линейный трансляционно-инвариантный оператор искажения (постоянным на всем поле кадра). Для МЦАФА ППС данный подход не применим ввиду неравномерного распределения величины смаза на аэрофотоснимке.

Как известно, величина искажения аэрофотоснимка, возникающего в процессе смещения ЦАФА во время экспозиции, определяется расстоянием на местности, на которое за это время смещается проекция соответствующего пиксела на местности в соответствии со скоростью полета самолета [4, 5]. Для моделирования процесса искажения аэрофотоснимков



МЦАФА ППС предложен подход, заключающийся в проведении предварительного трансформирования аэрофотоснимка таким образом, чтобы обеспечивался равномерный масштаб проекций его точек на местности на всем поле кадра (рис. 2). При этом параметры трансформирования аэрофотоснимка рассчитываются относительно проекций изображений с матриц ЦАФА на местность по контрольным (угловым) точкам в зависимости от технических характеристик МЦАФА ППС и высоты полета самолета-носителя.

Применение предварительной параметрической трансформации аэрофотоснимка позволяет проводить цифровую обработку аэрофотоснимков с выявленным неравномерным распределением величины смаза при использовании линейного трансляционно-инвариантного оператора.

Для оценки применимости существующих методов фильтрации цифровых изображений к задаче восстановления аэрофотоснимков в подразделениях наземной обработки информации проведен их сопоставительный анализ по показателям погрешности восстановления искаженных изображений местности и времени работы на типовом автоматизированном рабочем месте (АРМ).

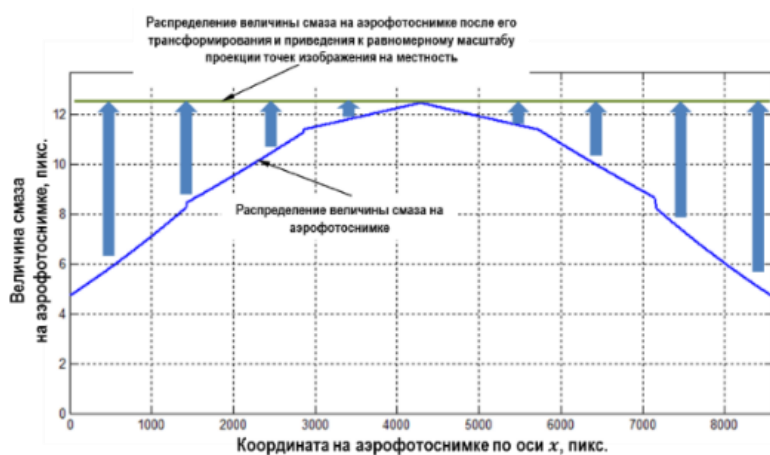


Рис. 2. Условное распределение величины смаза на аэрофотоснимке МЦАФА ППС после проведения его трансформации

Исследования показали, что в наземной обработке информации целесообразно использовать метод параметрической фильтрации по Винеру и алгоритм Люси – Ричардсона, так как их применение может осуществляться автоматизированно относительно имеющейся информации по результатам аэрофотосъемки с обеспечением достаточной точности восстановления смазанных аэрофотоснимков, не выходя за пределы директивного времени обработки. Для выполнения процедуры восстановления искаженных смазом аэрофотоснимков необходима информация о параметрах цифрового шума и функции искажения, соответствующих таким условиям искажения, которые наблюдались в процессе регистрации аэрофотоснимка в ЦАФА.

Для исследования параметров цифрового шума выбрана аддитивная модель, описываемая с применением гауссового распределения с нулевым средним. При этом значение яркости каждой точки исходного изображения (каждого пикселя матрицы ЦАФА) суммируется со случайной компонентой нормального распределения, характеризующегося нулевым средним и дисперсией, соответствующей дисперсии яркости зашумленного изображения.

Обычно для оценки шумовых характеристик цифровых фотоаппаратов используются методы, основанные на оценке шума на изображении или по наиболее однородным участкам этого изображения (с постоянной яркостью, без фоновых деталей). Однако на практике получение однородных участков яркости на аэрофотоснимках ЦАФА затруднено. В связи с этим разработан способ определения параметров цифрового шума по фотоизображениям

равномерного поля яркости, основанный на методе прямых измерений и учитывающий случайный характер проявления шума на цифровых изображениях в процессе съемки, что позволяет проводить его оценку с необходимой точностью измерения в ходе технического обслуживания ЦАФА (рис. 3).

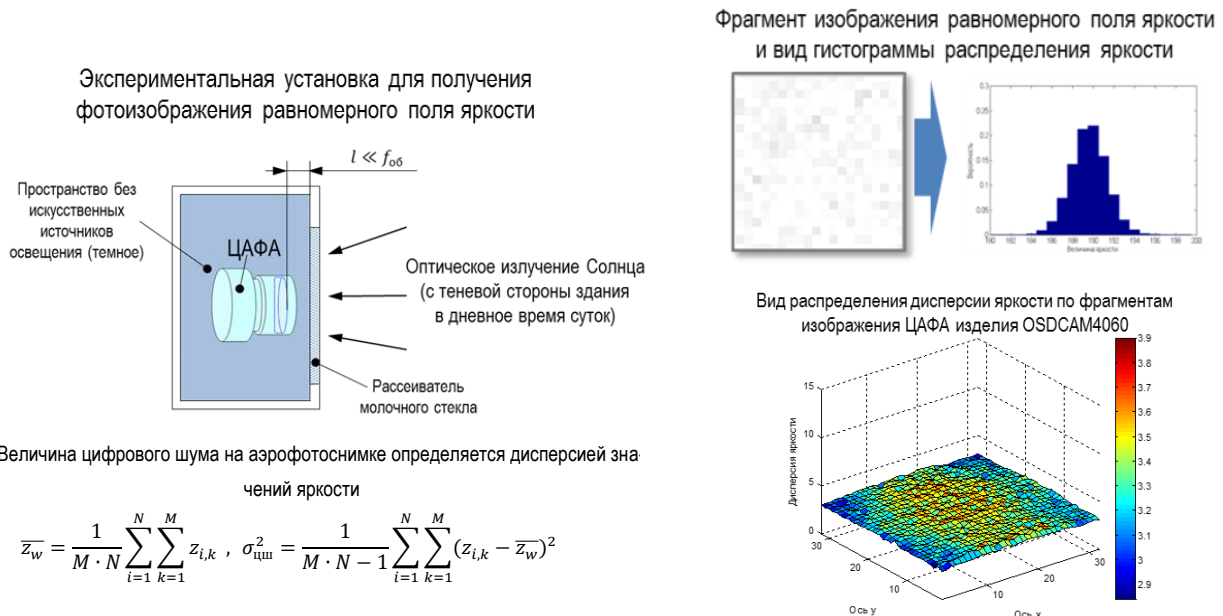


Рис. 3. К способу определения параметров цифрового шума по фотоизображениям равномерного поля яркости

## СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ КОМПЕНСАЦИИ НЕРАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО СМАЗА АЭРОФОТОСНИМКОВ МЦАФА ППС

На основании проведенных исследований выполнен синтез составляющих элементов процесса восстановления искаженных смазом аэрофотоснимков, по результатам которого разработана методика обработки аэрофотоснимков МЦАФА ППС (рис. 4).

Методика предполагает последовательное осуществление ряда действий.

Предварительно проводится оценка параметра цифрового шума – СКО яркости  $\sigma_z$ . Данную работу целесообразно проводить при выполнении регламентных работ на МЦАФА ППС с записью информации в паспорт изделия.

**На первом этапе** по имеющейся информации выполненного полетного задания проводится трансформирование аэрофотоснимка и определяются параметры функции его искажения. Для этого проводятся:

1. Расчет минимального линейного размера проекции пикселя из всех матриц МЦАФА ППС на местность  $L(x)_{\min}$  в соответствии с выражением

$$L(x)_{\min} = \min[L(x)],$$

$$L(x) = \frac{a}{M(x)},$$
(2)

где  $L(x)$  – линейный размер проекции пикселей по оси  $x$  на местность, м;

$a$  – линейный размер пикселя матрицы МЦАФА ППС, м;

$M(x)$  – масштаб аэрофотоснимка по оси  $x$ .

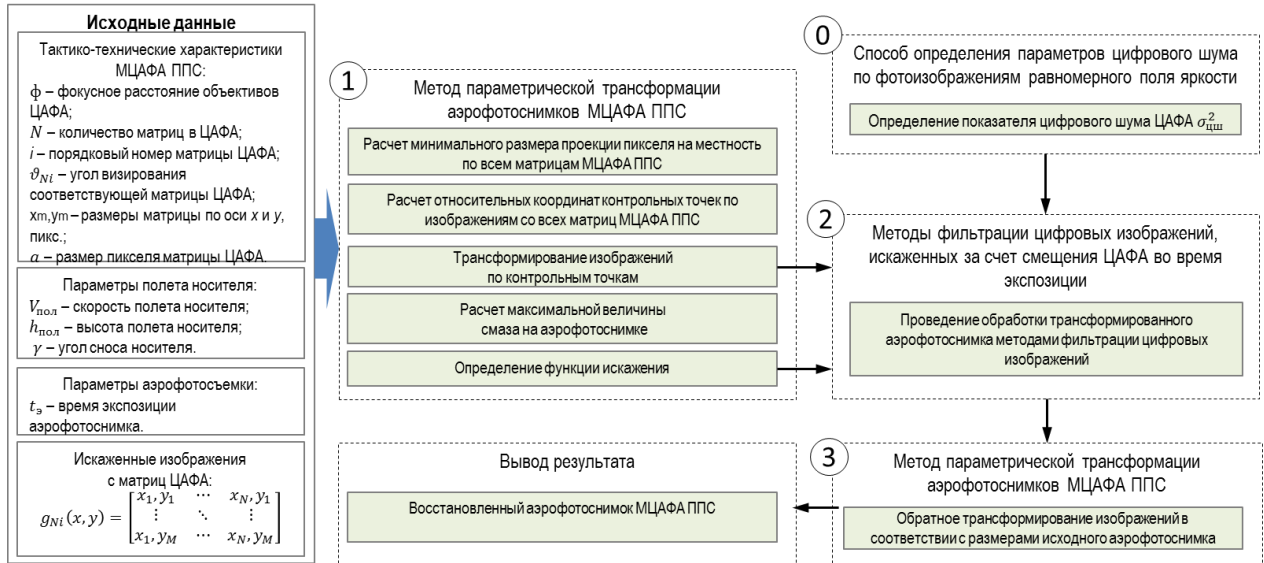


Рис. 4. Этапы выполнения обработки аэрофотоснимков МЦАФА ППС

Масштаб аэрофотоснимка определяется с использованием выражения

$$M(x) = \frac{\phi}{h_{пол}} \frac{\left( \frac{a x - a x_0}{\phi} \sin\vartheta - \cos\vartheta \right)^2}{\sqrt{\left[ \left( \frac{a x - a x_0}{\phi} \sin\vartheta - \cos\vartheta \right) \sin\gamma \right]^2 + \cos^2\gamma}} \quad (3)$$

- где  $\phi$  – фокусное расстояние объектива МЦАФА ППС, м;  
 $h_{пол}$  – высота полета, м;  
 $x$  – координата пикселя на матрице МЦАФА ППС по оси  $x$ , пикс.;  
 $x_0$  – координата главной точки аэрофотоснимка на матрице по оси  $x$ , пикс.;  
 $\vartheta$  – угол визирования соответствующей матрицы МЦАФА ППС, рад;  
 $\gamma$  – угол сноса самолета-носителя, рад.

По результатам расчета в соответствии с выражениями (2) и (3) формируется зависимость линейного размера проекции пикселей матриц МЦАФА ППС от их положения на аэрофотоснимке (рис. 5).

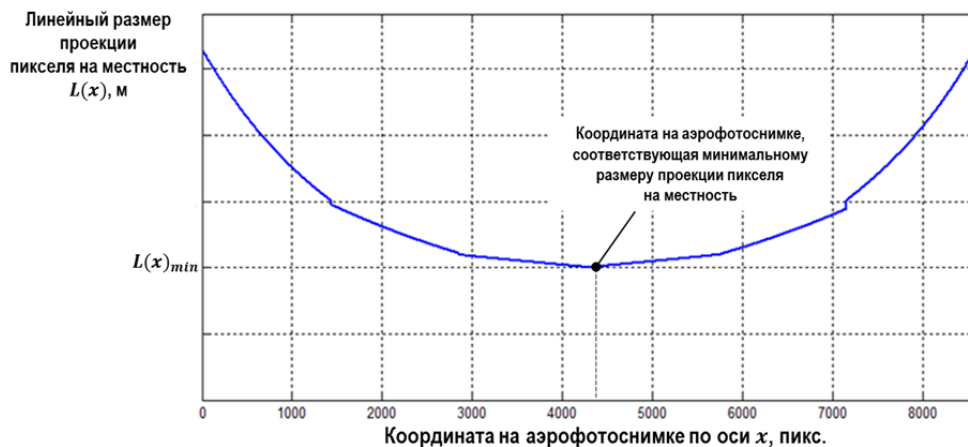


Рис. 5. Пример определения значения  $L(x)_{min}$  для аэрофотоснимка маловысотного ЦАФА изделия OSDCAM4060

2. Расчет параметров трансформирования относительно проекций изображений с матриц МЦАФА ППС на местность по контрольным (угловым) точкам. Координаты контрольных точек трансформированного изображения определяются относительно минимального линейного размера проекции пикселя из всех матриц МЦАФА ППС на местность  $L(x)_{\min}$  (рис. 6) в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} X_{i,n}^T &= \frac{X_{i,n}}{L(x)_{\min}}, \\ Y_{i,n}^T &= \frac{Y_{i,n}}{L(x)_{\min}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $X_{i,n}^T, Y_{i,n}^T$  – координаты контрольных точек трансформированного изображения, пикс.;

$X_{i,n}, Y_{i,n}$  – координаты контрольных точек на местности.

Координаты контрольных точек на местности рассчитываются с помощью выражений:

$$\begin{aligned} X_{i,n} &= -h_{\text{пол}} \frac{(a x_{i,n} - a x_{0,n}) \cos \vartheta_n + \phi \sin \vartheta_n}{(a x_{i,n} - a x_{0,n}) \sin \vartheta_n - \phi \cos \vartheta_n}, \\ Y_{i,n} &= -h_{\text{пол}} \frac{(a y_{i,n} - a y_{0,n})}{(a x_{i,n} - a x_{0,n}) \sin \vartheta_n - \phi \cos \vartheta_n}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $X_{i,n}, Y_{i,n}$  – координаты контрольных точек на трансформированном изображении, м;

$i$  – порядковый номер контрольной точки ( $i = 1 \dots 4$ );

$n$  – порядковый номер матрицы МЦАФА ППС ( $n = 1 \dots N$ );

$x_{i,n}, y_{i,n}$  – координаты контрольных точек на матрицах МЦАФА ППС, пикс.;

$x_{0,n}, y_{0,n}$  – координаты главной точки на матрицах МЦАФА ППС, пикс.

3. Трансформирование изображений по рассчитанным относительным координатам контрольных точек. Оно может быть проведено с использованием существующих алгоритмов геометрического преобразования цифровых изображений.

Исходное изображение



Трансформированное изображение

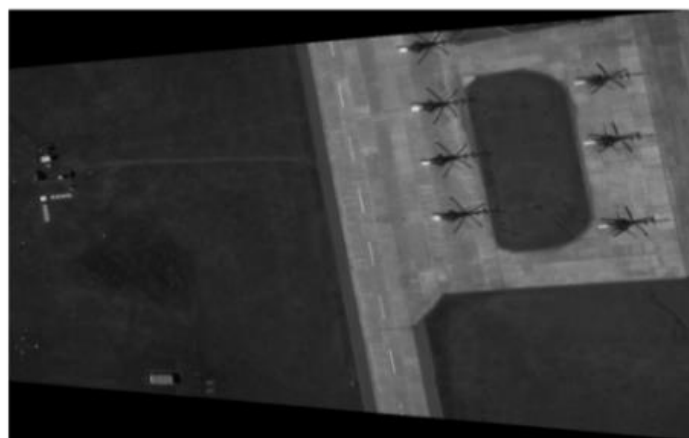


Рис. 6. Пример трансформирования изображения с матрицы МЦАФА ППС

### 3. Определение функции искажения трансформированных изображений.

Для осуществления этого действия определяется максимальная величина смаза на аэрофотоснимке в соответствии с выражением

$$\delta_{\max} = \frac{V_{\text{пол}} \cdot t_{\text{э}} \cdot \cos \gamma}{L(x)_{\min}}, \quad (6)$$

где  $\delta_{\max}$  – максимальная величина смаза на аэрофотоснимке, м;

$V_{\text{пол}}$  – скорость полета самолета-носителя, м/с;

$t_{\text{э}}$  – время экспозиции, с;

$\gamma$  – угол сноса самолета-носителя, рад.

При этом формируется двумерная функция, значения которой соответствуют прямоугольной области величин изменения яркости от какой-либо точки на изображении при его смещении во время экспозиции (рис. 7).

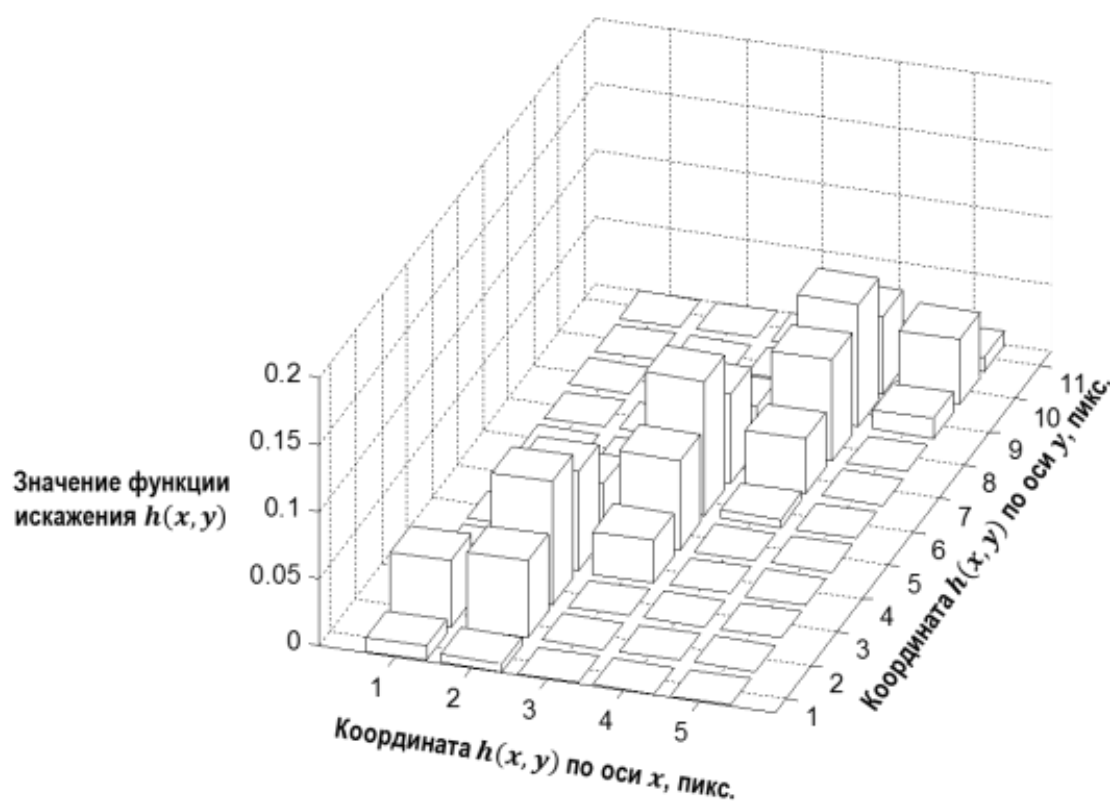


Рис. 7. Пример определения функции искажения  $h(x, y)$  для трансформированных изображений при величине смаза, равного 12,69 пикс., и угле сноса, равном  $20^\circ$

**На втором этапе** проводится обработка трансформированного аэрофотоснимка на основе методов фильтрации цифровых изображений, искаженных за счет смещения ЦАФА во время экспозиции. Фильтрацию трансформированных изображений можно провести:

а) методом минимизации среднего квадрата отклонения (параметрическая фильтрация по Винеру) в соответствии с выражением

$$\hat{W}(x, y) = \left( \frac{1}{H(x, y) \frac{|H(x, y)|^2}{|H(x, y)|^2 + \frac{S_{\eta}(x, y)}{S_g(x, y)}}} \right) G(x, y), \quad (7)$$

где  $H(x, y)$  – частотное представление функции искажения  $h(x, y)$ ;

$S_{\eta}(x, y)$  – частотное представление энергетического спектра цифрового шума  $\eta(x, y)$ ,

$$S_{\eta}(x, y) = |N(x, y)|^2;$$

$S_g(x, y)$  – частотное представление энергетического спектра искаженного изображения  $g(x, y)$ ,

$$S_g(x, y) = |W(x, y)|^2;$$

$G(x, y)$  – частотное представление искаженного изображения  $g(x, y)$ .

Восстановленное изображение в пространственной области  $\hat{w}(x, y)$  получается применением обратного преобразования Фурье к оценке  $\hat{W}(x, y)$ .

б) с помощью алгоритма Люси – Ричардсона в соответствии с выражением

$$\hat{w}_{k+1}(x, y) = \hat{w}(x, y) \left[ h(-x, -y) * \frac{g(x, y)}{h(x, y) * \hat{w}(x, y)} \right], \quad (8)$$

при этом количество итераций принять не менее 50.

**На третьем этапе** проводится обратное трансформирование обработанного аэрофотоснимка для приведения его геометрических характеристик к исходным.

Обратное трансформирование изображений для приведения их геометрических размеров к исходному изображению проводится, соответственно, с использованием координат контрольных точек исходного изображения и применением алгоритмов геометрического преобразования цифровых изображений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Оценка эффекта от применения разработанной методики обработки аэрофотоснимков МЦАФА ППС проводилась на основе вычислительного эксперимента по модельным примерам выполнения типовых полетных заданий в условиях недостаточной освещенности местности. Модельные примеры выполнения таких заданий были сформированы на основе искажения аэрофотоснимков МЦАФА ППС с применением параметрической трансформации аэрофотоснимков при следующих исходных данных:

1. Тип МЦАФА ППС – маловысотный ЦАФА изделия OSDCAM4060 с параметрами [3]:

- количество матриц,  $N = 6$  шт.,  $i = 1 \div 6$ ;
- углы визирования матриц:  $-43.75^\circ, -26.25^\circ, -8.75^\circ, 8.75^\circ, 25.25^\circ, 43.75^\circ$ ;
- размеры матрицы по оси  $x$  и  $y$ ,  $x_m, y_m$ :  $1634 \times 1228$  пикс.;
- линейный размер пикселя матрицы,  $a = 3,275$  мкм;
- фокусное расстояние объективов,  $f = 16$  мм;
- СКО яркости (цифровой шум),  $\sigma_z = 0,008$  ед.

Параметры полета самолета-носителя:

- скорость полета,  $V_{\text{пол}} = 600$  км/ч;
- высота полета,  $h_{\text{пол}} = 1000$  м;
- угол сноса,  $\gamma = 0^\circ$ .

В качестве исходного аэрофотоснимка выбран типовой аэрофотоснимок с изображением мерительного поля, полученный в процессе испытаний изделия OSDCAM4060 при вышеуказанных параметрах полета (рис. 8).

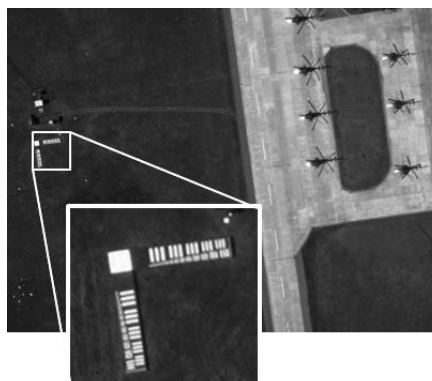


Рис. 8. Фрагмент аэрофотоснимка с изображением мерительного поля

В качестве варьируемого фактора выбрано время экспозиции аэрофотоснимка  $t_3$  – от 600 до 12000 мкс (с шагом изменения расчетных значений величин смаза по центру аэрофотоснимков, равным 0,5 пикс.). Исходя из результатов формирования набора исходных данных по модельным примерам выполнения типовых полетных заданий в условиях недостаточной освещенности местности, были сформированы 20 аэрофотоснимков, на которых величина смаза по центру кадра составляла от 0,5 до 10 пикс.

Анализ результатов обработки аэрофотоснимков с помощью существующих методов показал, что данные методы позволяют улучшить разрешение аэрофотоснимков, но при этом наблюдаются значительные дефекты, ухудшающие качество изображения объектов на местности (рис. 9).

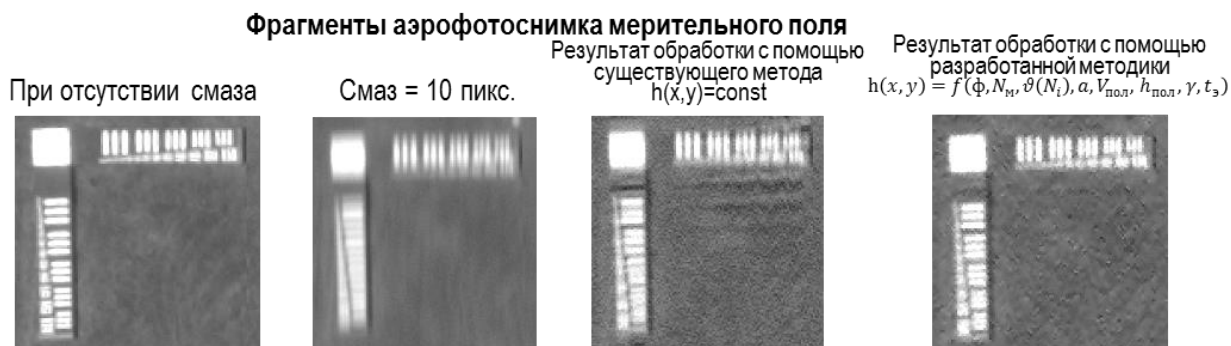


Рис. 9. Результаты обработки искаженных аэрофотоснимков

Оценка разрешения обработанных аэрофотоснимков проводилась по центру кадра в соответствии с принятой методикой оценки разрешающей способности на местности. При этом к визуальному анализу были привлечены пять экспертов (опытных дешифровщиков).

По результатам проведенных исследований получена зависимость дешифровочных свойств обработанного аэрофотоснимка от времени экспозиции, соответствующего условиям аэрофотосъемки при недостаточной освещенности местности (рис. 10). На рис. 10 треугольными маркерами обозначены результаты оценки разрешения при предварительной обработке аэрофотоснимка с помощью разработанной методики, а маркерами в виде ромбов – с помощью существующих методов. При этом сплошной линией показана полиномиальная аппроксимация второй степени среднего значения оцененного разрешения (достоверность аппроксимации составила более 0,98).

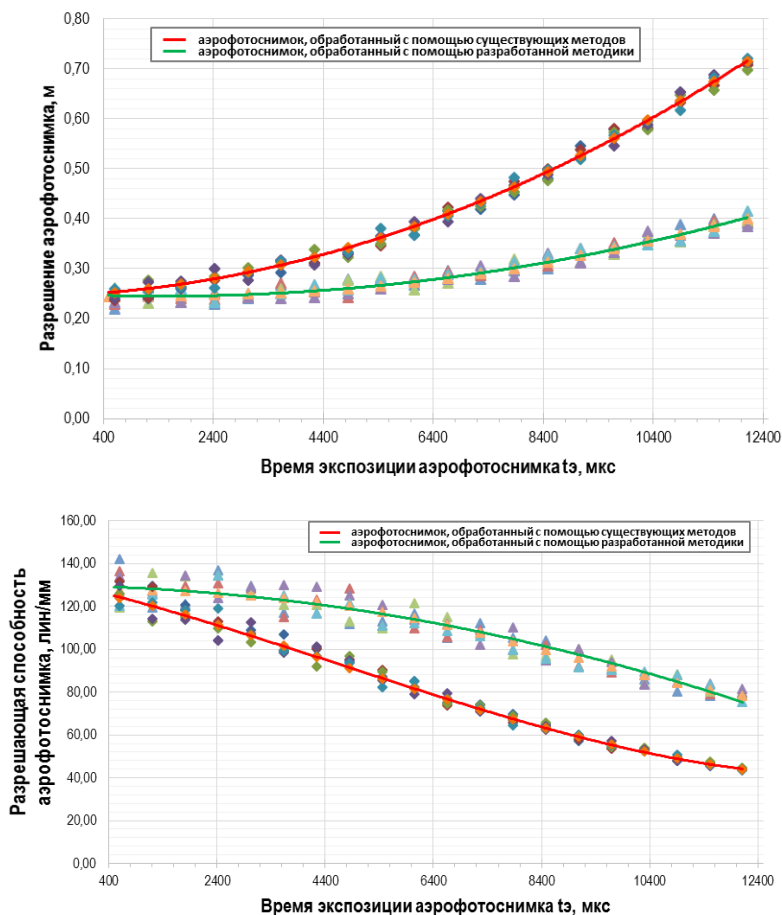


Рис. 10. Зависимость дешифровочных свойств обработанного аэрофотоснимка от времени экспозиции

Анализ рис. 9 и 10 показывает, что использование в процессе обработки аэрофотоснимков положений разработанной методики позволяет исключить образование дефектов, присутствующих на аэрофотоснимках, обработанных существующими методами. При этом разрешение аэрофотоснимка значительно улучшается при любых параметрах аэрофотосъемки, выбираемых при недостаточной освещенности местности. Максимальное значение улучшения разрешающей способности обработанного аэрофотоснимка составило 40%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение разработанной методики обработки аэрофотоснимков МЦАФА ППС при их эксплуатации в условиях недостаточной освещенности местности позволит:

- расширить возможности существующих комплексов наземной обработки информации;
- повысить достоверность распознавания объектов интереса.

## Список используемых источников

1. Гайденков А.В., Веселов Ю.Г., Островский А.С. Определение характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. – 2016. – № 4. – С. 371–375.



2. *Веселов Ю.Г., Гулевич С.П., Данилин А.А., Карпиков И.В., Тихонычев В.В.* Прогнозирование разрешающей способности цифровых аэрофотосъемочных систем // Проблемы безопасности полетов. – 2009. – № 2. – С. 21–25.

3. Оптико-электронные станции наблюдения «OSDCAM4060 и 3660». Презентационные материалы АНО «ПО КСИ». – URL: <http://www.poksi.ru/files/OSDCAM.pdf> (дата обращения: 12.11.2020).

4. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Техносфера, 2019. – 1104 с.

5. *Коваленко В.П.* Фотограмметрическая обработка материалов видовых средств дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2003. – 182 с.

Д.В. Андрушкевич,

*кандидат техн. наук;*

Д.Н. Бирюков,

*доктор техн. наук, доцент;*

П.В. Тимашов

## **ПОРОЖДЕНИЕ СЦЕНАРИЕВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК НА ОСНОВЕ ЛОГИКО-ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

Рассмотрена задача автоматизированного вывода знаний по аналогии о возможных сценариях, описывающих процессы, потенциально пригодные для предотвращения компьютерных атак. В основу предложенного подхода положена апробированная методика переноса знаний из одной проблемной области в другую. Прдемонстрирована возможность переноса знаний о выигрышных стратегиях поведения в биосфере в киберсферу.

Ключевые слова: интеллектуальная система, гиромат, вывод по аналогии, биоинспирированный подход, онтология, информационная безопасность, компьютерные атаки.

### **ВВЕДЕНИЕ**

На современном этапе развития информационных технологий, средств автоматизации различных процессов и при всё более явной интеграции в единое информационно-телекоммуникационное пространство элементов критических информационных инфраструктур (КИИ) значимость решения задач по обеспечению должного уровня защищенности объектов КИИ и задач по обеспечению их устойчивого функционирования неукоснительно растет. Также растет количество информации о прецедентах, связанных с осуществлением компьютерных атак (КА) на КИИ. Нарушители информационной безопасности (ИБ) постоянно развивают тактики и совершенствуют инструменты осуществления КА. Вполне очевидно, что предпочтительнее не допустить осуществление КА на защищаемые объекты, чем парировать в ходе их проведения, а тем более восстанавливать работоспособность элементов КИИ после пропуска КА. Возникает вопрос, связанный с тем, как предугадать возможные стратегии нарушителей и заранее подготовиться к потенциально реализуемым КА. Данный вопрос не тривиален и не имеет на сегодняшний день однозначного решения. Так, например, в последнее десятилетие наблюдаются попытки применения в области обеспечения ИБ различных биоинспирированных подходов [1–4], исследователи пытаются выявить в биосфере выигрышные стратегии поведения и перенести их в киберсферу. Такой подход имеет право на существование, так как биосфера эволюционирует миллионы лет, и в ее рамках биоорганизмы, борясь за выживание, наработали уже колоссальное количество стратегий поведения. Вместе с тем видится полезным разработка такого подхода и инструментов, которые позволили бы в автоматизированном режиме находить подходящие аналогии и представлять их экспертам для оценивания и, в случае необходимости, для реализации при обеспечении ИБ КИИ.

Предотвращение КА на объекты КИИ является многоэтапным процессом, требующим различной степени участия операторов на разных этапах. Последовательность основных этапов общей методики предотвращения КА на объекты КИИ можно представить так, как это показано на рис. 1.

Следует отметить, что деление между первым и вторым этапами искусственное, так как дополнение базы знаний (БЗ) информацией, порожденной гироматом [5] в процессе осу-

ществления им различных логических выводов, должно выполняться при каждом занесении данных в онтологию.

Одним из центральных элементов предложенной методики является этап, связанный с интеллектуальной обработкой знаний [6], представленных в памяти гиromата в виде онтологии [7].

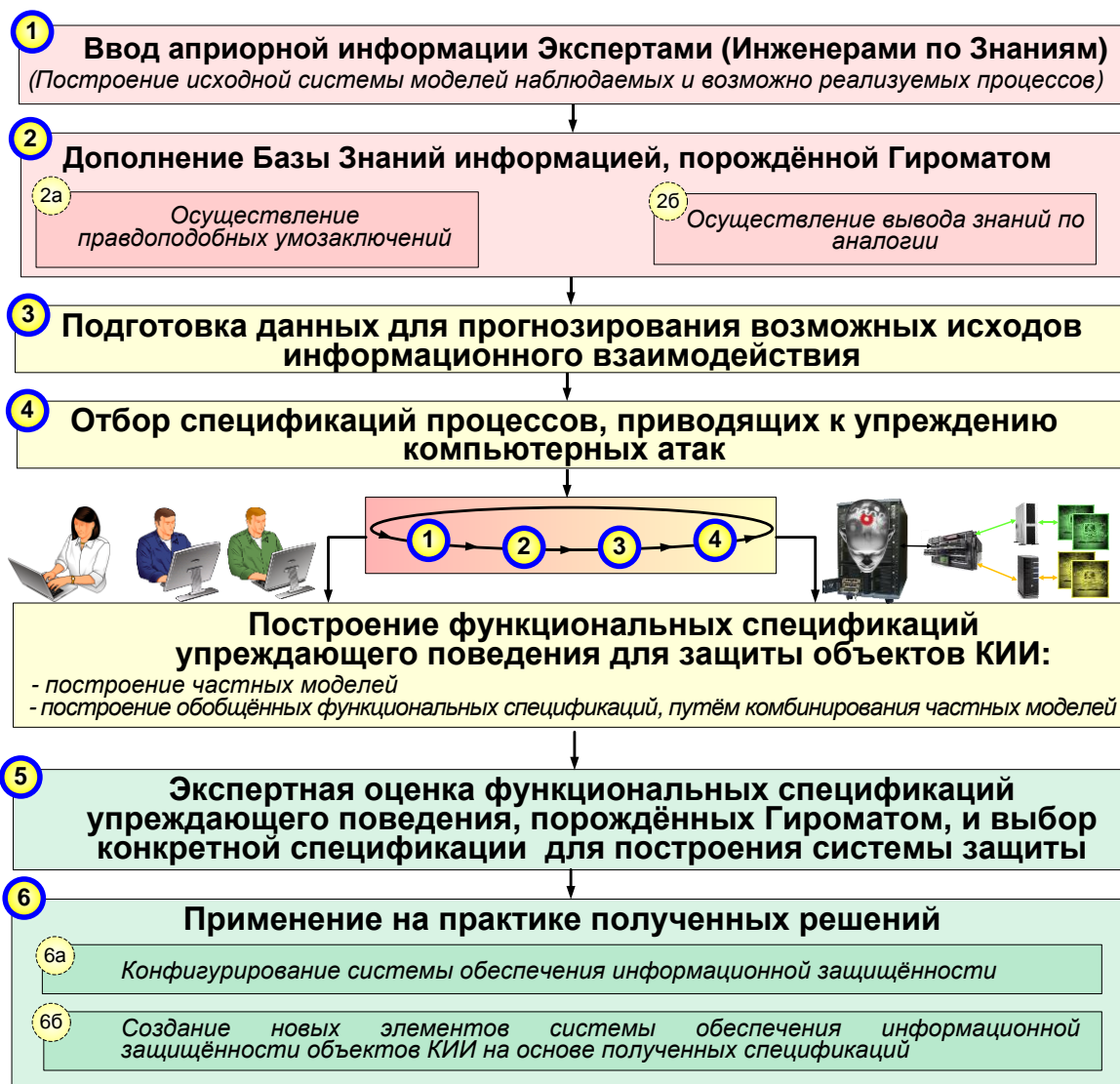


Рис. 1. Основные этапы методики предотвращения КА на объекты КИИ

Этап подготовки данных для прогнозирования возможных исходов от реализации КА может потребовать от экспертов уточнения временных параметров мероприятий, которые потенциально могут наблюдаться в киберпространстве.

Этапы с первого по четвертый включительно могут выполняться параллельно с пятым и шестым этапами, так как в ходе их выполнения могут формироваться спецификации процессов с различной степенью детализации и на отдаленную перспективу. Сам гиromат должен постоянно обрабатывать находящиеся в его памяти данные и формировать спецификации возможных процессов. Вопросам по формированию спецификаций процессов, потенциально пригодных для предотвращения КА, и посвящена данная статья.

## СБОР, ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОСТУПАЮЩИХ ОТ ЭКСПЕРТОВ И СЕНСОРОВ КИБЕРСИСТЕМЫ

На первом этапе по априорным данным, полученным от инженеров по знаниям, а также по данным, накопленным на основе опыта функционирования самой киберсистемы, строятся фрагменты исходной онтологии, содержащей описание процессов, протекающих в определенных предметных областях. Данные фрагменты есть не что иное, как исходная иерархическая система сетевых моделей с вероятностной структурой, отражающая знания и представления о возможных реализациях КА и способах их предотвращения.

При занесении данных в память киберсистемы гиromат автоматически осуществляет логический вывод, используя для этого уже имеющиеся и поступающие данные [7], а также автоматически производит изменение параметров ассоциативной ресурсной сети (АРС) [8].

Далее, управляя фокусом внимания, гиromат выделяет из построенной онтологии аналогичные процессы. В общем случае построение моделей процессов по аналогии осуществляется постепенно. Чтобы описываемый процесс был более наглядным, предлагается искусственно выделить в нем ряд этапов:

*первый этап* – построение фрагмента онтологии, представляющей первую проблемную область;

*второй этап* – построение фрагмента онтологии, представляющей вторую проблемную область и имеющую в своем составе описание некоторого процесса;

*третий этап* – объединение двух перечисленных фрагментов;

*четвертый этап* – осуществление поиска в первом фрагменте онтологии моделей процессов, аналогичных тем, которые представлены во втором фрагменте.

На первом этапе предлагается, например, описать достаточно абстрактную киберсистему, функционирующую в киберсфере.

**Построение фрагмента онтологии, описывающего киберсферу.** Пусть есть некоторая абстрактная «КиберСистема» (**O1**), состоящая из «Сенсоров КиберСистемы» (**O2**) и «Эффекторов КиберСистемы» (**O3**), которой противостоит абстрактный «КиберПротивник» (**O4**).

В рамках «КиберСистемы» функционирует «Операционная Система» (**O5**). Хорошо известно, что есть «Более Защищенные ОС» (**O6**) и «Менее Защищенные ОС» (**O7**). К классу «Более Защищенных ОС» отнесем «ОС Unix» (**O8**), а к классу «Менее Защищенных ОС» – «ОС MS\_Windows» (**O9**).

Пусть «КиберСистема» и «КиберПротивник» в рамках примера взаимодействуют только путем приема и передачи специальным образом сформированного «Сетевого Траффика» (**O10**).

Тогда очевидно, что ОС «Unix», которая потенциально может функционировать в составе «КиберСистемы», может «Формировать Сетевой Траффик ОС Unix» (**A1**), так как в ее составе реализована поддержка стека сетевых протоколов, а следовательно, она обладает и «Способностью Формировать Сетевой Траффик ОС Unix» (**P1**). Аналогично «ОС MS\_Windows» может «Формировать Сетевой Траффик ОС MS\_Windows» (**A2**), так как она обладает «Способностью Формировать Сетевой Траффик ОС MS\_Windows» (**P2**).

Сформированный «Сетевой Траффик ОС Unix» (**O11**) и «Сетевой Траффик ОС MS\_Windows» (**O12**) может быть передан соответствующими операционными системами [«Передача Сетевого Траффика ОС Unix (Менее Уязвимой ОС)» (**A3**) и «Передача Сетевого Траффика ОС MS\_Windows (Более Уязвимой ОС)» (**A4**)], так как перечисленные ОС являются сетевыми и имеют соответствующие возможности [«Способность Передавать Сетевой Траффик ОС Unix» (**P3**) и «Способность Передавать Сетевой Траффик ОС MS\_Windows» (**P4**)], что позволяет их отнести к классу «Систем Передачи Сетевого Траффика» (**O13**).

Поскольку стеки поддерживаемых сетевых протоколов в упомянутых ОС реализовывали разные организации (люди), то известно, что «Сетевой Траффик ОС Unix» отличается от «Сетевого Траффика ОС MS\_Windows» рядом параметров [«Параметров Передаваемых

Данных» (*P5*)], т. е. можно говорить о наличии определенных свойств у «Сетевого Траффика», сформированного различными ОС [«Параметры Сетевого Траффика ОС Unix» (*P6*) и «Параметры Сетевого Траффика ОС MS\_Windows» (*P7*)].

Пусть о «КиберПротивнике» известно лишь то, что он «Способен Передавать Сетевой Траффик КиберПротивника» (*P8*), так как он периодически осуществляет «Передачу Сетевого Траффика КиберПротивника» (*A5*), которую фиксируют «Снифферы Сетевого Траффика» (*O14*), обладающие «Способностью Принимать Сетевой Траффик КиберПротивника» (*P9*) и относящиеся к классу «Сенсоров КиберСистемы». Именно они осуществляют «Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника» (*A6*).

Далее, используя приведенные выше Концепты, а также предложенные ранее (в работе [7]) типы семантических звеньев (СЗ), применяемые для описания абстрактной предметной области, необходимо построить фрагмент онтологии, отражающий суть описанного выше примера. Если приведенные выше исходные данные представить графически, то построенный фрагмент онтологии будет выглядеть так, как это отображено на рис. 2.

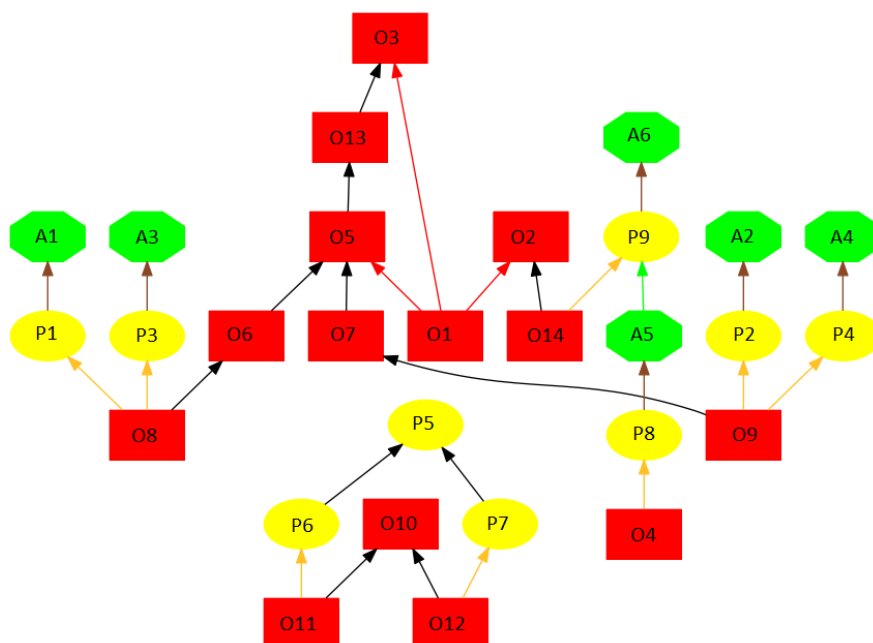


Рис. 2. Графическое отображение онтологии, описывающей киберсферу

Следует напомнить, что осуществление умозаключений гиromатом реализуется автоматически при занесении в онтологию каждого нового семантического звена, т. е. СЗ интегрируется в онтологию путем создания новых связей между концептами из состава предъявляемого СЗ и концептами уже представленными в онтологии.

На данном этапе важно продемонстрировать механизм объединения онтологий различных предметных областей (или различных фрагментов одной онтологии). В рамках указанного примера предлагается дополнительно рассмотреть предметную область, связанную, например, с поведением живых организмов в биосфере.

**Построение фрагмента онтологии, описывающего биосферу.** Известно [9], что мотыльки моли способны прислушиваться к крикам летучих мышей и издавать звуки невкусной для летучих мышей моли. Летучие мыши «понимают», что невкусных мотыльков можно узнать издали по звуку, чтобы даже не подлетать к ним и не тратить на них силы. Таким способом мотыльки моли (назовем их молью вкусной для летучих мышей) спасаются от хищника — от летучих мышей.

Описанный пример отражает способность моли принимать решения и действовать с определенным упреждением в отношении ожидаемых событий, которые могут негативно сказаться на ней. Исходя из этого можно утверждать, что данный пример является примером упреждающего поведения.

Перечни концептов и СЗ, применяемых для описания примера из Биосферы, приведены в табл. 1 и 2. В табл. 1 и 2 тип ребра «Аппрокс.-т» обозначает «Аппроксимирует» [7], а в табл. 2 в поле «Т» – тип концепта («О» – Объект, «С» – Свойство, «Д» – Действие).

Таблица 1

### Перечень Концептов, применяемых для описания биосферы

№	Тип концепта	Имя концепта
1	Объект	Летучая Мышь (ЛМ)
2	Объект	Хищник
3	Объект	Органы Передачи Звуков ЛМ
4	Объект	Звуковые Данные ЛМ
5	Объект	Эффекторы ЛМ
6	Объект	Моль
7	Объект	Жертва
8	Объект	Моль Вкусная для ЛМ
9	Объект	Более Предпочтительная Цель для ЛМ
10	Объект	Более Предпочтительная Цель
11	Объект	Органы Передачи Звуков Моли Вкусной для ЛМ
12	Объект	Эффекторы Моли Вкусной для ЛМ
13	Объект	Эффекторы Моли
14	Объект	Эффекторы
15	Объект	Органы Слуха Моли Вкусной для ЛМ
16	Объект	Сенсоры Моли Вкусной для ЛМ
17	Объект	Мозг Моли Вкусной для ЛМ
18	Объект	Интеллектуальная подсистема
19	Объект	Звуковые Данные Моли НЕВкусной для ЛМ
20	Объект	Звуковые Данные
21	Объект	Передаваемые Данные
22	Объект	Моль НЕВкусная для ЛМ
23	Объект	Менее Предпочтительная Цель для ЛМ
24	Объект	Менее Предпочтительная Цель
25	Свойство	Способность Принимать Звуковые Сигналы от ЛМ
26	Свойство	Способность Принимать Данные от Хищника
27	Свойство	Способность Формировать Звуковые Сигналы Моли НЕВкусной для ЛМ
28	Свойство	Способность Передавать Звуковые Сигналы Моли НЕВкусной для ЛМ
29	Свойство	Способность Передавать Звуковые Сигналы Летучей Мыши
30	Свойство	Параметры Звуковых Данных ЛМ
31	Свойство	Параметры Звуковых Данных Моли НЕВкусной для ЛМ
32	Свойство	Параметры Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели для Хищника
33	Действие	Прием Звуковых Сигналов от ЛМ
34	Действие	Прием Данных от Хищника
35	Действие	Формирование Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ
36	Действие	Формирование Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели
37	Действие	Передача Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ
38	Действие	Передача Данных Менее Предпочтительной Цели
39	Действие	Передача Звуковых Сигналов от ЛМ
40	Действие	Передача Данных от Хищника

Таблица 2

## Перечень семантических звеньев, применяемых для описания биосферы

№	T	Концепт 1	Тип ребра	T	Концепт 2
1	O	Более Предпочтительная Цель для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Более Предпочтительная Цель
2	O	Моль Вкусная для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Более Предпочтительная Цель для ЛМ
3	O	Более Предпочтительная Цель	Аппрокс.-т	O	Жертва
4	O	Менее Предпочтительная Цель	Аппрокс.-т	O	Жертва
5	O	Моль	Аппрокс.-т	O	Жертва
6	O	Звуковые Данные ЛМ	Аппрокс.-т	O	Звуковые Данные
7	O	Звуковые Данные Моли НЕВкусной для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Звуковые Данные
8	O	Мозг Моли Вкусной для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Интеллектуальная подсистема
9	O	Менее Предпочтительная Цель для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Менее Предпочтительная Цель
10	O	Моль НЕВкусная для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Менее Предпочтительная Цель для ЛМ
11	O	Моль Вкусная для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Моль
12	O	Моль НЕВкусная для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Моль
13	O	Звуковые Данные	Аппрокс.-т	O	Передаваемые Данные
14	O	Органы Слуха Моли Вкусной для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Сенсоры Моли Вкусной для ЛМ
15	O	Летучая Мышь (ЛМ)	Аппрокс.-т	O	Хищник
16	O	Эффекторы ЛМ	Аппрокс.-т	O	Эффекторы
17	O	Эффекторы Моли	Аппрокс.-т	O	Эффекторы
18	O	Органы Передачи Звуков ЛМ	Аппрокс.-т	O	Эффекторы ЛМ
19	O	Эффекторы Моли Вкусной для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Эффекторы Моли
20	O	Органы Передачи Звуков Моли Вкусной для ЛМ	Аппрокс.-т	O	Эффекторы Моли Вкусной для ЛМ
21	O	Моль Вкусная для ЛМ	Состоит из	O	Мозг Моли Вкусной для ЛМ
22	O	Летучая Мышь (ЛМ)	Состоит из	O	Органы Передачи Звуков ЛМ
23	O	Моль Вкусная для ЛМ	Состоит из	O	Органы Передачи Звуков Моли Вкусной для ЛМ
24	O	Моль Вкусная для ЛМ	Состоит из	O	Органы Слуха Моли Вкусной для ЛМ
25	C	Параметры Звуковых Данных Моли НЕВкусной для ЛМ	Аппрокс.-т	C	Параметры Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели для Хищника
26	C	Способность Принимать Звуковые Сигналы от ЛМ	Аппрокс.-т	C	Способность Принимать Данные от Хищника
27	D	Передача Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ	Аппрокс.-т	D	Передача Данных Менее Предпочтительной Цели
28	D	Передача Звуковых Сигналов от ЛМ	Аппрокс.-т	D	Передача Данных от Хищника
29	D	Прием Звуковых Сигналов от ЛМ	Аппрокс.-т	D	Прием Данных от Хищника
30	D	Формирование Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ	Аппрокс.-т	D	Формирование Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели
31	O	Звуковые Данные ЛМ	Обладает свойством	C	Параметры Звуковых Данных ЛМ
32	O	Звуковые Данные Моли НЕВкусной для ЛМ	Обладает свойством	C	Параметры Звуковых Данных Моли НЕВкусной для ЛМ
33	O	Моль Вкусная для ЛМ	Обладает свойством	C	Способность Передавать Звуковые Сигналы Моли НЕВкусной для ЛМ
34	O	Органы Передачи Звуков Моли Вкусной для ЛМ	Обладает свойством	C	Способность Передавать Звуковые Сигналы Моли НЕВкусной для ЛМ
35	O	Органы Передачи Звуков ЛМ	Обладает свойством	C	Способность Передавать Звуковые Сигналы Летучей Мыши
36	O	Моль	Обладает свойством	C	Способность Принимать Звуковые Сигналы от ЛМ
37	O	Органы Слуха Моли Вкусной для ЛМ	Обладает свойством	C	Способность Принимать Звуковые Сигналы от ЛМ
38	O	Мозг Моли Вкусной для ЛМ	Обладает свойством	C	Способность Формировать Звуковые Сигналы Моли НЕВкусной для ЛМ
39	O	Моль Вкусная для ЛМ	Обладает свойством	C	Способность Формировать Звуковые Сигналы Моли НЕВкусной для ЛМ

Окончание табл. 2

№	Т	Концепт 1	Тип ребра	Т	Концепт 2
40	С	Способность Передавать Звуковые Сигналы Моли НЕВкусной для ЛМ	Порождает способность к действию	Д	Передача Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ
41	С	Способность Передавать Звуковые Сигналы Летучей Мыши	Порождает способность к действию	Д	Передача Звуковых Сигналов от ЛМ
42	С	Способность Принимать Звуковые Сигналы от ЛМ	Порождает способность к действию	Д	Прием Звуковых Сигналов от ЛМ
43	С	Способность Формировать Звуковые Сигналы Моли НЕВкусной для ЛМ	Порождает способность к действию	Д	Формирование Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ
44	Д	Формирование Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ	Пригодно для воздействия на свойство	С	Параметры Звуковых Данных Моли НЕВкусной для ЛМ
45	Д	Передача Звуковых Сигналов от ЛМ	Пригодно для воздействия на свойство	С	Способность Принимать Звуковые Сигналы от ЛМ
46	Д	<b>Формирование Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ</b>	Следует за	Д	<b>Прием Звуковых Сигналов от ЛМ</b>
47	Д	<b>Передача Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ</b>	Следует за	Д	<b>Формирование Звуковых Сигналов Моли НЕВкусной для ЛМ</b>

Следует отдельно обратить внимание на то, что сам процесс, описанный в примере из биосферы, находит свое отражение всего лишь в двух связанных между собой СЗ, представленных в табл. 2 под номерами 46 и 47 (рис. 3). Большого требовать от оператора было бы неправильно.

В ходе же описания киберсферы и вовсе не был описан ни один процесс, состоящий более чем из одного действия, что примечательно и важно для описываемого примера.

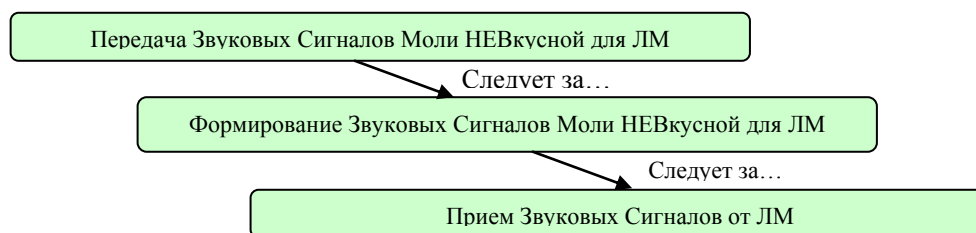


Рис 3. Представление описанного в онтологии процесса (биосфера)

Следующим этапом, который можно логически выделить в приводимом примере, является этап объединения двух фрагментов онтологии, описывающих кибер- и биосферу.

**Объединение различных фрагментов онтологии.** На самом деле, данный этап весьма условен ввиду того, что в случае заполнения данными одной онтологии оператор может сразу «вплетать» вносимые в онтологию СЗ. Объединение фрагментов онтологий может осуществляться несколькими путями.

*Первый* – внесение дополнительного концепта, являющегося надклассом для объединяемых концептов.



Например: «Сенсоры КиберСистемы» и «Сенсоры Моли Вкусной для ЛМ» можно разместить в решетке «Объекты» (в частично упорядоченном множестве) под концептом «Сенсоры» (используя роль «Аппроксимирует»), но для этого данный объединяющий концепт необходимо для начала внести в формируемую онтологию.

*Второй* – помещение концепта из одного фрагмента онтологии «под» концепт из другого фрагмента онтологии.

Например: концепт «Эффекторы КиберСистемы» из фрагмента онтологии, описывающего киберсферу, можно разместить как подкласс под концептом «Эффекторы» из фрагмента онтологии, описывающего биосферу.

Рекомендуется при встраивании концепта из одного фрагмента онтологии в другой осуществлять встраивание как можно ниже по иерархии концептов в частично упорядоченном множестве. Для этого необходимо осуществлять последовательный спуск вниз от наименьшей верхней грани по ребрам «Аппроксимирует». Подобный подход к встраиванию концептов в онтологию способствует более точному их упорядочиванию в онтологии, что в последующем более плодотворно сказывается на возможности осуществления правдоподобных умозаключений, а в конечном итоге – на полноте пополнения онтологии новыми логически выводимыми семантическими звеньями.

Пусть, например, для объединения двух описываемых фрагментов онтологий инженер по знаниям внесет один дополнительный концепт «Сенсоры» и объединит через него два подкласса: «Сенсоры КиберСистемы» и «Сенсоры Моли Вкусной для ЛМ» (т. е. введет две соответствующие роли), а также добавит еще шесть ребер (табл. 3).

Таблица 3

**Перечень семантических звеньев, применяемых для объединения двух фрагментов онтологии (биосферы и киберсферы)**

Объем понятия	Тип концепта №1	Вершина №1	Тип ребра	Тип концепта №2	Вершина №2
ALL	Объект	КиберПротивник	Аппр.-т	Объект	Хищник
ALL	Объект	Эффекторы КиберСистемы	Аппр.-т	Объект	Эффекторы
ALL	Действие	Формирование Сетевого Траффика ОС Unix (Менее Уязвимой ОС)	Аппр.-т	Действие	Формирование Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели
ALL	Действие	Передача Сетевого Траффика ОС Unix (Менее Уязвимой ОС)	Аппр.-т	Действие	Передача Данных Менее Предпочтительной Цели
ALL	Действие	Передача Сетевого Траффика КиберПротивника	Аппр.-т	Действие	Передача Данных от Хищника
ALL	Действие	Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника	Аппр.-т	Действие	Прием Данных от Хищника

Процедуру объединения двух рассматриваемых фрагментов онтологий можно продолжать дальше, объединяя и другие концепты. Чем более качественно осуществляется объединение фрагментов, тем больше правдоподобных умозаключений можно будет осуществить автоматически. Очевидно, что глубина объединения различных фрагментов онтологии зависит как от квалификации инженера по знаниям, так и от времени, имеющегося у него в наличии, на осуществление данной процедуры. Следует отметить, что к процедуре объединения (пополнения) онтологий можно вернуться в любое время.

В итоге фрагмент онтологии, описывающей киберсферу, пополнится семью концептами (табл. 4) и семью ребрами (табл. 5).

Таблица 4

**Перечень концептов, добавляемых инженером по знаниям во фрагмент онтологии, описывающей киберсферу, при ее объединении с фрагментом онтологии, описывающим биосферу**

№	Тип концепта	Сокращение	Имя концепта
1	Объект	<i>O15</i>	Сенсоры
2	Объект	<i>O16</i>	Эффекторы
3	Объект	<i>O17</i>	Хищник
4	Действие	<i>A7</i>	Формирование Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели
5	Действие	<i>A8</i>	Передача Данных Менее Предпочтительной Цели
6	Действие	<i>A9</i>	Прием Данных от Хищника
7	Действие	<i>A10</i>	Передача Данных от Хищника

Таблица 5

**Перечень семантических звеньев, добавляемых инженером по знаниям во фрагмент онтологии, описывающей киберсферу, при ее объединении с фрагментом онтологии, описывающим биосферу**

№	T	Концепт 1	Тип ребра	T	Концепт 2
1	O	Сенсоры КиберСистемы	Аппрокс.-т	O	Сенсоры
2	O	Эффекторы КиберСистемы	Аппрокс.-т	O	Эффекторы
3	O	КиберПротивник	Аппрокс.-т	O	Хищник
4	Д	Формирование Сетевого Траффика ОС Unix (Менее Уязвимой ОС)	Аппрокс.-т	Д	Формирование Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели
5	Д	Передача Сетевого Траффика ОС Unix (Менее Уязвимой ОС)	Аппрокс.-т	Д	Передача Данных Менее Предпочтительной Цели
6	Д	Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника	Аппрокс.-т	Д	Прием Данных от Хищника
7	Д	Передача Сетевого Траффика КиберПротивника	Аппрокс.-т	Д	Передача Данных от Хищника

Следует отметить, что и в пополненном фрагменте онтологии, описывающем киберсферу, так и нет описаний ни одного процесса.

В данном примере рассматривается вариант только отчасти автоматизированного объединения фрагментов онтологии, однако возможно реализовать более автоматизированное их объединение. Для этого необходимо формально определить порядок присвоения имен концептам, употребляемым в ходе построения онтологии, а также определить их синтаксис. Это позволит гиromату автоматически сравнивать имеющиеся названия концептов и как минимум объединять концепты, принадлежащие разным фрагментам онтологии, но имеющие одинаковые имена. Если составить соответствующий словарь синонимов, то гиromат сможет в результате проверки совпадения имен объединять концепты, относящиеся к одному классу синонимов.

Облегчить процесс объединения онтологий может применение онтологии (мета-онтологии), имена концептов которой не ассоциируются напрямую с какой-либо специфической проблемной областью, а имеют достаточно общий характер. Применение подобных концептов полезно при формировании наименьших верхних граней соответствующих решеток (т. е. применение их в качестве обобщающих понятий).

**Построение моделей процессов по аналогии.** К сформированной онтологии были применены правила логического вывода. Тогда количество порожденных СЗ значительно превысило количество СЗ, введенных операторами. Представление онтологии в виде графа, отражающего соответствующую семантическую сеть, в ряде случаев может быть более наглядным, если просматривать его фрагментарно, восприятие же целого графа (всей онто-

логии) весьма затруднительно даже для таких сравнительно небольших примеров, как приводимый (рис. 4).

В ходе осуществления гироматом правдоподобных умозаключений [6, 11] гиромат породил сценарий (последовательность действий), представленный на рис. 5. Порожденная последовательность действий состоит из концептов, принадлежащих наименьшей верхней грани решетки «Действия», а следовательно, указанная последовательность представляет собой не что иное, как сценарий, состоящий из классов (типов) определенных действий.

Далее, осуществляя спуск по частично упорядоченному множеству «Действий» и используя для этого СЗ из проблемной области киберсферы, можно построить вполне применимый в киберсфере сценарий (рис. 6).

Модель процесса, представленного на рис. 6, построена гироматом по аналогии. В основу построенной модели процесса положен процесс, показанный на рис. 3. Кроме того, используя достроенную онтологию и механизм распространения ассоциативного сигнала по APC [8], однозначно связанной с онтологией, можно получить более точную интерпретацию построенной гироматом модели поведения.

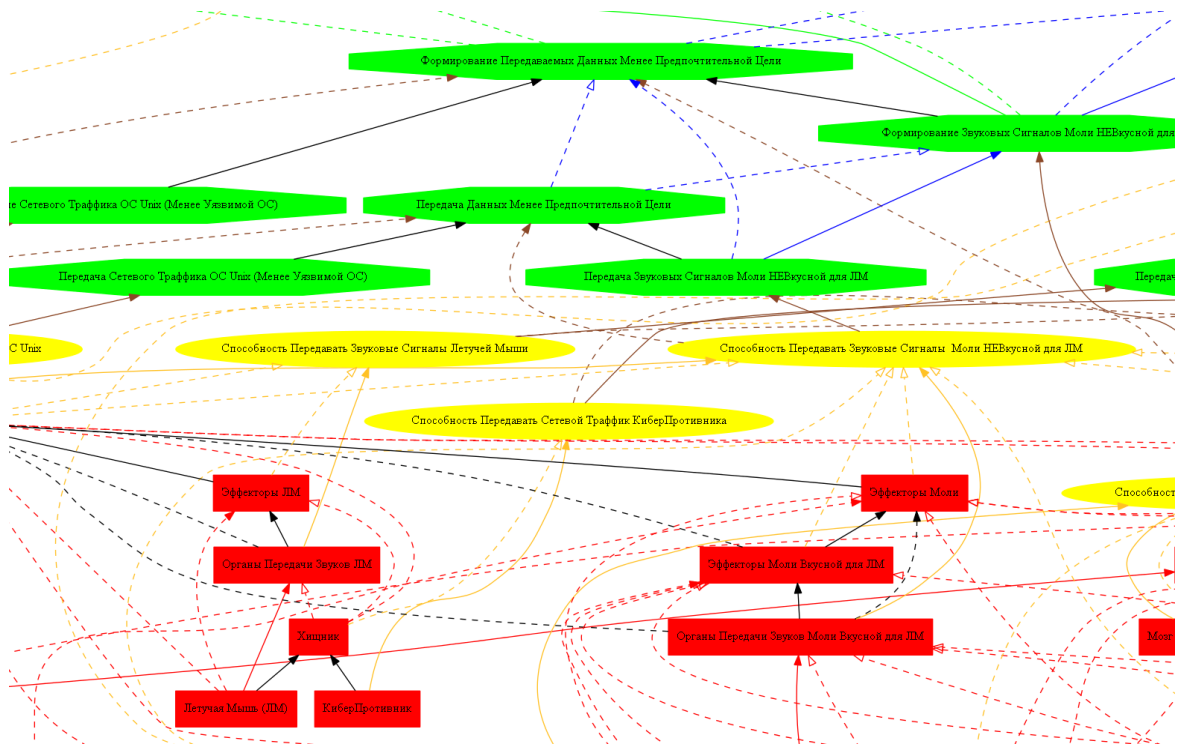


Рис. 4. Пример графического представления построенной онтологии (фрагмент)

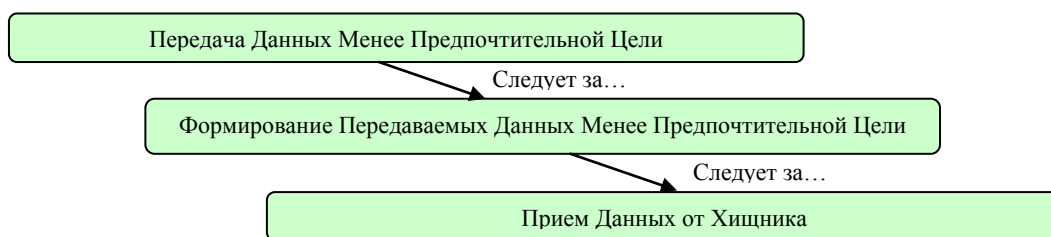
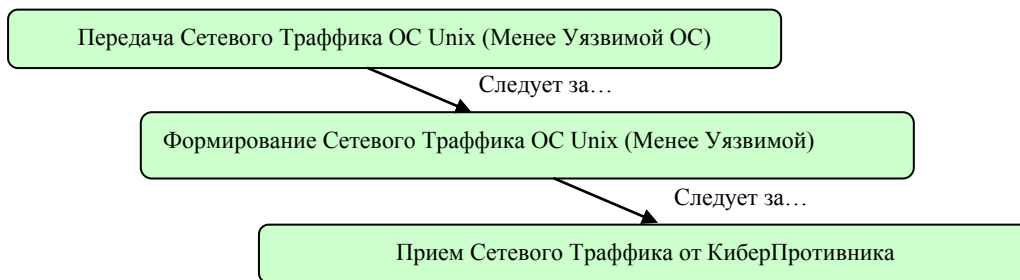


Рис. 5. Сценарий, порожденный гироматом на основе знаний, внесенных в него



*Рис. 6. Сценарий, порожденный гироматом по аналогии, на основе знаний из биосферы*

Сам вывод по аналогии возможен ввиду того, что все концепты («Объекты», «Свойства», «Действия») хранятся в БЗ в виде частично упорядоченных множеств. Это позволяет переходить от аппроксимирующего (видового) концепта из одной проблемной области через аппроксимируемый (родовой) к аппроксимируемому (видовому) концепту, но принадлежащему другой проблемной области (рис. 7). Поиск потенциального решения возникающих задач, таким образом, изначально осуществляется на более абстрактном уровне, а потом уже, при необходимости (и при возможности), найденное решение конкретизируется.

Пусть, например, в рамках рассматриваемого выше примера, запрос к гиромату сводится к инициированию всего одного узла: «Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника».

«Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника» КиберСистемой возможен, так как КиберСистема обладает соответствующей способностью, реализованной в некоторых Сенсорах КиберСистемы, а именно в Сниффере Сетевого Траффика. Далее КиберСистема должна осуществить «Формирование Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели», а именно осуществить «Формирование Сетевого Траффика ОС Unix (Менее Уязвимой ОС)». Данное формирование сетевого трафика, как и последующую его передачу, могут осуществить некоторые «Эффекторы КиберСистемы», такие, например, как «Система Передачи Сетевого Траффика». Именно она способна осуществить «Передачу Данных Менее Предпочтительной Цели».

Пусть киберсистема оснащена реально функционирующим сенсором (сниффером сетевого трафика), способным осуществлять прием, анализ и распознавание среди принимаемых протокольных блоков данных (ПБД) тех ПБД, которые следует отнести к сетевому трафику. Такой сетевой трафик порожден атакующей стороной, а также реальными эффекторами, способными формировать (модифицировать) и передавать собственные ПБД, которые по внешним признакам схожи с ПБД, формируемыми ОС Unix. Тогда система сможет не только строить модели возможного собственного поведения, но и осуществлять реальное выполнение последовательности конкретных действий.

В приведенном выше примере объединение двух фрагментов онтологии производилось в основном путем внесения СЗ, упорядочивающих «Действия» (см. табл.3). Результат схожий тому, который получен выше, можно получить и другим путем, например, осуществив объединение онтологий, внося СЗ, упорядочивающие «Свойства» (рис. 8). При этом количество порождаемых решений может быть больше, а следовательно, запрос к гиромату для извлечения модели нужного решения необходимо формировать более конкретно (чтобы правильным образом направить «Фокус Внимания» [10]).

Вполне очевидно, что чем более глубокая взаимная интеграция объединяемых фрагментов онтологии будет произведена, тем более точно будет осуществлен вывод решений (задач), найденных гироматом по аналогии.

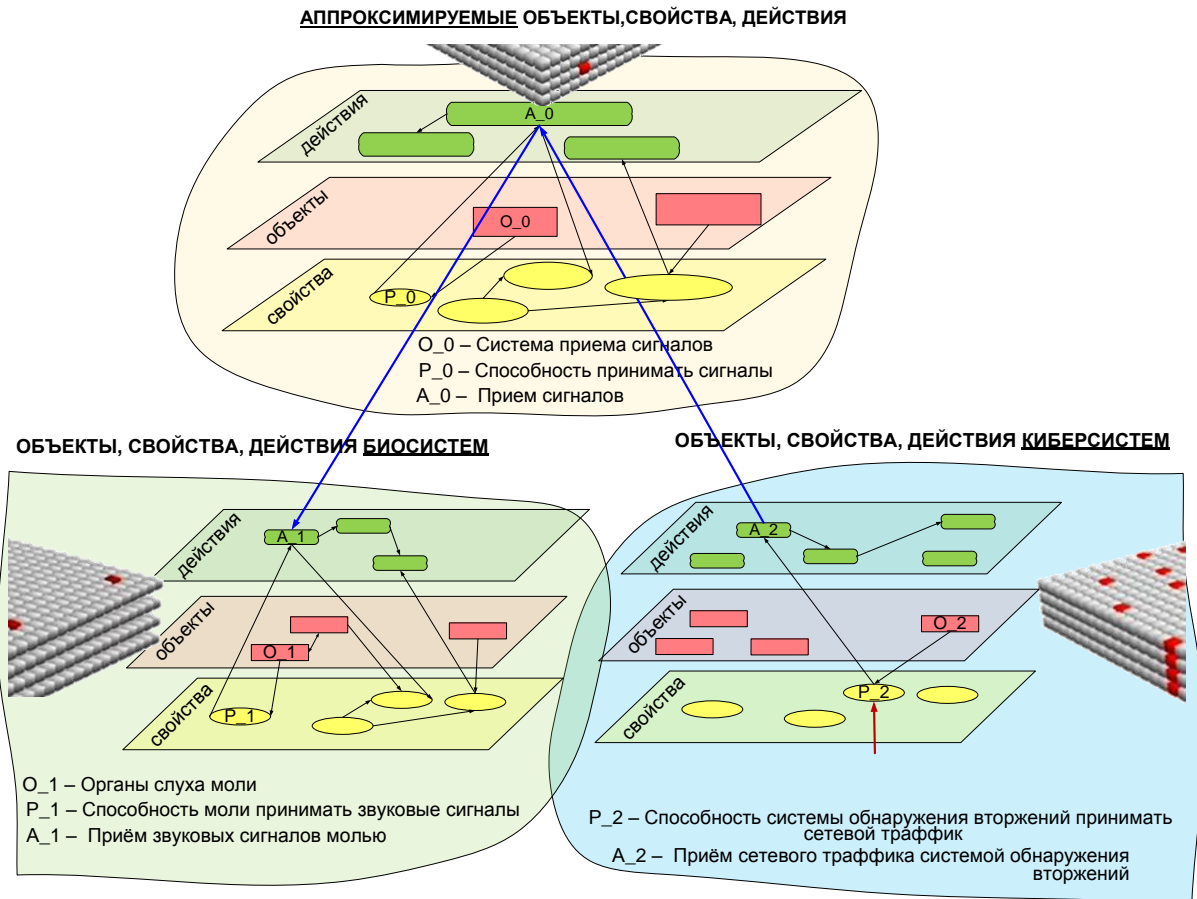


Рис. 7. Пример перехода от аппроксимирующих концептов к аппроксимируемым

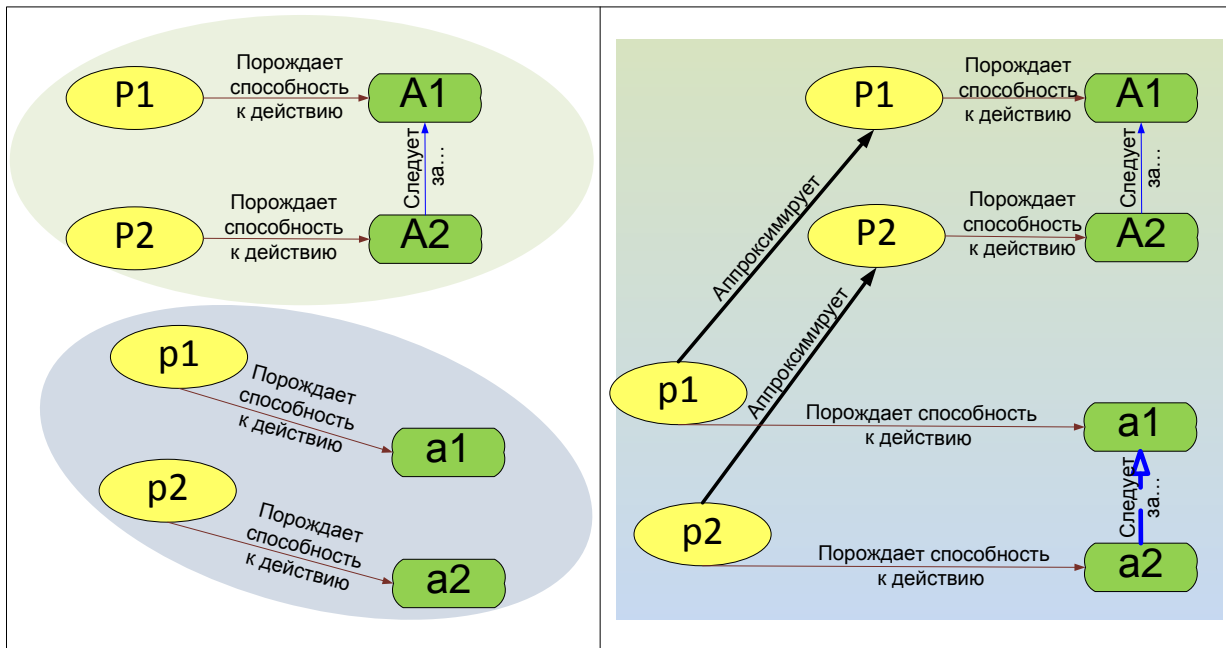


Рис. 8. Пример объединения двух независимых фрагментов онтологии путем внесения СЗ, упорядочивающих «Свойства»

В то же время следует понимать, что как и человек способен сделать выводы, не соответствующие действительности, на основе недостоверных данных, так и интеллектуальная система может породить логически верные, но не совпадающие с действительностью выводы, основанные на некорректно введенной в онтологию информации. Следовательно, будет весьма самонадеянным ожидать от интеллектуальной системы корректных выводов, основанных на некорректных данных, введенных в нее.

В целом приведенный выше пример демонстрирует:

– возможность описания объектов и процессов различных предметных областей путем использования предложенных типов концептов и ролей [7] (что не исключает возможности расширения их перечня);

– способность гиromата производить автоматическое пополнение сформированной онтологии новыми СЗ, полученными в результате осуществления им правдоподобных умозаключений [6] (перечень правил построения новых СЗ из существующих может при необходимости быть расширен);

– принципиальную возможность автоматического построения моделей процессов, аналогичных тем моделям, которые представлены в памяти гиromата [11] (формируемые модели процессов могут описывать как поведение наблюдаемых гиromатом систем, так и поведение самого гиromата).

## **ПРИМЕРЫ СПЕЦИФИКАЦИЙ ПРОЦЕССОВ, ПОСТРОЕННЫХ ГИРОМАТОМ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ВЫВОДОВ ПО АНАЛОГИИ**

**Пример построения модели защиты от возможных КА.** Хорошо известно, что чем более подробно описана задача (точно построен запрос), тем на более точное решение можно рассчитывать. Не является исключением и работа оператора с гиromатом.

Допустим, в БЗ присутствует информация о более и менее уязвимых:

- Web-Серверах;
- Web-Браузерах;
- Системах Управления Базами Данных (СУБД);
- Операционных Системах.

Все перечисленные программные средства имеют возможность участвовать в информационном обмене путем приема и передачи определенным образом сформированного сетевого трафика. Данный факт также содержится в БЗ гиromата.

Пусть в гиromат оператором заложен фрагмент онтологии, описывающий поведение биоорганизмов в рамках модели «Моль» (см. выше), по итогам работы с которым порождена стратегия поведения, представленная последовательным выполнением трех действий (см. рис. 6):

1. «Прием Данных от Хищника».
2. «Формирование Передаваемых Данных Менее Предпочтительной Цели».
3. «Передача Данных Менее Предпочтительной Цели».

Тогда в результате вывода «по аналогии» гиromат способен построить следующую стратегию поведения в киберсфере (вывод осуществляется аналогично выводу, приведенному в качестве примера выше):

1. «Прием Данных от Кибер-Противника».
2. «Формирование Передаваемого Сетевого Трафика Менее Уязвимого Сетевого Программного Обеспечения».
3. «Передача Сетевого Трафика От Лица Менее Уязвимого Сетевого Программного Обеспечения».

Далее, на основе построенной типовой модели поведения Киберсистемы (в рамках модели «Моль») Гиромат способен породить сразу ряд частных моделей, некоторые примеры которых приведены ниже.

1. При приеме запросов к Web-серверу осуществлять формирование (модифицирование) и передачу ответного сетевого трафика от лица более защищенного Web-сервера.

2. При обращении к Web-серверу Кибер-Противника осуществлять формирование и передачу данных от лица более защищенного Web-браузера.

3. При обнаружении сканирования Кибер-Противником сетевого порта СУБД MySQL (порт 3306) передавать данные о его недоступности, а при сканировании сетевого порта СУБД Oracle (порт 1521) – передавать данные о его доступности (исходные данные: в рамках защищаемой Киберсистемы функционирует СУБД MySQL).

4. При приеме сетевого трафика от субъектов сетевого взаимодействия с IP-адресами, не соответствующими разрешенным (допустимым) адресам, формировать (модифицировать) параметры протокольных блоков данных, с целью сокрытия истинной ОС, и далее передавать ПБД в сеть.

Порядок порождения гироматом частных моделей зависит от параметров APC, так как именно пропускная способность ребер APC и яркость ее вершин влияют на порядок, направление и глубину распространения ассоциативного сигнала по APC, а следовательно, и на порядок порождения новых решений.

В том случае, если конкретизировать запрос, указав, например, что на защищаемом ресурсе находится Web-Сервер и системой сенсоров обнаружен запрос типа «Get», то гироматом первой будет порождена модель процесса, соответствующая первому из описанных примеров.

Надо отметить, что только нахождения спецификаций процессов, потенциально пригодных для реализации их Киберсистемой, недостаточно, так как необходимо также учитывать и динамику развития наблюдаемых и потенциально реализуемых процессов. При учете динамики развития процессов необходимо осуществлять обработку длительностей мероприятий, входящих в процессы. Описание ряда различных длительностей может находиться в памяти гиромата, однако в ряде случаев может потребоваться их дополнение или обновление (уточнение), а также может потребоваться уточнение данных, находящихся в памяти Гиромата.

В ходе апробации функциональных возможностей гиромата, в котором реализованы предложенные методы обработки знаний [6–8, 11], выполнялось построение различных спецификаций процессов. В ряде случаев осуществлялось многократное описание одних и тех же процессов, но в различных терминах (именах концептов). При этом количество концептов, применяемых для описания моделируемых процессов, от эксперимента к эксперименту отличалось. Данный факт вполне очевиден, так как практически невозможно описать сложные процессы в разные моменты времени, используя один и тот же словарь терминов, если, конечно, не преследовать именно такую цель. Также в ряде экспериментов проводилось построение спецификаций моделируемых процессов с осуществлением интенционального расширения области определения.

Так, например, в результате осуществления вывода новых знаний по аналогии в ходе экспериментов гироматом было порождено ряд спецификаций процессов различного уровня абстракции, две из которых представлены на рис. 9 в верхней части.

Построенные гироматом спецификации процессов далее предоставляются эксперту (оператору). В дальнейшем эксперт может дополнить сформированные гироматом спецификации исходя из решаемых (изменяющихся) задач. Так, например, эксперт может дополнить сформированные спецификации данными о мероприятиях, представленных в нижней части рис. 9 (мероприятия b, c, d, c1, c2, c3).



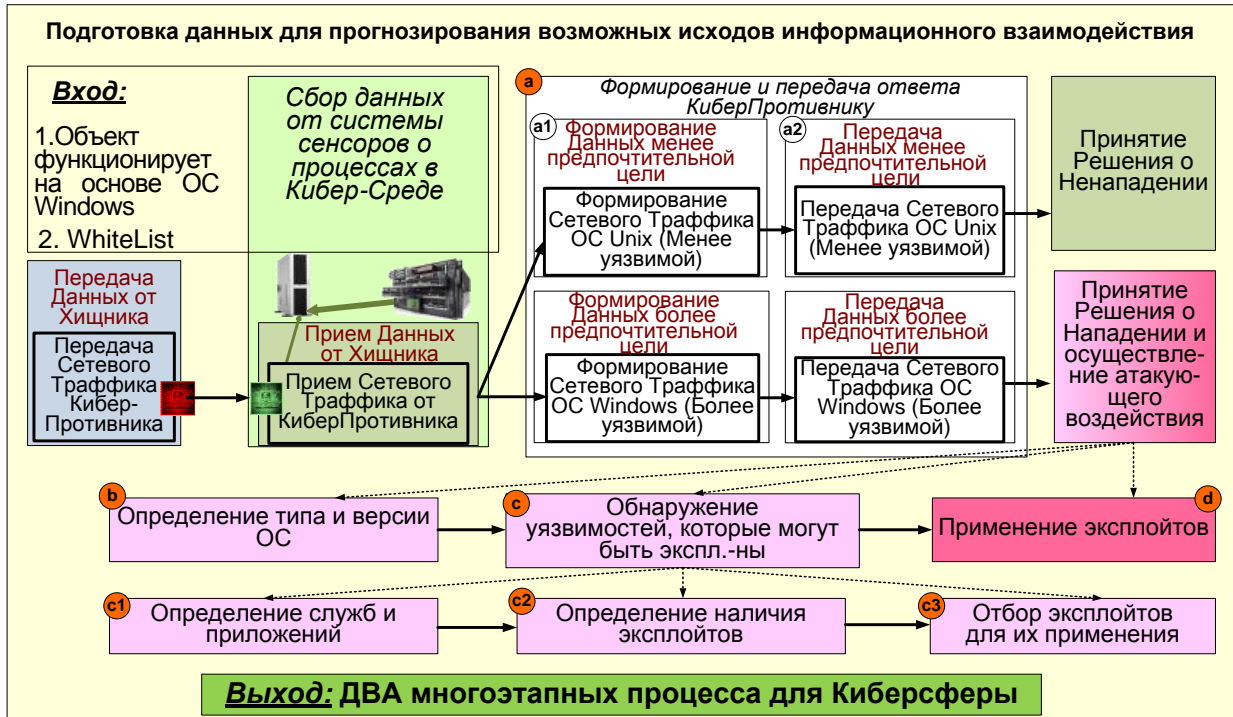


Рис. 9. Результат работы гиромата по построению спецификаций процессов, найденных по аналогии

**Отбор спецификаций процессов, потенциально приводящих к упреждению КА.** Как можно заметить, в оригинале на результат отбора спецификаций процессов, потенциально приводящих к упреждению КА, должна влиять не только информация, находящаяся в памяти гиромата, но и данные, поступающие на вход Киберсистемы через сенсоры. Именно результаты наблюдения за процессами, протекающими в киберпространстве, инициируют процедуру первичного отбора спецификаций.

Первым шагом рассматриваемого этапа является проверка соответствия входных данных, полученных от системы сенсоров, исходным моделям прогнозируемых потенциально опасных протекающих процессов, отраженным в онтологии.

В рамках рассматриваемого примера входными данными является информация о том, что система Сенсоров осуществила прием сетевого траффика от КиберПротивника:  $A' = \{a'_1\}$ ;  $a'_1 = \{\text{“Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника”}\}$ . Данное мероприятие, в рамках рассматриваемого выше примера, принадлежит единственному процессу, который потенциально может завершиться с негативными для Киберсистемы последствиями:  $A^- = \{A_1^-\}$ ;  $A_1^- = \langle \text{“Передача Сетевого Траффика КиберПротивника”}, \text{“Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника”}, \text{“Формирование Сетевого Траффика ОС Windows (Более уязвимой)”}, \text{“Передача Сетевого Траффика ОС Windows (Более уязвимой)”}, \text{“Принятие Решения о Нападении и осуществление атакующего воздействия”} \rangle$ .

Так как на вход Киберсистемы поступили данные только об одном мероприятии, то проверять соответствие порядка следования выявленных через систему сенсоров мероприятий и мероприятий, представленных в моделях гиромата, не надо.

Таким образом, выходом первого шага этапа по отбору спецификаций процессов, потенциально приводящих к упреждению КА на защищаемый объект, является спецификация, которую можно представить следующим образом:



$A_1^- = \langle \text{“Передача Сетевого Траффика КиберПротивника”}, \text{“Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника”}, \text{“Формирование Сетевого Траффика ОС Windows (Более уязвимой)”}, \text{“Передача Сетевого Траффика ОС Windows (Более уязвимой)”}, \text{“Принятие Решения о Нападении и осуществление атакующего воздействия”} \rangle$ .

*Вторым шагом* рассматриваемого этапа является определение перечня мероприятий (действий), способных изменить ход развития потенциально реализуемых негативных процессов.

В рамках рассматриваемого примера к процессам, которые могут потенциально завершиться с приемлемым (более приемлемым) для Киберсистемы результатом, можно отнести один процесс:  $A^+ = \{A_1^+\}$ ;  $A_1^+ = \langle \text{“Передача Сетевого Траффика КиберПротивника”}, \text{“Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника”}, \text{“Формирование Сетевого Траффика ОС Unix (Менее уязвимой)”}, \text{“Передача Сетевого Траффика ОС Unix (Менее уязвимой)”}, \text{“Принятие Решения о НЕНападении”} \rangle$ .

В представленной спецификации за мероприятием  $\tilde{a}_M = \text{“Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника”}$  следует мероприятие, выполняемое Киберсистемой:  $a_{m+1}^+ = \text{“Формирование Сетевого Траффика ОС Unix (Менее уязвимой)”}$ . Именно данное мероприятие и является тем мероприятием, которое способно потенциально изменить ход возможно реализуемого негативного процесса.

Таким образом, в итоге выполнения рассматриваемого этапа гиромат предложит оператору единственную отобранную спецификацию процесса (в рамках рассматриваемого примера), способного осуществить предотвращение возможной КА на защищаемый объект:

$\langle \text{“Передача Сетевого Траффика КиберПротивника”}, \text{“Прием Сетевого Траффика от КиберПротивника”}, \text{“Формирование Сетевого Траффика ОС Unix (Менее уязвимой)”}, \text{“Передача Сетевого Траффика ОС Unix (Менее уязвимой)”}, \text{“Принятие Решения о НЕНападении”} \rangle$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования, направленные на поиск путей расширения возможностей современных средств предотвращения компьютерных атак, позволили разработать подход к наделению интеллектуальных киберсистем способностью осуществлять правдоподобные выводы по аналогии и пополнять базу знаний знаниями о потенциально реализуемых нарушителем процессах, а также знаниями о процессах, выполнив которые потенциально можно предотвратить негативные последствия от возможных компьютерных атак.

Рассмотренный в статье пример наглядно демонстрирует возможность переноса знаний из одной проблемной области в другую, а именно, показывает реализуемость автоматизированного переноса знаний о выигрышных стратегиях поведения в биосфере в область обеспечения информационной безопасности.

Как представляется, развитие и применение предложенного подхода должны способствовать наделению современных средств обеспечения информационной безопасности признаками искусственного интеллекта. При этом следует заметить, что решения, предлагаемые интеллектуальной КиберСистемой и формируемые на основе применения предложенного подхода, могут быть интерпретированы лицами принимающими решения, а ход формирования этих решений может быть проверен и уяснен.

## Список используемых источников

1. Котенко И.В., Шоров А.В., Нестерук Ф.Г. Анализ биоинспирированных подходов для защиты компьютерных систем и сетей // Труды СПИИРАН. – 2011. – № 3(18). – С. 19–73.

2. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г.* Построение систем информационной безопасности: от живых организмов к киберсистемам // Защита информации. INSIDE. – 2013. – № 2. – С. 61–65.
3. *Жуков В.Г.* Модель синтеза биоинспирированных алгоритмов решения задачи обнаружения инцидентов информационной безопасности в автоматизированных системах // В мире научных открытий. – 2013. – № 10(46). – С. 142–156.
4. *Чернышев Ю.О., Сергеев А.С., Дубров Е.О.* Информационная безопасность и биоинспирированные алгоритмы решения задач криптоанализа // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2014. – № 1. – С. 342–346.
5. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Ростовцев Ю.Г.* Облик антиципирующих систем предотвращения рисков реализации киберугроз // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 2(39). – С. 5–25.
6. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Жолус Р.Б.* Пополнение онтологических систем знаний на основе моделирования умозаключений с учетом семантики ролей // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 4(47). – С. 105–129.
7. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г.* Денотационная семантика контекстов знаний при онтологическом моделировании предметных областей конфликта // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 5(42). – С. 155–179.
8. Модель изменения доступности знаний, представленных в памяти киберсистемы, обеспечивающей нейтрализацию деструктивных воздействий на объекты критической информационной инфраструктуры / Д.Н. Бирюков [и др.] // Научные технологии в космических исследованиях Земли: журн. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 56–63.
9. *Barber J.R. and Conner W.E.* Acoustic mimicry in a predator–prey interaction // Proceedings of the National Academy of Sciences 104(22): 9331–9334. – 2008. – Retrieved September 18.
10. *Бирюков Д.Н.* Когнитивно-функциональная спецификация памяти для моделирования целенаправленного поведения киберсистем // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 3(40). – С. 55–76.
11. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Сабиров Т.Р.* Абдуктивный синтез структур функциональных типов сценариев для установления аналогий в многомодельной концептуально-онтологической системе знаний // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 4(53). – С. 140–159.

Д.Н. Бирюков\*,  
доктор техн. наук, доцент;  
С.Л. Лебедев\*\*;  
И.К. Самохвалов\*;  
И.А. Холинов\*

\*ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург;

\*\* Военная часть 35565, г. Москва

## **ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АУДИТА ОБЪЕКТОВ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Рассмотрена задача автоматизированного анализа защищенности телекоммуникационного оборудования и сетевого программного обеспечения. Предложен подход к созданию программного комплекса, учитывающего недостатки схожих продуктов на рынке информационных технологий.

Ключевые слова: телекоммуникационное оборудование, сетевое программное обеспечение, анализ защищенности, аудит, компьютерные атаки, критическая информационная инфраструктура, информационная безопасность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

С увеличением роста компьютерных атак на информационные системы, являющиеся частью критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (КИИ), возрастает необходимость проведения детальных проверок уровня информационной защищенности элементов сетевой инфраструктуры КИИ. Существующие подходы не всегда могут обеспечить необходимый уровень проверок. Предложенный подход к аудиту телекоммуникационного оборудования и сетевого программного обеспечения не только учитывает недостатки предшествующих инструментов, но и позволяет имитировать действия атакующего, что в итоге обеспечивает снижение количества возможных реализуемых сетевых компьютерных атак, приводящих к компрометации узлов сети и к нарушению функционирования КИИ.

### **АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ЗАЩИЩЕННОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СЕТЕВОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Для повышения уровня безопасности телекоммуникационного оборудования и сетевого программного обеспечения представляется целесообразным, в общем случае, решить следующие задачи:

- исследовать принципы поиска известных уязвимостей в сетевом программном обеспечении и в программном обеспечении телекоммуникационного оборудования;
- провести сравнительный анализ функциональных возможностей существующих программных средств автоматизированного анализа защищенности информационных систем (сканеров уязвимостей);
- сформулировать требования и разработать на их основе программное средство аудита элементов сетевой инфраструктуры.

Для проверки настроек оборудования пакетной коммутации, как правило, применяют следующие коммерческие средства:

– Nipper Studio [1], он анализирует конфигурационные файлы различных устройств и выдает рекомендации для улучшения защиты. Также в него добавлены проверки настроек Web-сервисов, систем журналирования событий, правил межсетевого экрана, IPS (Intrusion Prevention System – система предотвращения вторжений). Для каждого из поддерживаемых устройств проверяются уникальные уязвимости, характерные для конкретного продукта;

– Epros ConfigInspector [2] – отечественный программный комплекс, предназначенный для контроля конфигураций и состояния рабочей среды сетевого оборудования, средств защиты информации, платформ виртуализации и операционных систем, который разработан компанией «Газинфорсервис». Отличительной особенностью данного продукта является возможность создания своих проверок безопасности на базе механизма регулярных выражений и генерации отчетов для администрирования и руководства;

– CIS Router Audit Tool – это небольшая консольная утилита, которая обладает возможностью выгрузки конфигурации с устройств Cisco, проведения проверки их на соответствие политик CIS (Center of Internet Security) и генерации простых отчетов, без предоставления рекомендаций к устранению уязвимостей.

Для предупреждения возможных негативных последствий, возникающих из-за проведения компьютерных атак, существует широкий ряд инструментов по обнаружению дефектов и уязвимостей, а также по составлению рекомендаций по их устранению.

Каждый из рассмотренных ниже программных комплексов обладает теми или иными преимуществами при сравнении друг с другом. Например, XSpider [3] – инструмент, разработанный компанией «Positive Technologies» – помимо стандартных проверок в виде сканирования портов и выявления сетевых сервисов на случайных портах предоставляет возможность для фаззинга, проведения сканирований по расписанию со сравнением результатов предыдущих проверок.

Одним из преимуществ сканера *RedCheck* [4] является поддержка протокола управления данными безопасности SCAP. Он включает в себя список типовых конфигураций, типовые уязвимости и ошибки конфигурации, язык описания уязвимостей. Все эти данные получают-ся из репозитория контента информационной безопасности OVALdb.

Наиболее известный зарубежный сканер – это *Nessus* [5]. Его особенность заключается в том, что для проведения проверок был создан и применяется специальный скриптовый язык NASL, который позволяет легко и быстро писать новые тесты для Nessus-сканирования, не погружаясь во внутреннее устройство программного комплекса и не занимаясь сложными программными реализациями. Одной из важных особенностей является возможность сбора списка поддерживаемых телекоммуникационным оборудованием (ТКО) команд.

*Nessus-a* – OpenVAS [6]. Широко применяется этот дочерний проект, отличие от предыдущего сканера заключается в том, что такой продукт является полностью открытым. Среди достоинств, в том числе интеграция немалого количества известных утилит: Nikto [7] – для поиска уязвимых CGI-сценариев, nmap – для сканирования портов, ike-scan – для обнаружения IPSEC VPN узлов, amap – для идентификации сервисов на портах, используя fingerprinting;

*Acunetix* – один из наиболее эффективных сканеров уязвимостей web-серверов. Поскольку управление сетевым оборудованием в подавляющем большинстве случаев осуществляется через web-интерфейс, то его роль достаточно существенна и в сфере обеспечения безопасности ТКО.

Выше представлен, конечно, не весь перечень существующих средств аудита, однако анализ возможностей приведенных программных комплексов позволяет судить о возможностях типовых часто применяемых решений. Несмотря на широкий спектр функций рассмотренных инструментов, существует ряд требований, которые не позволяют отдать предпочтение ни одному из средств, так как они не способны в той или иной степени их (требования) удовлетворить. Выявлены и общие недостатки:

- отсутствие исходных текстов многих сканеров, что является главным препятствием для прохождения сертификации и, как следствие, для дальнейшего использования в российских государственных структурах;

- отсутствие инвентаризации ТКО и возможности выкачивания файлов с оборудования. Указанный функционал позволил бы точно определить версию операционной системы, а также сравнить значения хеш-суммы загруженного программного обеспечения из памяти маршрутизатора со значением хеш-суммы эталонной версии программного обеспечения (различие в полученных значениях может свидетельствовать о внесении закладных функций в программное обеспечение), проверить электронные регистрационные журналы на наличие в них записей о подключении к оборудованию, копированию настроек и программного обеспечения на TFTP-сервер (загрузки с TFTP-сервера), настройки учетных записей, осуществить поиск информации об ошибках, авариях в работе программного обеспечения и аппаратных модулей, а также проверить настройки функций межсетевое экранирования в соответствии с политикой безопасности, исследовать полученные данные о конфигурации (например, с помощью Router Audit Tool);

- невозможность использовать базу данных уязвимостей Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК);

- привязка к конкретной операционной системе;

- статичность программного комплекса, т. е. отсутствие возможности масштабирования и расширения функционала программного обеспечения (ПО), а также перенастройки существующих модулей проверок в соответствии с нуждами пользователей;

- отсутствие функции проигрывания заранее записанного трафика на интерфейс сетевого устройства (программного обеспечения) с последующим анализом работоспособности; указанный модуль позволил бы проверить объект исследований на наличие ряда специфических уязвимостей CVE (Common Vulnerabilities and Exposures), например – CVE-2003-0001, заключающихся в том, что драйверы некоторых Ethernet-адаптеров не дополняют фреймы нулевыми байтами, что позволяет злоумышленникам получать информацию из предыдущих пакетов или памяти ядра, используя искаженные пакеты.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ**

Для проведения аудита сетевых элементов сетевой инфраструктуры предлагается применять комбинацию из двух известных подходов:

- пассивный анализ, представляющий собой определение уязвимостей на основе анализа косвенных признаков, таких, например, как признаки, проявляющие себя в сетевом трафике от запущенных служб на открытых портах;

- активный анализ, позволяющий имитировать действия атакующего.

Перечисленные подходы позволяют в совокупности, в общем случае, реализовать методы анализа и оценивания уровня защищенности информационно-телекоммуникационных систем от потенциальных компьютерных атак. Однако процесс выявления новых уязвимостей специалистами, работающими в области обеспечения информационной безопасности, не прерывается, но и нарушители постоянно дорабатывают методики проведения сетевых компьютерных атак. На этом фоне заметно отставание производителей программных средств, позволяющих выявлять уязвимости в программных и аппаратно-программных элементах сетевой инфраструктуры, а также давать рекомендации по их нейтрализации. Поэтому был предложен подход, предполагающий создание модульного программного средства проведения аудита информационной безопасности телекоммуникационного оборудования и сетевого программного обеспечения, которое может быть модифицировано (доработано/обновлено) путем наращивания перечня реализуемых проверок (аудитов) без изменения исходных кодов основного ядра программного комплекса.

В качестве подходов к решению задачи пассивного аудита необходимо выделить следующие обязательные составляющие:

- добавление в программное средство модулей-обработчиков, осуществляющих конкретные проверки, без изменения его исходного кода;
- осуществление проверок с помощью применения механизма, задаваемого регулярными выражениями;
- осуществление проверок с помощью разрабатываемых сторонних исполняемых модулей (для проверок, которые не могут быть реализованы посредством применения регулярных выражений).

Перечисленные подходы позволят реализовать метод анализа и оценки уровня защищенности информационно-телекоммуникационных систем от потенциальных компьютерных атак.

Для того чтобы проектируемое и создаваемое программное средство могли выполнять свои задачи, необходимо разработать систему реализации проверок конфигурационных файлов на уязвимости. Зачастую к таким уязвимостям относятся неправильно конфигурируемые сервисы или же параметры, выставляемые по умолчанию.

Одним из важных вопросов, который необходимо решить, является вопрос трансляции конфигурационных файлов после их выгрузки. В связи с тем, что структура таких файлов различная для каждого производителя, необходимо разработать систему плагинов, где для каждого типа устройства будут разрабатываться небольшие проверочные модули (например, на языке Python), которые должны осуществлять проверку на наличие уязвимых параметров. Должна иметься возможность комбинирования данных модулей пользователем в соответствующие листы проверки – для организации проверки соответствия настроек оборудования конкретным требованиям по информационной безопасности, таким способом представляя возможность проведения комплексного аудита.

Практически для любого вида телекоммуникационного оборудования (исключение составляет то оборудование, у которого конфигурационные файлы зашифрованы) любой частный или общий параметр можно проверять при помощи модуля. При помощи регулярных выражений в конфигурационных файлах возможно обнаружить и проверить до 90% параметров, однако может понадобиться и более детальный анализ, предполагающий реализацию нескольких циклов применения таких выражений или трансляции синтаксиса, применяемого при описании настроек в конфигурационном файле. Общая схема реализации описанной модульной структуры представлена на рис. 1.

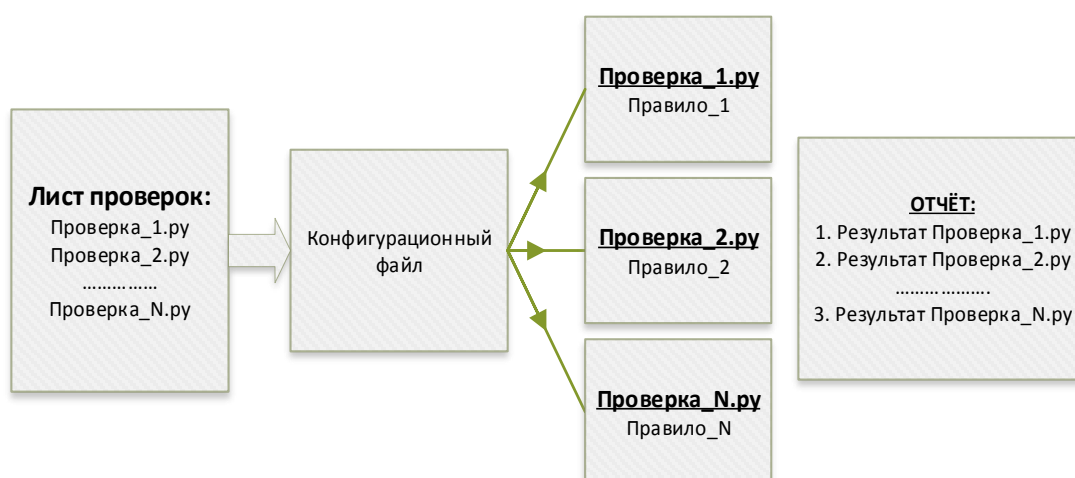


Рис. 1. Общая архитектура реализации проверок посредством применения системы модулей

Модульная система позволяет дополнять программное средство новыми проверками-аудитами под конкретную задачу. Это возможно делать без участия разработчиков, создавших данное программное средство, и без высококвалифицированных программистов: достаточно лишь небольших знаний скриптовых языков и представления проверяемого параметра в конфигурационном файле.

Разработанный же прототип программного комплекса [8], реализующего подход в области активного аудита, содержит следующие модули:

- *модули-обработчики* (исполнители), отвечающие за выполнение конкретной задачи по сбору информации о хосте, определении версии служб, эксплуатации отдельных уязвимостей;

- *модули-трансляторы*, обеспечивающие передачу данных между вышеуказанными модулями, контролирующие ввод/вывод с учетом их особенностей.

Использование механизма, состоящего из связок модулей и трансляторов, позволяет создать и настроить каждую проверку безопасности элементов сетевой инфраструктуры. Конечная последовательность модулей и трансляторов называется ветвью аудита (рис. 2).

Таким образом, у исследователя появляется возможность самостоятельно на основании своих навыков и доступной информации составить нужные ветви аудита и провести соответствующие проверки, не дожидаясь обновления рассмотренных выше программных средств, которые широко применяются для осуществления аудита. Следует отметить, что некоторые из них обновляются крайне редко.

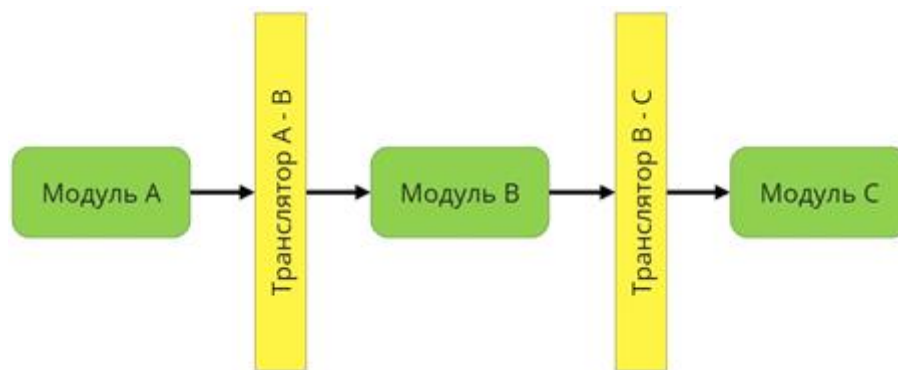


Рис. 2. Схема ветви аудита

Набор ветвей проверок безопасности представляет собой дерево аудита, показанное на рис. 3. Деревья аудитов составляют экспертные шаблоны проверок, настраиваемые в зависимости от модели тестируемого сетевого оборудования, запущенных на нем служб и их версий.

Взаимодействие между всеми компонентами комплекса осуществляется при помощи веб-фреймворка Django языка программирования Python. Выбор именно этого фреймворка был обоснован наличием механизмов предотвращения распространенных атак (SQL-инъекции, межсайтовый скриптинг, подделки межсайтовых запросов), а также удобным доступом к базам данных за счет технологии ORM (Object-Relational Mapping), которая сводит взаимодействие с базой данных до уровня объектно-ориентированного программирования.

Все сервисы программного средства запускаются как docker-контейнеры с помощью утилиты docker-compose. Технология контейнеризации позволяет создать изолированное окружение для различных сервисов в пределах одного хоста и быстро развернуть их на любом сервере без дополнительных настроек.

Для качественного проведения проверок необходимо иметь наиболее полную базу данных уязвимостей (БДУ).

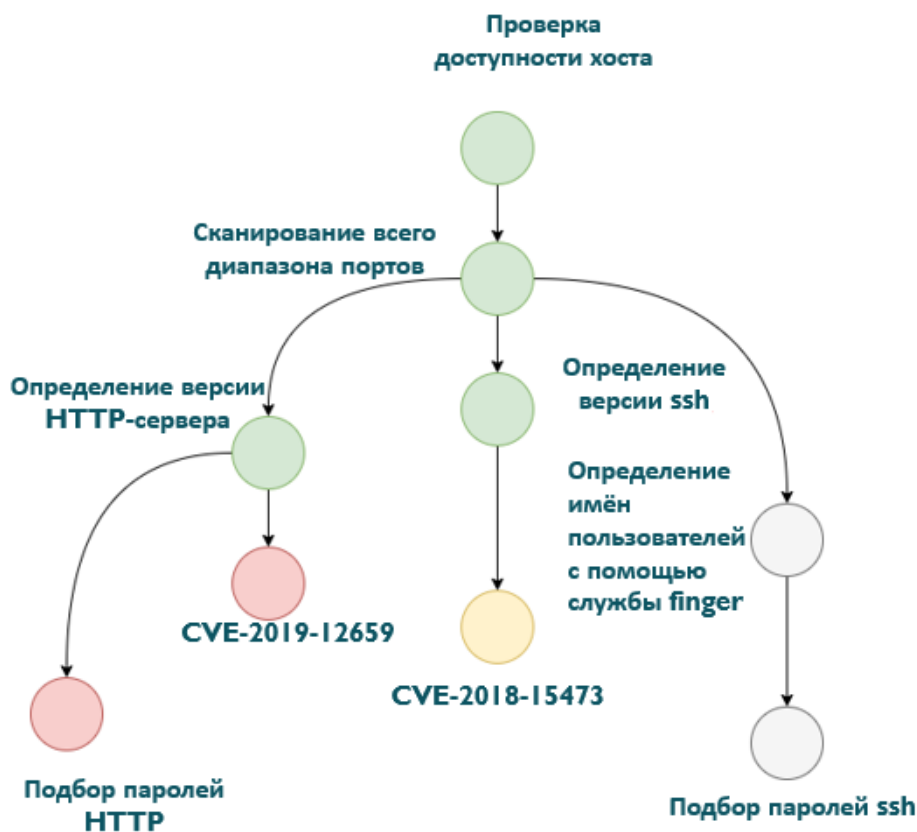


Рис. 3. Пример дерева аудита

База данных уязвимостей, реализованная в прототипе разработанного программного комплекса (схема которой изображена на рис. 4), содержит следующую информацию:

1. Список продуктов, которые могут иметь уязвимости.
2. Список уязвимостей продукта.
3. Общее описание параметров уязвимости.
4. Зависимость шаблонов атак от классов уязвимостей.
5. Описание классов уязвимостей.
6. Описание шаблонов атак.

Основными источниками информации, используемыми для обновления базы данных, хранящей описание известных уязвимостей, могут являться:

а) *nvd.nist.gov* – является источником информации для перечня существующего потенциально уязвимого оборудования (CPE), соответствующих ему уязвимостей (CVE) с измерением уровня угрозы (CVSS), категорией угрозы (CWE) и информацией о способе устранения угрозы;

б) *cwe.mitre.org* – является источником информации для подробного описания категорий угроз (CWE) и их взаимосвязи с векторами атак (CAPEC);

в) *capec.mitre.org* – является источником информации для подробного описания векторов атаки (CAPEC);

г) *bdu.fstec.ru* – альтернативный источник информации об уязвимостях в программном обеспечении ТКО.

База данных уязвимостей интегрирована в программное средство. Пользователь может осуществлять поиск информации в БДУ с заданием параметров поиска (пример на рис. 5).



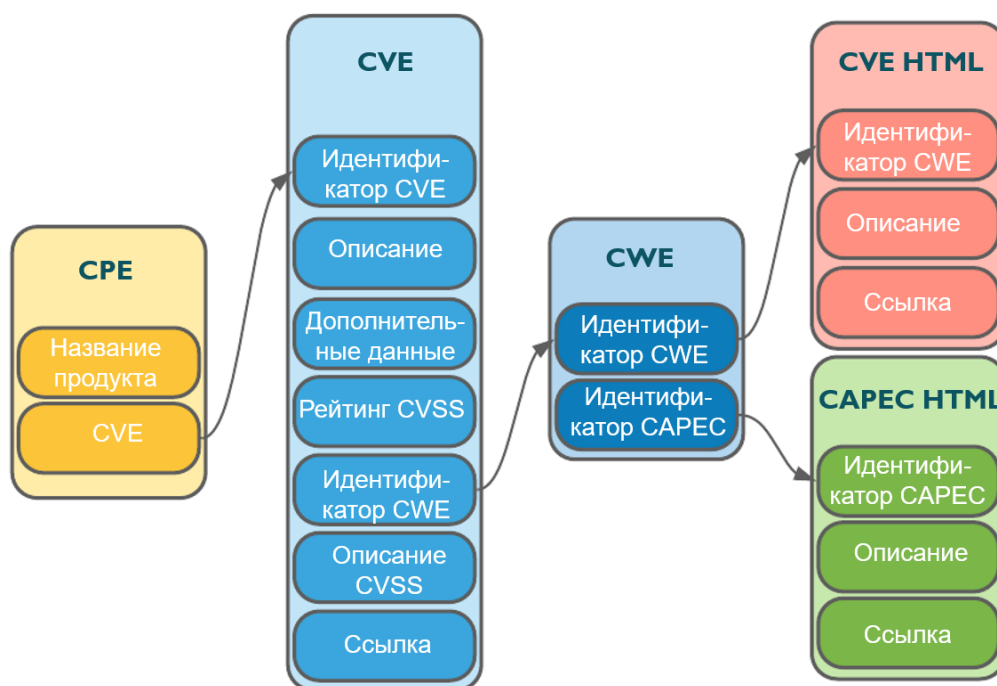


Рис. 4. Схема базы данных уязвимостей



Рис. 5. Топ-10 категорий угроз, выбранных из БДУ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа рынка средств проведения аудита безопасности элементов сетевой инфраструктуры и изучения уязвимостей сетевого оборудования были выявлены недостатки инструментов, применяемых для тестирования. Предложенный в статье подход учитывает выявленные недостатки, а прототип программного комплекса, созданный на его основе, показал свою работоспособность и реализует следующие механизмы:

- создание пользовательских шаблонов проверок сетевого аппаратно-программного и программного обеспечения;

- ведение БДУ, в которую интегрированы также актуальные данные с отечественной БДУ ФСТЭК;
- поддержку кроссплатформенности;
- ведение перечней проверочных мероприятий, доступных для конкретного сетевого оборудования;
- добавление в базу данных поддерживаемого телекоммуникационного оборудования и сетевого программного обеспечения новых экземпляров;
- добавление новых проверочных мероприятий для проведения проверок конфигурационных файлов телекоммуникационного оборудования пакетной коммутации;
- сканирование сетевых адресов с определением запущенных на них служб и их версий;
- генерацию рекомендаций по устранению уязвимостей информационной безопасности;
- мультязычность всего интерфейса программного комплекса (возможность локализации).

### Список используемых источников

1. Nipper Studio: официальный сайт. – URL: <https://www.titania.com/products/nipper/> (дата обращения: 22.03.2021).
2. Efros Config Inspector: официальный сайт. – URL: <https://www.gaz-is.ru/produkty/zashchita-it-infrastrukturi/efros-config-inspector.html> (дата обращения: 22.03.2021).
3. XSpider: официальный сайт. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/products/xspider/> (дата обращения: 22.03.2021).
4. RedCheck: официальный сайт. – URL: <https://www.redcheck.ru/> (дата обращения: 22.03.2021).
5. Nessus: официальный сайт. – URL: <https://www.tenable.com/products/nessus> (дата обращения: 22.03.2021).
6. OpenVAS: официальный сайт. – URL: <https://openvas.org/> (дата обращения: 22.03.2021).
7. Nikto: официальный сайт. – URL: <https://kali.tools/?p=2295> (дата обращения: 22.03.2021).
8. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021611929 от 08.02.2021. Программное средство построения дерева аудитов для тестирования программного обеспечения / Д.Н. Бирюков [и др.]; Российское агентство по патентам и товарным знакам. – 2021.

А.Н. Киселев,  
кандидат техн. наук, доцент

## ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ WEB-SHELL НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СЕТЕВОГО ТРАФИКА WEB-ИНФРАСТРУКТУРЫ

В рамках обеспечения информационной безопасности web-инфраструктуры важным элементом среди комплекса мер является обнаружение сетевой активности вредоносного программного обеспечения (ПО), используемого злоумышленниками. Использование вредоносного ПО web-shell является наиболее известным способом постэксплуатации уязвимостей в рамках сетевой атаки. Существующие подходы к обнаружению вредоносного ПО web-shell, основанные на сканировании файлового хранилища web-сервера, имеют ряд недостатков. В статье предлагается оригинальный подход к обнаружению вредоносного ПО посредством анализа сетевого трафика web-инфраструктуры. На основе полученных данных разработаны практические рекомендации для разработки дополнительных технологий информационной безопасности web-инфраструктуры.

Ключевые слова: web-сервер, безопасность web-сервера, web-shell, уязвимости web-сервера, атаки на web-сервер, web malware, сканер web-сервера.

### ВВЕДЕНИЕ

Функционирование любой информационной системы в настоящее время связано с использованием web-технологий. Среди основных достоинств web-технологий следует отметить следующие: возможность распределенной работы пользователей с web-ресурсом, переносимость web-приложений на всех существующих платформах, удобство и интуитивное удобство работы с браузером, простота установки и настройки ПО [1].

Web-приложения являются одними из наиболее уязвимых на сегодняшний день [2]. Согласно проекту Open Web Application Security Project (OWASP – открытый проект обеспечения безопасности web-приложений) количество векторов атак на web-инфраструктуру постоянно растет. Совершенствуются технологии получения несанкционированного доступа к web-ресурсам и технологии последующей постэксплуатации уязвимостей.

Атакующий, использующий специальный класс вредоносного ПО – web-shell, в результате эксплуатации уязвимости web-сервера получает под контроль скомпрометированный информационный ресурс.

В настоящее время проблематике построения эффективных систем информационной безопасности современных информационно-телекоммуникационных сетей (ИТКС) посвящено большое количество работ таких отечественных ученых, как П.Д. Зегжда, А.Г. Ломако, С.А. Петренко [3–5]. В ряде работ ставятся вопросы исследования уязвимости web-ресурсов [6,7]. Детальный анализ данного класса вредоносного ПО приведен в работе [8].

Анализ показал, что традиционными подходами к обнаружению web-shell являются:

- 1) анализ содержимого лог-файла функционирующего web-сервера. Данный подход детально рассмотрен в работе [9];
- 2) сканирование специализированными сканерами файлового хранилища web-сервера с последующим выявлением вредоносного программного кода. Данная технология представлена в работе [10].

В статье предлагается оригинальный подход, основанный на анализе сетевого трафика и обнаружении сетевой активности вредоносного ПО web-shell с использованием сигнатурного метода. С учетом выполненных прикладных исследований разработаны практические рекомендации по повышению уровня информационной безопасности web-инфраструктуры.

Предлагаемый комплексный подход существенно увеличит информационную безопасность web-приложений.

## **АНАЛИЗ АКТУАЛЬНЫХ ОСНОВНЫХ ВЕКТОРОВ АТАК НА WEB-ИНФРАСТРУКТУРУ**

Наиболее авторитетной организацией, занимающейся анализом рисков информационной безопасности web-приложений, является OWASP. Эта организация разработала проект OWASP Top 10 – это рейтинг из десяти наиболее опасных рисков информационной безопасности для web-приложений, составленный сообществом экспертов отрасли.

Для каждого пункта рейтинга риск посчитан экспертами на основе методики OWASP Risk Rating Methodology и включает оценку по следующим критериям:

- распространенность уязвимостей в приложениях (Weakness Prevalence);
- сложность обнаружения уязвимостей (Weakness Detectability);
- сложность эксплуатации (Exploitability);
- критичности последствий эксплуатации уязвимостей (Technical Impacts).

В последнем отчете, опубликованном в 2018 году [12], отмечены следующие риски информационной безопасности web-инфраструктуры:

– A1 – внедрение кода (Injection). Под внедрением кода понимаются все типы инъекций: SQL, NoSQL, LDAP. Внедрение кода становится возможным, когда непроверенные данные отправляются интерпретатору как часть команды или запроса.

– A2 – некорректная аутентификация (Broken Authentication). Функции приложений, которые отвечают за аутентификацию и управление сессиями, зачастую применяются неправильно, что влечет компрометацию паролей, ключей, сеансовых токенов и возможность полностью перехватить сеанс пользователя.

– A3 – утечка чувствительных данных (Sensitive Data Exposure). Web-приложения и API могут некорректно хранить и обрабатывать конфиденциальную информацию, что создает риски для атак на конфиденциальность данных.

– A4 – внедрение внешних XML-сущностей (XXE – XML External Entities). Некорректно сконфигурированные XML-процессоры могут использовать внешние данные из ссылок в XML-файлах. Такие внешние данные могут содержать вредоносный код, готовый для исполнения.

– A5 – нарушение контроля доступа (Broken Access Control). Некорректное формирование матрицы доступа позволяет получить несанкционированный доступ к закрытым областям сайтов или возможность изменить права доступа к ресурсам.

– A6 – небезопасная конфигурация (Security Misconfiguration). Некорректное конфигурирование web-сервера позволяет получать несанкционированный доступ к данным.

– A7 – межсайтовый скриптинг (XSS – Cross-Site Scripting). Атака XSS возникает тогда, когда приложение включает в себя недоверенные данные без проверки. Например, программный код сетевого ресурса может содержать скрипт для перехвата пользовательских данных или перенаправления на другие вредоносные сайты.

– A8 – небезопасная десериализация (Insecure Deserialization). Угроза небезопасной десериализации связана с тем, что недоверенные данные могут нарушить логику функционирования приложения, что может привести к удаленному выполнению вредоносного кода.

– A9 – использование компонентов с известными уязвимостями (Using Components with Known Vulnerabilities). Необновленные библиотеки, фреймворки, операционные системы и прочие компоненты информационных систем являются уязвимыми к различным типам сетевых атак.

– A10 – отсутствие журналирования и мониторинга (Insufficient Logging & Monitoring). Отсутствие средств логирования функционирования сервера существенно повышает возможность проведения сетевой атаки.

### АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ WEB-SHELL В РАМКАХ ПРОВЕДЕНИЯ СЕТЕВЫХ АТАК НА WEB-ИНФРАСТРУКТУРУ

Web-shell – это вредоносный скрипт, используемый в рамках проведения сетевой атаки на web-инфраструктуру. Он предназначен для получения удаленного контроля и управления над скомпрометированным web-приложением. Web-shell используется на втором этапе атаки, после эксплуатации уязвимости (этот этап называется постэксплуатация уязвимости).

На первом этапе атаки осуществляется эксплуатация уязвимостей (например, с использованием сценария XSS), после чего на подконтрольный ресурс загружается вредоносный скрипт. Далее, используя методы GET и POST протокола HTTP, атакующий с помощью web-браузера осуществляет управление web-сервером посредством вредоносной программы. Схема этапов атаки и последующего управления web-shell рассмотрена в работе [13] и представлена на рис. 1.



Рис. 1. Сценарий использования web-shell в ходе атаки на web-сервер

Кроме того, использование web-shell позволяет осуществлять атаки на корпоративные сети. При этом вредоносная программа используется как транзитный управляющий узел для осуществления сетевой атаки (например, реализует функции сканирования сети, выявления сетевых сервисов и проведения атак типа RCE – удаленный запуск кода). Схема применения web-shell для атаки на корпоративную сеть описана в работе [14] и показана на рис. 2.

Скрипт web-shell обычно разрабатывается на языке PHP и ASP, а также на Perl, Ruby, Python и Unix shell. Web-shell функционирует как бэкдор и позволяет злоумышленнику выполнять на удаленной машине произвольные команды (например, редактирование содержимого ресурса, загрузку и скачивание файлов, выполнение команд и т.д.). В качестве программы управления web-shell, как правило, используется web-браузер.

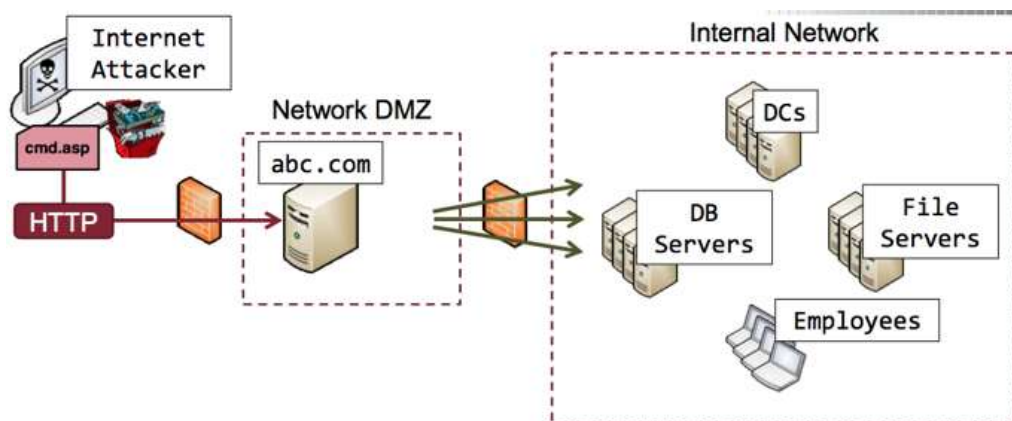


Рис. 2. Схема применения web-shell для атаки на корпоративную сеть

Среди известных вредоносных программ этого класса следует отметить следующие программы:

1. *b347k* – разработан на PHP, позволяет решать задачи по мониторингу сетевого ресурса и удаленному выполнению команд.
2. *S99* – из отличительных особенностей данной программы следует отметить функцию самоуничтожения с целью обеспечения бескомпроматной работы.
3. *China Chopper* – важной функциональной возможностью данной программы является возможность проведения атаки методом перебора паролей.
4. *R57* – в данном скрипте присутствует оригинальная опция, позволяющая сканировать подконтрольный web-сервер на наличие других вредоносных программ с возможностью их удаления.
5. *WSO* – данная программа имеет расширенные функции защиты, например обязательную аутентификацию в начале работы.

## СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ WEB-SHELL

Для обнаружения web-shell на настоящий момент используется два подхода:

- 1) статический анализ содержимого подконтрольного ресурса посредством сканирования специализированными сканерами безопасности файловой системы (антивирусами) [10];
- 2) динамический анализ сетевого трафика на предмет обнаружения команд управления вредоносным ПО в режиме реального времени [11].

Обнаружение вредоносной программы web-shell стандартными антивирусными средствами затрудняется достаточно простой модификацией или обфускацией программного кода вредоносной программы, что не позволяет использовать сигнатурный метод для идентификации.

Как и другие вредоносные программы, web-shell можно выявить по ряду специфичных признаков. В то же время значительная часть вредоносных программ может относиться к легальным файлам (скриптам), хранящимся на сетевом ресурсе.

Среди возможных признаков наличия web-shell на сервере следует отметить следующие:

1. Подозрительно высокая нагрузка на сетевой ресурс.
2. Наличие файлов с подозрительной временной меткой создания или модификации (например, более поздней, чем время последнего обновления ПО).
3. Использование файлов, в которых имеются подозрительные программные ссылки (строки кода), например: ссылки на `cmd.exe`, `eval`.

Перспективные специализированные файловые сканеры используют следующие технологии обнаружения вредоносного ПО [8]:

- поиск по ключевым словам – все файлы проверяются на наличие слов и команд, которые могут быть связаны с проведением атаки;
- сигнатурный анализ – поиск сигнатур известных web-шеллов;
- анализ наиболее длинных строк – зачастую вредоносный код шифруется таким образом, чтобы обойти поиск по ключевым словам, это делает строки кода особенно длинными, что и позволяет их обнаруживать;
- расчет шенноновской энтропии в исходном коде – каждой строке кода присваивается рейтинг, на основании которого можно судить о степени угрозы;
- поиск вредоносного кода методом индекса совпадений.

Проведенный анализ подходов к динамическому анализу сетевого трафика на предмет обнаружения команд управления вредоносным ПО позволил установить крайне низкий уровень автоматизированного обнаружения web-shell.

Представленные на рынке фаерволов для защиты веб-сайтов (Web Application Firewall) программные средства Barracuda, Citrix, F5, Imperva и Wallarm ориентированы на защиту от угроз, представленных в отчете OWASP [12], а не на обнаружение web-shell. Проведенный анализ также показал, что в наиболее известном средстве обнаружения вторжений Snort присутствуют только три правила для обнаружения web-shell [16]. Главный недостаток средства обнаружения вторжения Suricata – отсутствие возможности полноценной сборки TCP-сессий сетевого трафика и, как следствие, возможные пропуски фрагментов вредоносного ПО в трафике. Из этого следует сделать вывод, что необходимо разрабатывать научно-методический аппарат, позволяющий осуществлять обнаружение сетевой активности web-shell в сетевом трафике.

## ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ WEB-SHELL НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СЕТЕВОГО ТРАФИКА

Управляющие последовательности команд web-shell передаются с использованием методов GET и POST протокола HTTP. Приведем пример метода GET, который позволяет выполнить команду *ipconfig* на сервере:

*“GET /dashboard/images/a.php?potato=ipconfig HTTP/1.1” 200 553 “-” “Mozilla/5.0 (Windows NT 6.1; Trident/7.0; rv:11.0) like Gecko”*

Таким образом, для повышения полноты и оперативности обнаружения команд web-shell в сетевом трафике необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать методику обработки сетевого трафика с целью выделения сессий управления вредоносной программы;
- 2) разработать алгоритм обработки протоколов информационного обмена с целью выделения GET и POST методов протокола HTTP;
- 3) разработать алгоритм идентификации команд web-shell в сетевом трафике.

Обзор существующих подходов к анализу сетевого трафика приведен в работе [15].

Разработанная методика обработки сетевого трафика для обнаружения управляющих сессий web-shell с учетом специфики трафика HTTP представлена ниже.

Полный набор (наборы) стеков протоколов может быть представлен в виде дерева, корень которого соответствует всем разрешенным в данной сети способам передачи двоичных последовательностей по каналам связи, узел – используемому протоколу, а ветвь – стеку протоколов данного соединения. Таким образом, возникает задача обработки текущего протокола и выбора следующего протокола.

**Задача обработки текущего протокола с помощью функции обработки.** Функция обработки протокольного блока данных (ПБД) текущего протокола выделяет протокольную управляющую информацию (ПУИ), анализирует ее, определяет тип ПБД и его структурные элементы (структурные параметры и параметры функций). В результате применения функции формируется ПБД протокола вышележащего уровня.

Задача выбора следующего протокола решается с помощью функции идентификации протоколов. Функция идентификации протоколов по эталонным описаниям и программным моделям протоколов производит анализ структурных элементов ПБД протокола вышележащего уровня. В результате применения этой функции выясняются правила протокольного взаимодействия и сетевые интерфейсы.

Следует отметить, что для обработки ПБД различных протоколов используется всегда одна функция обработки, которая содержит реализацию всех возможных протокольных функций. В ходе обработки при идентификации следующего протокола функция обработки самостоятельно настраивается на обработку текущего ПБД исходя из результатов идентификации и анализа ПУИ.

В целом в процессе обработки стека протоколов реализуется методика, которая требует выполнить следующие последовательные действия:

1. Выделить ПБД протокола канального уровня.
2. Настроить функцию обработки на обработку ПБД выявленного протокола (на канальном уровне в отдельном анализируемом канале всегда используется только один протокол, поэтому будем считать, что протокол канального уровня нам всегда известен).
3. С помощью функции обработки выделить протокольную управляющую информацию, проанализировать ее и сформировать данные для функции идентификации.
4. С помощью функции идентификации определить следующий протокол и сформировать параметры настройки функции обработки.
5. Далее выполнить п. 2.

Процесс обработки носит рекурсивный характер и заканчивается при наступлении таких событий, как:

- 1) выделение и идентификация сообщения прикладного уровня (методов GET и POST);
- 2) реализация текущим протоколом функций управления соединениями или функций преобразования данных;
- 3) использование на следующем уровне неизвестного для функции идентификации протокола;
- 4) отсутствие на следующем уровне протокола (характерно для ПБД служебных протоколов).

Таким образом, для решения задачи обработки текущего протокола необходима разработка алгоритма обработки протоколов информационного обмена и алгоритма идентификации сигнатур web-shell.

**Алгоритм обработки протоколов информационного обмена.** Алгоритм работы функции обработки представлен на рис. 3. Он отражает все основные аспекты, связанные с процессом обработки большинства типовых протоколов информационного обмена.

Для того чтобы излишне не усложнять блок-схему, в алгоритме не указаны некоторые моменты, касающиеся деталей реализации – управления процессом обработки (запуск, останов, управляющие воздействия в процессе обработки и т.д.).

Входными данными являются ПБД текущего протокола, поступающие в функцию обработки, а выходными – ПБД следующего протокола или данные пользователя сети. Выходные данные не всегда могут присутствовать, так как функции преобразования данных и управления соединением для формирования ПБД следующего протокола используют накопление или разбиение ПБД текущего протокола.

В случае разбиения ПБД ввод в функцию обработки ПБД канального уровня не является стартовым событием (началом развертки рекурсии), так как в этом случае необходимо разворачивать рекурсию от момента поступления в функцию очередного фрагмента разбиваемого ПБД.



Следует отметить такую особенность алгоритма, как нестандартное применение функции адресации. В отличие от стандартного способа, когда структурные элементы ПУИ, отвечающие за адресацию, обеспечивают уникальность ПБД в рамках отдельного сеанса информационного обмена, в функции обработки при применении функции адресации используется заполнение так называемой идентификационной структуры, содержащей адресную информацию ПБД протоколов всего стека и обеспечивающей уникальность ПБД в рамках всех сеансов информационного обмена.

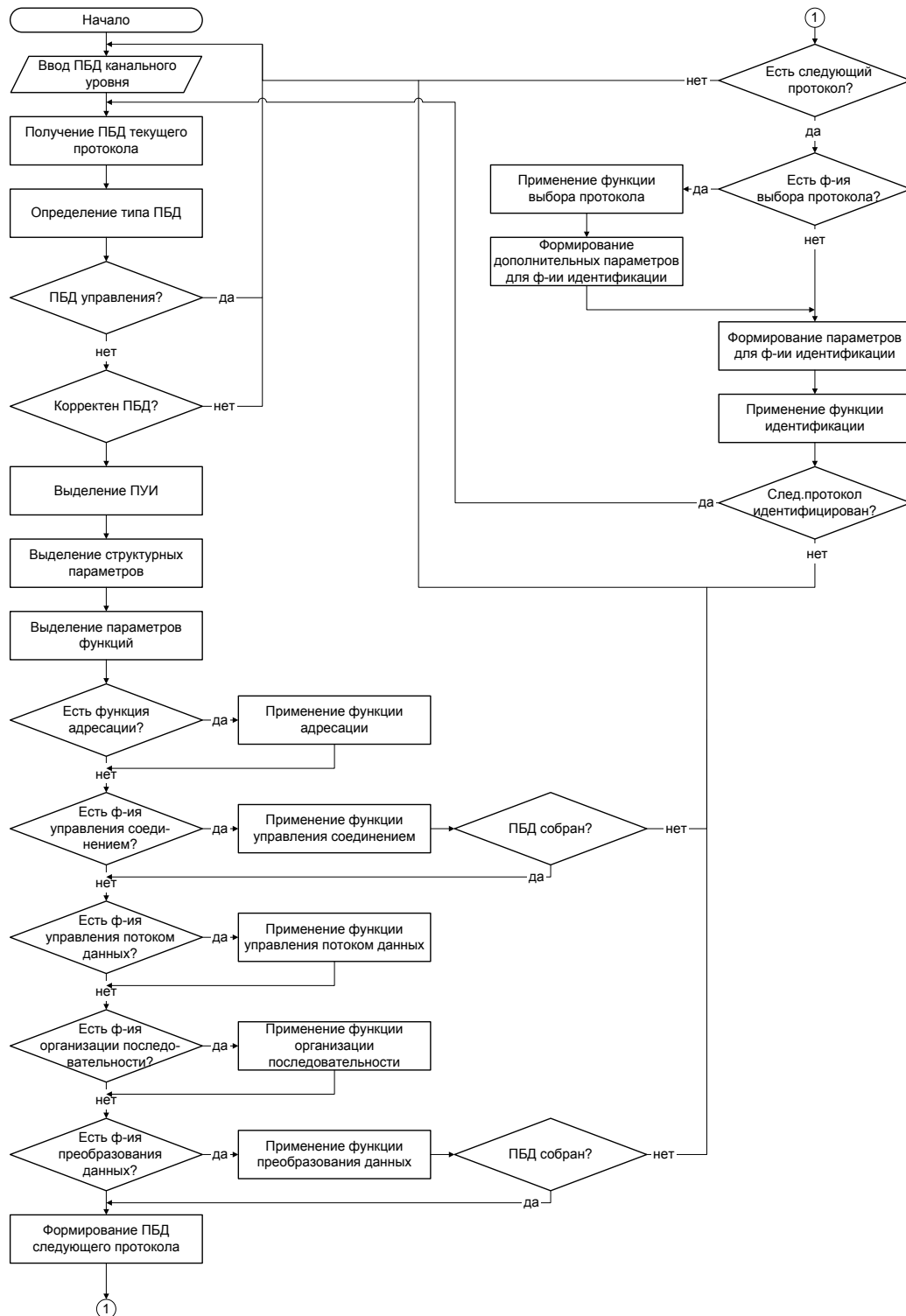


Рис. 3. Алгоритм обработки протоколов информационного обмена

**Алгоритм идентификации сигнатур web-shell.** Алгоритм идентификации сигнатур web-shell представлен на рис. 4. Исходными данными для идентификации сигнатур web-shell являются описания форматов команд, хранящиеся в базе данных. Выходными данными является распознанная команда web-shell.

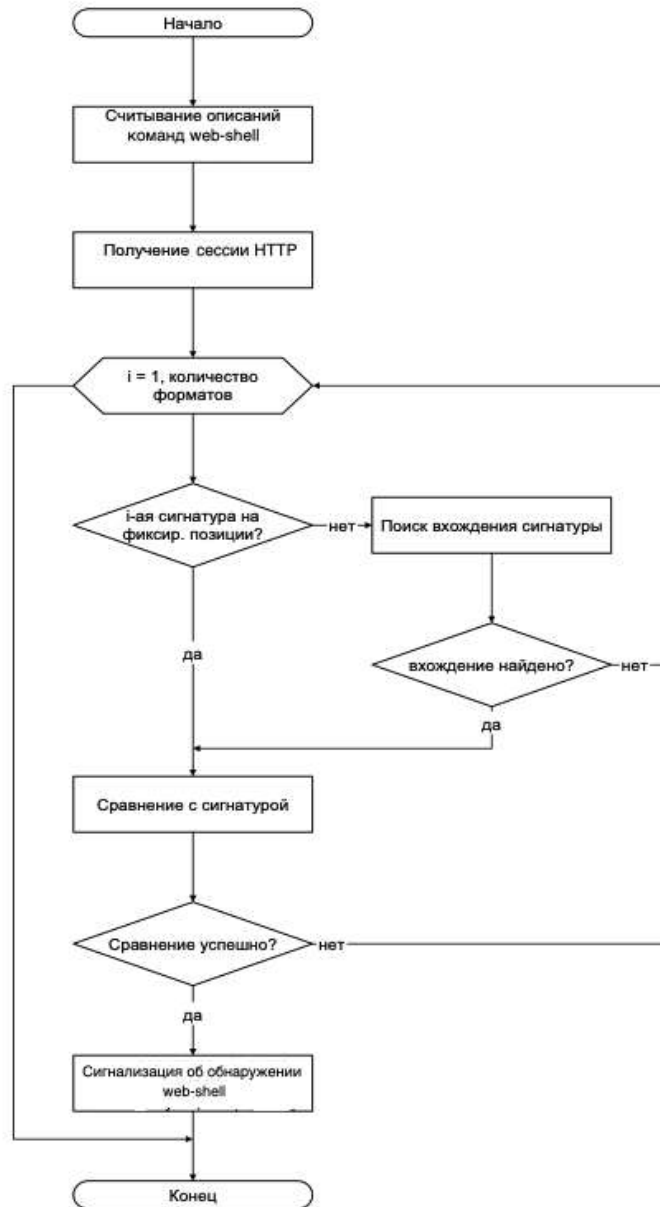


Рис. 4. Алгоритм идентификации сигнатур web-shell

Основным элементом описания формата является сигнатура, по которой и производится идентификация сообщения. Сигнатуры бывают двух типов:

- 1) с фиксированной позицией в сообщении;
- 2) с произвольной позицией в сообщении.

Описание команды включает в себя:

- 1) тип команды;
- 2) сигнатуру;
- 3) размер сигнатуры;
- 4) позицию сигнатуры;
- 5) максимальную позицию сигнатуры (если имеет место произвольная позиция сигнатуры).

Среди основных достоинств предлагаемого подхода следует отметить следующие:

- простота и скорость в установке и настройке ПО (ввиду отсутствия программных агентов – сканеров);
- возможность обнаружения скрытых (обфусцированных) в файловой системе web-сервера вредоносных программ;
- быстрое наращивание состава сигнатур, идентифицируемых web-shell, на основе разработанной методики и стенда;
- контроль сетевого трафика защищаемой ctnb позволяет с высокой степенью достоверности и полноты выявлять скомпрометированные ресурсы (в том числе и посредством эксплуатации 0-day уязвимостей).

Для апробации предложенного подхода было разработано программное средство для обнаружения сигнатур web-shell в сетевом трафике. Оно позволило в режиме реального времени идентифицировать более 30 различных вредоносных программ, в частности: Ani-shell, iMHaPFtp, itsec, JSPSpy, c99shell, Pwn, r57 и т.д. Программное средство позволяет обрабатывать следующие протоколы канального уровня: Ethernet, PPP, PPP->MPLS, RAW IP, PPP over Ethernet, VLAN.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на проведенном анализе различных классов сетевых атак на web-инфраструктуру, включая абсолютно новые классы, был сделан вывод, что, как правило, на этапе постэксплуатации уязвимостей используется специализированное вредоносное ПО web-shell. Существующие подходы к обнаружению данного класса вредоносного ПО не позволяют с большой полнотой обнаруживать данную программу. В статье был предложен оригинальный апробированный подход к обнаружению сетевой активности web-shell, основанный на сигнатурном анализе управляющих последовательностей команд в сетевом трафике. Использование данного подхода в комплексе со статическим анализом файлового пространства web-сервера сканером безопасности позволит существенно повысить уровень обеспечения информационной безопасности web-инфраструктуры современных информационных систем.

## Список используемых источников

1. Кудряшев А.В., Светашков П.А. Введение в современные веб-технологии. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/603/459/info> (дата обращения: 06.03.2021).
2. Статистика уязвимостей web-приложений в 2018 году. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/web-application-vulnerabilities-statistics-2019/> (дата обращения: 06.03.2021).
3. Зегжда П.Д., Калинин М.О. Автоматическое управление безопасностью компьютерных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2013. – № 4. – С. 15–23.
4. Бирюков Д.Н., Ломако А.Г. Построение систем информационной безопасности: от живых организмов к киберсистемам // Защита информации. Инсайд. – 2013. – № 2(50). – С. 61–65.
5. Петренко С.А. Концепция поддержания работоспособности киберсистем в условиях информационно-технических воздействий // Труды института системного анализа Российской Академии наук. – 2009. – Т. 14. – С. 175–193.
6. Kim P. The Hacker Playbook 3: Practical Guide To Penetration Testing. – Tampa, Florida, United States: Secure Planet LLC, 2018. – 337 p.

7. *Hoffman A.* Web Application Security. Exploitation and Countermeasures for Modern Web Applications. – Sebastopol, California, United States: O'Reilly Media, 2020. – 330 p.
8. No Honor Among Thieves: A Large-Scale Analysis of Malicious Web Shells / Oleksii S., Ahmad J., Sharique S., Thorsten H. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2872427.2882992> (дата обращения: 06.03.2021).
9. *LiuYang S., Yong F.* Webshell Detection Method Research Based on Web Log. J. Netw // New Media. – 2016. – № 2, 11.
10. *Wrench P.M., Irwin B.V.W.* Towards a PHP webshell taxonomy using deobfuscation-assisted similarity analysis // In Proceedings of the 2015 Information Security for South Africa (ISSA), Johannesburg, South Africa. – 2015. – P. 1–8.
11. . Webshell detection techniques in web applications / Truong Dinh Tu, Cheng Guang, Guo Xiaojun, Pan Wubin // Fifth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, 11 July 2014. – Hefei, China: IEEE, 2014.
12. OWASP Report. – URL: <https://owasp.org/www-project-top-ten/> (дата обращения: 05.03.2021).
13. Closing the Door on Web Shells. – URL: [https://digital-forensics.sans.org/summit-archives/dfir14/Closing\\_the\\_Door\\_on\\_Web\\_Shells\\_Anuj\\_Soni.pdf](https://digital-forensics.sans.org/summit-archives/dfir14/Closing_the_Door_on_Web_Shells_Anuj_Soni.pdf) (дата обращения: 05.03.2021).
14. *Kazanciyan R.* Old Web Shell, New Tricks // AppSec DC, 2 July, 2012. – Washington, United States.
15. *Joshi M.* A Review of Network Traffic Analysis and Prediction. – URL: <https://archiv.org/abs/1507.05722> (дата обращения: 06.03.2021).
16. Snort rules. – URL: <https://www.snort.org/downloads#rules> (дата обращения: 06.03.2021).

Г.Н. Мальцев,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
С.А. Матвеев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ КОМАНДНОГО РАДИОУПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕОДОЛЕНИЯ НАРУШИТЕЛЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

Представлена марковская модель, описывающая в пространстве состояний процесс преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации системы командного радиоуправления подвижными объектами. Рассматривается защищенность системы командного радиоуправления в условиях наиболее опасной угрозы информационной безопасности – попыток нарушителя осуществить перехват управления. Выделены четыре уровня (рубежа) защиты, из них два уровня являются физическими и характерны для широкого класса радиотехнических систем передачи информации, а два уровня являются логическими и характерны для систем командного радиоуправления подвижными объектами. Представлен граф реализации угроз, характеризующий сценарий преодоления нарушителем рассмотренных уровней защиты. Анализируется характер изменения во времени вероятности реализации нарушителем угрозы информационной безопасности. Результаты, полученные для рассмотренного сценария преодоления нарушителем рубежей защиты, сравниваются с наиболее благоприятным (худшим для нарушителя) и неблагоприятным (лучшим для нарушителя) сценариями и выявляются наиболее критические уровни защиты информации.

Ключевые слова: командное радиоуправление подвижными объектами, угрозы информационной безопасности, многоуровневая система защиты информации, граф состояний.

Функционирование широкого класса технических систем, прежде всего подвижных объектов, обеспечивается их радиоуправлением – передачей управляющих воздействий по радиоканалу. При командном радиоуправлении управляющие воздействия передаются на объект управления с помощью радиосигналов в виде дискретных формализованных сообщений (команд). В качестве объектов управления могут выступать летательные и космические аппараты, робототехнические системы, другие дистанционно управляемые технические системы [1, 2]. В случае, если техническая система, являющаяся объектом управления, относится к классу критически важных объектов, необходимо принятие мер по обеспечению информационной безопасности ее систем управления от потенциальных нарушителей.

Под информационной безопасностью информационно-телекоммуникационной системы в общем случае понимается такое ее состояние, при котором с требуемой надежностью обеспечивается защищенность ее информационных ресурсов (хранящейся, передаваемой и обрабатываемой информации) от угроз информационной безопасности [3, 4]. Обеспечение информационной безопасности систем радиоуправления связано с защитой информации, передаваемой на объект управления по радиоканалу. При этом проявляется объективное свойство защищенности любой системы, состоящее в ее постепенном снижении при неизменном составе средств защиты или при фиксированных их параметрах [4, 5]. Кроме того, имеют место особенности обеспечения информационной безопасности систем радиоуправления как радиотехнических систем, связанные, с одной стороны, с их пространственной электромагнитной доступностью, расширяющей возможности доступа потенциального нарушителя к каналам передачи информации, а с другой стороны, с применением многоуровневых систем защиты, в которых реализуется несколько уровней (рубежей) защиты передаваемой информации от несанкционированного доступа и деструктивных воздействий нарушителей [6, 7].

В настоящей статье представлены описание марковской модели процесса преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации системы командного радиоуправления подвижными объектами и результаты исследования защищенности анализируемой системы в условиях наиболее опасной угрозы информационной безопасности – попыток нарушителя осуществить перехват управления. Целью статьи является качественный и количественный анализ при допущениях, принятых в ходе разработки модели, характера изменения во времени вероятности реализации нарушителем угроз информационной безопасности, а также сравнение результатов, полученных для различных сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты.

Угрозы информационной безопасности представляют собой потенциально возможные воздействия на информационно-телекоммуникационные системы, которые прямо или косвенно могут нанести ущерб информационной безопасности этих систем. Действия потенциальных нарушителей при несанкционированном доступе и деструктивных воздействиях на системы радиоуправления направлены в конечном счете на нарушение процесса нормального функционирования объекта управления при нарушении процесса управления и перехвате управления [8, 9]. Вследствие электромагнитной доступности радиоканалы являются одним из наиболее уязвимых звеньев систем радиоуправления, и их защищенность может быть определяющей для информационной безопасности системы радиоуправления в целом.

Основной угрозой, действующей в радиоканалах управления, является угроза несанкционированного доступа нарушителя к передаваемой информации. При этом получение несанкционированного доступа к информации, передаваемой по радиоканалам управления, имеет для нарушителя самостоятельное значение, а также является первой фазой реализации других угроз информационной безопасности, направленных на нарушение нормального функционирования объекта управления, вплоть до перехвата управления.

В информационно-телекоммуникационных системах, к которым относятся системы командного радиоуправления, используются разнообразные методы обеспечения информационной безопасности, включающие как технические, так и организационные меры [10, 11]. При условии принятия необходимых организационных мер по защите информации информационная безопасность обеспечивается техническими методами и средствами защиты. В системах командного радиоуправления они должны охватывать не только радиоканал, через который нарушитель осуществляет угрозы информационной безопасности, но и объект управления с тем, чтобы нарушитель, даже получив несанкционированный доступ к передаваемой информации и возможность имитировать передаваемые по радиоканалу управляющие воздействия, не смог перехватить управление критически важным объектом.

Отсюда следует принцип многоуровневой защиты информации в системах радиоуправления, при этом уровни (рубежи) защиты информации связываются как с этапами прохождения управляющих воздействий в канале управления, так и с логикой процесса управления объектом. При радиоуправлении подвижными объектами обеспечение информационной безопасности имеет особое значение, поскольку управление ими по радиоканалу в ряде случаев является единственно возможным. При этом в многоуровневой системе защиты информации системы командного радиоуправления могут быть учтены особенности приема радиосигналов при взаимодействии с подвижными объектами, связанные с параметрами их движения и пространственным положением, а также режимы их функционирования.

Непредотвращение угроз информационной безопасности может привести как к ухудшению заданного уровня качества функционирования системы командного радиоуправления, так и к невыполнению объектом управления своих задач по назначению. Общий принцип поддержания требуемого уровня защищенности информационно-телекоммуникационных систем в условиях действия угроз информационной безопасности представлен на рис. 1. Он соответствует подходу к анализу информационной безопасности с использованием теории надежности. В качестве показателя защищенности используется вероятность обеспечения информационной безопасности информационно-телекоммуникационной системы (в рас-

смаатриваемом случае – системы радиуправления) в условиях угроз информационной безопасности со стороны потенциальных нарушителей. На графике качественно показан характер изменения во времени вероятности обеспечения информационной безопасности  $P_6(t)$ . Кривая 1 соответствует объективному снижению с течением времени  $t$  вероятности обеспечения информационной безопасности  $P_6$  при фиксированных параметрах системы защиты информации, кривая 2 соответствует поддержанию вероятности обеспечения информационной безопасности не ниже минимально допустимой  $P_{6.min}$  за счет периодического внесения изменений в параметры системы защиты информации, учитывающих текущее состояние защищенности информационно-телекоммуникационной системы.

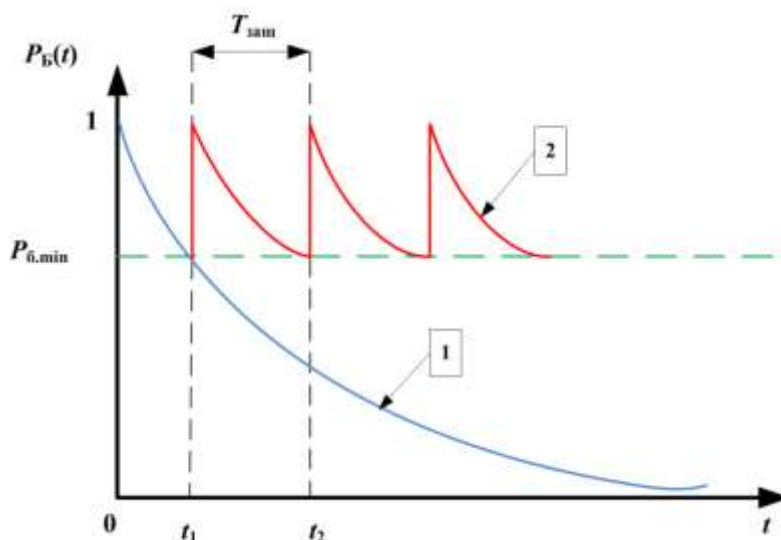


Рис. 1. Изменение во времени вероятности обеспечения информационной безопасности информационно-телекоммуникационной системы

Рассмотренный принцип поддержания требуемого уровня защищенности информационно-телекоммуникационных систем предопределяет необходимость учета динамики изменения состояния их защищенности для правильного выбора периодичности управления используемыми в системе средствами защиты информации  $T_{заш.}$ . Для анализа и прогнозирования динамики изменения защищенности информационно-телекоммуникационных систем используются математические модели, описывающие процессы функционирования анализируемых систем в пространстве состояний, и их защищенность в условиях ожидаемых угроз информационной безопасности и для заданного состава средств системы защиты информации. При разработке таких моделей широкое распространение получает использование марковских моделей, описывающих процесс преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации в пространстве состояний [12–14].

С помощью марковских моделей процесс изменения защищенности анализируемой системы описывается на достаточно высоком уровне общности, без учета деталей реализации нарушителем угроз информационной безопасности и функционирования средств системы защиты информации. Однако такой уровень общности описания соответствует задачам исследования интегральных характеристик защищенности анализируемой системы, в частности изменения во времени вероятности обеспечения информационной безопасности  $P_6(t)$ , текущая оценка и прогнозирование которой позволяют реализовать рассмотренный принцип поддержания требуемого уровня защищенности информационно-телекоммуникационных систем в условиях действия угроз информационной безопасности.

Следует отметить, что в работах [15–17] марковские модели использовались для описания

процессов обнаружения вредоносных программ и вычисления среднего времени отказа системы защиты информации в сетевых информационно-телекоммуникационных системах с учетом характерных для таких систем механизмов защиты. Представленная в настоящей статье марковская модель описывает процесс преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации системы командного радиоуправления подвижным объектом с учетом уровней и механизмов защиты, которые могут быть реализованы в системах радиоуправления.

Будем рассматривать защищенность системы командного радиоуправления в условиях наиболее опасной угрозы информационной безопасности – попыток нарушителя осуществить перехват управления, имея в виду, что имитации сигналов радиоуправления предшествуют сбор нарушителем информации о радиосистеме управления и реализация угрозы несанкционированного доступа к радиоканалу управления. Система защиты информации в этом случае должна обеспечить различение принимаемых истинных и ложных (имитируемых) сигналов радиоуправления, и вероятность обеспечения информационной безопасности  $P_6$  есть вероятность того, что нарушитель не смог осуществить перехват управления объектом управления.

Для предотвращения угроз информационной безопасности в системах командного радиоуправления подвижными объектами могут быть реализованы четыре уровня защиты информации – сигнальный, кодовый, логический и прикладной. На каждом уровне защита от угроз информационной безопасности базируется на определенных признаках, позволяющих распознать, истинными или ложными (имитируемыми) являются принимаемые сигналы радиоуправления. Для реализации угрозы информационной безопасности нарушителю необходимо преодолеть все уровни. Характеристика уровней защиты информации и используемых на каждом уровне признаков представлена в табл. 1.

Таблица 1

#### Уровни защиты информации в системах радиоуправления подвижными объектами

Уровень	Сигнальный	Кодовый	Логический	Прикладной
Признак	Параметры сигнала	Ключи шифрования и аутентификации	Логика управления	Состояние объекта управления

Сигнальный и кодовый уровни защиты информации по своему характеру являются физическими, они характерны для широкого класса радиотехнических систем передачи информации. На этих уровнях анализируются сигналы и сообщения, принимаемые на объекте управления. На сигнальном уровне возможно различение принимаемых истинных и ложных (имитируемых) сигналов радиоуправления на основе анализа параметров принимаемых радиосигналов. Это могут быть, с одной стороны, параметры структуры модулирующего сигнала, обеспечивающие его структурную скрытность [10], с другой стороны, параметры принимаемого сигнала, зависящие от параметров относительного движения объекта управления и пункта радиоуправления. Так, при радиоуправлении подвижными объектами по определенным законам, зависящим от относительного движения объекта управления и пункта радиоуправления, изменяются задержка принимаемого сигнала, доплеровский сдвиг частоты и мощность принимаемого сигнала. На кодовом уровне осуществляются шифрование и аутентификация сообщений, передаваемых системой радиоуправления, криптографическими методами [11]. Формализованные сообщения передаются системой командного радиоуправления в зашифрованном виде с введением признаков аутентификации. Объект управления расшифровывает и идентифицирует истинные сообщения с помощью известных ему ключей шифрования и аутентификации. Нарушителю, чтобы успешно имитировать сигналы управления, необходимо знать эти ключи, но при правильном функционировании си-



стемы защиты информации они ему неизвестны. Криптографические методы являются основными техническими методами защиты информации, обеспечивающими предотвращение несанкционированного доступа к передаваемой информации в информационно-телекоммуникационных системах.

Логический и прикладной уровни защиты информации по своему характеру являются логическими, они характерны для систем управления и предотвращения угрозы перехвата нарушителем управления объектом управления. На этих уровнях анализируются управляющие воздействия, принимаемые на объекте управления, не идентифицированные как ложные на физических уровнях защиты информации. Различение принимаемых истинных и ложных (имитируемых) управляющих воздействий осуществляется на основе признаков, связанных с логикой управления и текущим состоянием объекта управления. Нарушителю, чтобы успешно имитировать управляющие воздействия, необходимо знать логику управления и текущее состояние объекта управления, поэтому при управлении критическими объектами необходимо принимать меры по недопущению наличия такой информации у потенциальных нарушителей. На логическом уровне признаком истинного управляющего воздействия является его соответствие принятым алгоритмам (технологическим циклам) управления, которые, как правило, имеют место при радиоуправлении подвижными объектами в ходе их применения по целевому назначению [1]. На прикладном уровне признаком истинного управляющего воздействия является его соответствие текущему состоянию (режиму функционирования) объекта управления. На обоих уровнях могут быть введены перечни разрешенных и запрещенных управляющих воздействий, позволяющие различить принимаемые истинные и ложные (имитируемые) сигналы управления.

Процесс преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации представляется марковским процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем. Дискретные состояния соответствуют попыткам нарушителя преодолеть различные уровни (рубежи) защиты, а протекание этого процесса в непрерывном времени отражает то, что преодоление рубежей защиты происходит в общем случае в случайные моменты времени. Процесс преодоления нарушителем различных уровней защиты информации описывается графом реализации угроз. Состояния графа соответствуют преодолению нарушителем различных уровней многоуровневой системы защиты информации. Реализация угрозы информационной безопасности имеет место при преодолении нарушителем всех уровней (рубежей) защиты после преодоления последнего уровня.

Вид графа реализации угроз зависит от характера угроз информационной безопасности и конкретной системы защиты информации, определяющих число уровней защиты и сценарии (варианты) их преодоления нарушителем. В работе [14] предложено формализованное описание марковскими моделями трех базовых сценариев преодоления нарушителем уровней (рубежей) защиты многоуровневой системы защиты информации, в различной степени благоприятных для нарушителя и характеризующихся различной степенью сохранения защитных свойств системы защиты информации в процессе ее преодоления нарушителем.

Первый сценарий (сценарий I) является наихудшим для нарушителя. После каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты происходит возврат к исходному состоянию, и все рубежи необходимо преодолевать заново, что соответствует полному восстановлению защитных свойств системы защиты информации. Второй сценарий (сценарий II) является средним для нарушителя. После каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты происходит возврат к преодолению предыдущего рубежа защиты, и существует возможность возврата к исходному состоянию, когда все предыдущие рубежи необходимо преодолевать заново, что соответствует частичному восстановлению защитных свойств системы защиты информации. Третий сценарий (сценарий III) является наилучшим для нарушителя. После каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты преодоление предыдущих рубежей защиты не требуется, происходит переход к состоянию преодоления предыдущего рубежа защиты и возврат к исходному состоянию, ко-

гда все предыдущие рубежи необходимо преодолевать заново, невозможен, что соответствует потере защитных свойств пройденных нарушителем уровней системы защиты информации. Из этих трех базовых сценариев, действующих на отдельных уровнях защиты, конструируется общий сценарий преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации и составляется соответствующий граф реализации угроз.

На рис. 2 приведен граф реализации угроз при преодолении нарушителем четырех уровней защиты информации системы командного радиоуправления подвижным объектом, характеристика которых приведена в табл. 1. Последовательность преодоления уровней защиты определяет их порядковые номера: 1-й уровень – сигнальный; 2-й уровень – кодовый; 3-й уровень – логический; 4-й уровень – прикладной. На графе обозначены следующие состояния процесса преодоления уровней (рубежей) защиты: 1 – состояние начала реализации угрозы, 2 – попытка преодоления первого уровня защиты; 3 – попытка преодоления второго уровня защиты; 3а – преодоление второго уровня защиты; 4 – попытка преодоления третьего уровня защиты; 5 – попытка преодоления четвертого уровня защиты; 6 – состояние реализации угрозы после преодоления четвертого уровня защиты. Состояние 1 является исходным, состояние 6 является поглощающим.

С учетом особенностей различения принимаемых истинных и ложных (имитируемых) сигналов радиоуправления и управляющих воздействий на различных уровнях защиты и используемых на этих уровнях признаков полагается, что на первом, третьем и четвертом уровнях защиты действует базовый сценарий II, при котором после каждой неудачной попытки преодоления данного рубежа защиты происходит возврат к состоянию преодоления предыдущего рубежа защиты с возможностью возврата к исходному состоянию, а на втором уровне защиты действует базовый сценарий III, при котором после каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты происходит переход к состоянию преодоления предыдущего рубежа защиты без возможности возврата к исходному состоянию.

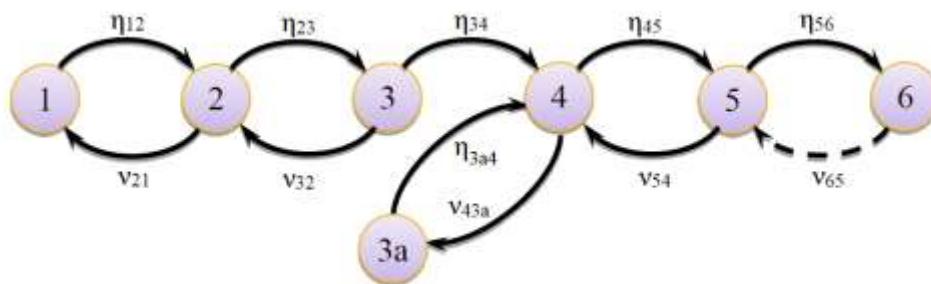


Рис. 2. Граф реализации угроз при преодолении нарушителем уровней защиты информации системы радиоуправления подвижными объектами

Общий сценарий преодоления нарушителем четырехуровневой системы защиты информации, таким образом, предполагает реализацию на трех уровнях защиты среднего для нарушителя базового сценария II, при котором после каждой его неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты происходит частичное восстановление защитных свойств системы защиты информации, и на одном уровне защиты наилучшего для нарушителя базового сценария III, при котором после преодоления данного рубежа защиты происходит потеря защитных свойств пройденных им уровней системы защиты информации. Выделение второго уровня, для которого нарушителем полагается базовый сценарий III, обусловлено используемыми на этом уровне признаками распознавания сигналов управления. Если нарушитель преодолел данный уровень, то он получил доступ к ключам шифрования и аутентификации, и защитные свойства пройденных первого и второго уровней

системы защиты информации потеряны. Наихудший для нарушителя базовый сценарий I, при котором после каждой его неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты происходит полное восстановление защитных свойств системы защиты информации в рассматриваемом общем сценарии преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации не рассматривается, поскольку используемые на различных уровнях признаки различения принимаемых истинных и ложных (имитируемых) сигналов радиоуправления и управляющих воздействий не позволяют однозначно обеспечить возврат нарушителя к исходному состоянию после каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты.

В графе реализации угроз, приведенном на рис. 2, обозначены следующие интенсивности переходов между состояниями:  $\eta_{12}=\eta_{3a4}$  – интенсивность попыток реализации угрозы;  $\eta_{23}$  – интенсивность преодоления первого рубежа защиты;  $\eta_{34}$  – интенсивность преодоления второго рубежа защиты;  $\eta_{45}$  – интенсивность преодоления третьего рубежа защиты;  $\eta_{56}$  – интенсивность преодоления четвертого рубежа защиты;  $v_{21}$  – интенсивность защиты на первом рубеже;  $v_{32}$  – интенсивность защиты на втором рубеже;  $v_{43a}$  – интенсивность защиты на третьем рубеже;  $v_{54}$  – интенсивность защиты на четвертом рубеже. На графе реализации угроз также обозначен фиктивный переход из состояния 6 в состояние 5 с интенсивностью переходов  $v_{65}=0$  с тем, чтобы граф был замкнутым и можно было описать его системой дифференциальных уравнений Колмогорова стандартного вида.

Интенсивности переходов вводятся в соответствии с выражениями следующего вида:

$$\eta_{i(i+1)}=1/T_{i-}, \quad (1)$$

$$v_{i(i-1)}=1/\tau_i, \quad (2)$$

где  $T_i$  – среднее время между попытками реализации угрозы (для интенсивности попыток реализации угрозы) или среднее время преодоления  $i$ -го рубежа защиты (для интенсивностей преодоления рубежей защиты);

$\tau_i$  – среднее время защиты на  $i$ -м рубеже (для интенсивностей защиты на рубежах защиты).

Для всех состояний вводятся вероятности нахождения процесса преодоления рубежей защиты в каждом состоянии  $F_i$ ,  $i=1, 2, 3, 3a, 4, 5, 6$  и анализируется их изменение во времени

$F_i(t)$ . Для вероятностей  $F_i(t)$  выполняется условие нормировки  $\sum_{i=1}^6 F_i(t) = 1$ . В начальный момент времени  $t=0$  процесс преодоления рубежей защиты находится в состоянии 1. Реализации угрозы соответствует нахождение процесса преодоления рубежей защиты в состоянии 6.

Поэтому вероятность реализации угрозы в момент времени  $t$  определяется вероятностью  $P_{угр}(t)=F_6(t)$  нахождения процесса преодоления рубежей защиты в состоянии реализации угрозы 6, а вероятность обеспечения информационной безопасности в момент времени  $t$  составляет  $P_6(t)=1-P_{угр}(t)=1-F_6(t)$ .

Система дифференциальных уравнений, описывающая граф реализации угроз, приведенный на рис. 2, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{F}_1(t) = -\eta_{12}F_1(t) + v_{21}F_2(t) \\ \dot{F}_2(t) = -v_{21}F_2(t) + \eta_{12}F_1(t) + v_{32}F_3(t) - \eta_{23}F_2(t) \\ \dot{F}_3(t) = -v_{32}F_3(t) + \eta_{23}F_2(t) - \eta_{34}F_3(t) \\ \dot{F}_4(t) = -v_{43a}F_4(t) + \eta_{34}F_3(t) + \eta_{3a4}F_{3a}(t) + v_{54}F_5(t) - \eta_{45}F_4(t) \\ \dot{F}_5(t) = -v_{54}F_5(t) + \eta_{45}F_4(t) + v_{65}F_6(t) - \eta_{56}F_5(t) \\ \dot{F}_6(t) = -v_{65}F_6(t) + \eta_{56}F_5(t) \\ \dot{F}_{3a}(t) = -\eta_{3a4}F_{3a}(t) + v_{43a}F_4(t) \end{cases} \quad (3)$$

Начальными условиями для решения системы дифференциальных уравнений (3) являются начальные значения вероятностей  $F_1(0)=1$ ,  $F_2(0)=F_3(0)=F_4(0)=F_5(0)=F_6(0)=F_{3a}(0)=0$  для момента времени  $t=0$ . Решение системы дифференциальных уравнений (3) при фиксированных исходных данных для интенсивностей переходов между состояниями, характеризующими действующие угрозы информационной безопасности и используемую систему защиты информации, позволяет качественно и количественно исследовать защищенность анализируемой системы и получить прогнозные зависимости  $P_6(t)=1-F_6(t)$ .

В начальный момент времени  $t=0$  выполняется  $P_{\text{угр}}(0)=F_6(0)=0$ . С течением времени вероятность реализации угрозы  $P_{\text{угр}}(t)=F_6(t)$  увеличивается и, поскольку состояние 6 является поглощающим, при  $t \rightarrow \infty$  достигает значения, равного 1. Изменение во времени вероятностей реализации угрозы  $P_{\text{угр}}(t)$  и обеспечения информационной безопасности  $P_6(t)=1-P_{\text{угр}}(t)$  характеризует изменение во времени защищенности системы. Скорость роста вероятности  $P_{\text{угр}}$  и уменьшения вероятности  $P_6$  характеризует опасность угрозы для анализируемой системы. На основании полученных зависимостей  $P_6(t)$  в соответствии с принципом, представленным на рис. 1, может осуществляться поддержание требуемого уровня защищенности анализируемой системы в условиях действия рассматриваемых угроз информационной безопасности. При достижении вероятности  $P_6(t)$  минимально допустимой величины  $P_{6,\text{min}}$  должно происходить внесение изменений в параметры системы защиты информации. Эти изменения должны происходить на всех уровнях защиты с тем, чтобы после внесения изменений можно было полагать, что нарушитель возвращается в исходное состояние.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости изменения во времени вероятности реализации угрозы  $P_{\text{угр}}(t)$  для рассматриваемого графа реализации угроз, приведенного на рис. 2 (кривая 1), а также для графов реализации угроз, соответствующих лучшему для нарушителя (кривая 2) и худшему для нарушителя (кривая 3) базовым сценариям на всех уровнях защиты. Все зависимости  $P_{\text{угр}}(t)$  построены в относительном времени  $t$  и получены для следующих исходных данных: интенсивности попыток реализации угрозы  $\eta_{12}=\eta_{ia(i+1)}=1$ , интенсивности преодоления рубежей защиты  $\eta_{i(i+1)}=0,1$ , интенсивности защиты на рубежах защиты  $v_{(i+1)i}=v_{(i+1)ia}=0,1$ ,  $v_{65}=0$ ,  $i=2,3,4,5$ .

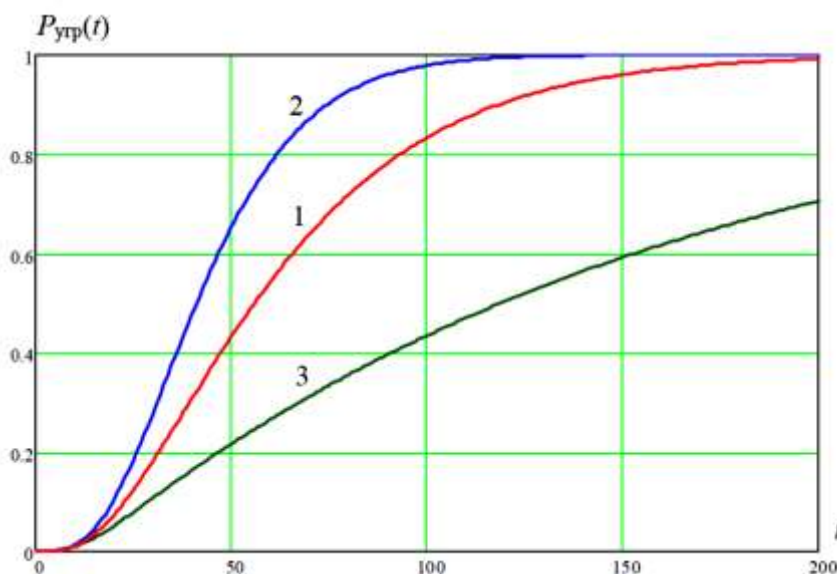


Рис. 3. Изменение во времени вероятности реализации угрозы для различных сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты

Очевидно, что с точки зрения обеспечения информационной безопасности рассматриваемый случай занимает промежуточное положение между наиболее благоприятным (худшим для нарушителя) и неблагоприятным (лучшим для нарушителя) сценариями. При этом, как

показано в работе [14], в практически важной области малых значений вероятности реализации угрозы  $P_{\text{угр}} < 0,001$  при фиксированных исходных данных по интенсивностям защиты и преодоления защиты для всех сценариев преодоления рубежей защиты (и наилучшего, и наихудшего, и среднего для нарушителя) значения вероятности реализации угрозы оказываются близки.

Для рассматриваемого графа реализации угроз, приведенного на рис. 2, было проанализировано влияние изменения интенсивностей преодоления рубежей защиты и интенсивностей защиты на рубежах защиты на характер изменения зависимостей  $P_{\text{угр}}(t)$ . Результаты анализа представлены на рис. 4.

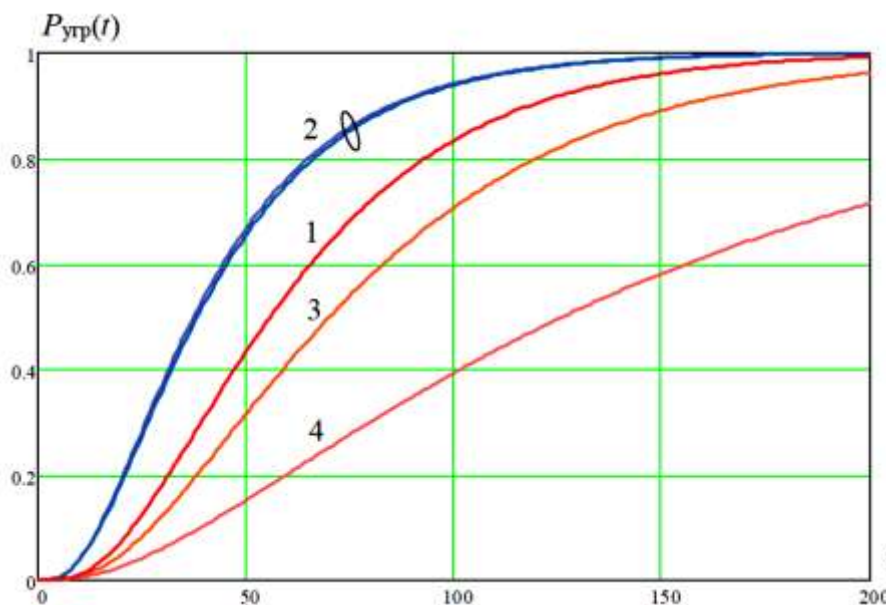


Рис. 4. Изменение во времени вероятности реализации угрозы при изменении параметров системы защиты информации на различных рубежах защиты

Все зависимости  $P_{\text{угр}}(t)$  построены в относительном времени  $t$  и получены для следующих исходных данных. Кривая 1 получена при тех же исходных данных, что и кривая 1 на рис. 3. Семейство кривых 2 (они проходят очень близко друг к другу) соответствует увеличению от 0,1 до 1 одной из интенсивностей преодоления рубежей защиты  $\eta_{i(i+1)}$ ,  $i=2,3,4,5$ . Кривая 3 соответствует увеличению от 0,1 до 1 одной из интенсивностей защиты  $v_{21}$  и  $v_{43a}$ . Кривая 4 соответствует увеличению от 0,1 до 1 одной из интенсивностей защиты  $v_{32}$  и  $v_{54}$ . Полученные результаты позволяют выявить наиболее критические уровни защиты информации для рассматриваемого графа реализации угроз.

Как следует из приведенных на рис. 4 зависимостей, увеличение интенсивностей преодоления нарушителем любого из рубежей защиты дает примерно одинаковый результат с точки зрения увеличения вероятности реализации угрозы. В то же время увеличение интенсивности защиты на различных рубежах защиты может по-разному влиять на уменьшение вероятности реализации угрозы. В рассматриваемом случае наиболее значительное уменьшение вероятности реализации угрозы достигается при увеличении интенсивности защиты на рубежах 2 и 4, соответствующих в системах командного радиоуправления подвижными объектами кодовому и прикладному уровням защиты. Это можно объяснить следующим образом. Рубеж 2 является рубежом, на котором имеет место наиболее благоприятный для нарушителя базовый сценарий преодоления защиты, и при преодолении этого уровня защитные свойства пройденных уровней системы защиты информации теряются. Рубеж 4 является

заключительным рубежом защиты, при преодолении которого нарушитель достигает своей цели и реализует угрозу информационной безопасности. Таким образом, при рассматриваемом общем сценарии преодоления нарушителем четырехуровневой системы защиты информации наиболее критичными являются кодовый уровень 2 и прикладной уровень 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная марковская модель процесса преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации системы радиоуправления подвижными объектами позволяет анализировать изменение во времени вероятностных характеристик ее защищенности в условиях попыток нарушителя осуществить наиболее опасную угрозу информационной безопасности – перехват управления. Используемая методика построения графа реализации угроз позволяет перейти от базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты к описанию на их основе общего сценария преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации. Практическая значимость рассмотренной марковской модели определяется возможностью ее использования для прогнозирования защищенности анализируемой системы при заданных характеристиках средств системы защиты информации и нарушителя, приведенных к значениям используемых в моделях интенсивностей защиты и преодоления защиты на каждом рубеже.

Результаты проведенного исследования показывают характер изменения во времени вероятности реализации нарушителем угрозы перехвата управления в системе командного радиоуправления подвижными объектами и влияние на информационную безопасность сценариев преодоления нарушителем различных рубежей защиты. При заданных допустимой вероятности реализации угрозы и исходных данных по интенсивностям попыток реализации угрозы и интенсивностям защиты на рубежах защиты с использованием рассмотренной марковской модели может быть определен период управления средствами защиты информации (смены их параметров). Полученные результаты показывают роль учета при анализе защищенности информационно-телекоммуникационных систем сценария преодоления нарушителем имеющихся рубежей защиты и выявления наиболее критических уровней защиты. Принципиально важным представляется полученный результат, свидетельствующий о том, что с точки зрения влияния на вероятность реализации угрозы увеличение интенсивностей преодоления нарушителем любого из рубежей защиты дает примерно одинаковый результат, а увеличение интенсивности защиты наиболее важно на рубежах, где имеют место максимально благоприятные условия для нарушителя, и на последнем рубеже, предшествующем реализации угрозы.

## Список используемых источников

1. Радиосистемы управления / В.А. Вейцель и др.; под ред. В.А. Вейцеля. – М.: Дрофа, 2005. – 416 с.
2. Авиационные системы радиоуправления. / Б.В. Белик и др.; под ред. В.С. Вербы, В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2014. – 376 с.
3. Зегжда П.Д., Ивашико А.М. Основы безопасности информационных систем. – М.: Горячая линия–Телеком, 2000. – 452 с.
4. Гаценко О.Ю. Защита информации. Основы организационного управления. – СПб.: Издательский дом «Сентябрь», 2001. – 228 с.
5. Удостоверяющие автоматизированные информационные системы и средства. Введение в теорию и практику / С.В. Баушев и др.; под ред. С.В. Баушева, А.С. Кузьмина. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 304 с.

6. *Мальцев Г.Н., Теличко В.В.* Оптимизация состава средств защиты в информационно-управляющей системе с каналами беспроводного доступа на основе графа реализации угроз // Информационно-управляющие системы. – 2008. – № 4. – С. 29–33.
7. *Жук А.П., Гавришев А.А., Осипов Д.Л.* Многоуровневая система защиты. К вопросу о разработке защищенного устройства управления робототехническим комплексом посредством беспроводного канала связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – № 12. – С. 4–9.
8. *Макаренко С.И.* Подавление сетевых систем управления радиоэлектронными информационно-техническими воздействиями // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 4. – С. 15–59.
9. *Забегалин Е.В.* К вопросу об определении термина «информационно-техническое воздействие» // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 2 – С. 121–150.
10. *Устинов Г.Н.* Основы информационной безопасности систем и сетей связи. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 248 с.
11. *Корниенко А.А., Еремеев М.А., Ададуров С.Е.* Средства защиты информации на железнодорожном транспорте: Криптографические методы и средства. – М.: Маршрут, 2006. – 256 с.
12. *Стародубцев Ю.И., Ерышов В.Г., Корсунский А.С.* Модель процесса мониторинга безопасности информации в информационно-телекоммуникационных системах // Автоматизация процессов управления. – 2011. – № 1. – С. 58–61.
13. *Щеглов К.А., Щеглов А.Ю.* Марковские модели угрозы безопасности информационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т.58, № 12. – С. 957–965.
14. *Мальцев Г.Н., Матвеев С.А.* Математические модели процесса преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – № 673. – С. 126–135.
15. *Ngoc T. Le, Doan B., Hoang A.* Threat Computation Model using a markov chain and common vulnerability scoring system and its application to cloud security // Journal of Telecommunications and the Digital Economy. – 2019. – Vol. 7, № 1. – P. 37–56.
16. *Anderson B., Quist D., Neil J.* Graph-based malware detection using dynamic analysis // Journal in Computer Virology. – 2011. – № 7(4). – P. 247–258.
17. *Магазев А.А., Цырульник В.Ф.* Исследование марковской модели угроз безопасности компьютерных систем // Моделирование и анализ информационных систем. – 2017. – Т. 24, № 4. – С. 445–458.

В.М. Моргунов,  
кандидат техн. наук, доцент;  
Р.Н. Странадкин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ ВНУТРЕННЕГО НАРУШИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВЫЯВЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ АТАК

Актуальность задачи обнаружения действий внутренних нарушителей информационной безопасности обуславливается постоянным ростом количества тщательно продуманных атак, генерируемых такими нарушителями, а также значительным наносимым ущербом.

В работе предложен подход к обнаружению действий внутренних нарушителей информационной безопасности, основанный на классификации и выявлении атак по характерным признакам.

Разработанный программный комплекс позволил экспериментально проверить предлагаемую концепцию.

Ключевые слова: внутренний нарушитель информационной безопасности, классификации сетевых атак, байесовский тип классификатора.

### ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях в области информационной безопасности отмечается, что на усиление мер защиты информации нарушители отвечают повышенной сложностью и «запутанностью» разрабатываемых ими атак, не обнаруживаемых месяцами [1].

В руководящих документах Федеральной службы по техническому и экспертному контролю (ФСТЭК России) [2] отмечена большая роль систем управления событиями. В свою очередь, сбор и обработка информации из многочисленных и разноформатных журналов регистрации событий в настоящее время настоятельно требуют внедрения эффективных средств автоматизации этих операций.

### ВЫЯВЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ АТАК ВНУТРЕННЕГО НАРУШИТЕЛЯ

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с внутренними нарушителями информационной безопасности, и их инсайдерские угрозы как источники большей части инцидентов. Для того чтобы выявить атаки внутренних нарушителей, были определены присутствующие им признаки. Это позволило создать классификатор, способный работать в «автоматическом режиме».

Всего было выделено 31 значение различных признаков атак. Отметим, что отдельные значения признаков атак могут быть зафиксированы с помощью средств сбора, регистрации, анализа и обработки поступающего потока событий информационной безопасности [3].

Рассмотрим формальную постановку задачи выбора из множества заданных типов классификаторов такого типа классификатора, который обеспечивает наименьшую частоту ошибки распознавания компьютерных атак при заданных начальных условиях (исходных данных). Ввиду того что различные типы классификаторов будут требовать различное время на сбор и обработку информации, учтем это в постановке задачи, приведенной далее.

Дано:

1.  $Ob = \{ob_1, ob_2, \dots, ob_n\}$  – множество компьютерных атак,  $ob_i$  – компьютерная атака  $ob_i \in Ob$ ;  $i = \overline{1, n}$ ;

2.  $g(ob) : Ob \rightarrow M$  – оператор (неизвестный), разбивающий множество компьютерных атак на  $m$  непересекающихся классов  $Ob_1, Ob_2, \dots, Ob_m$ ,  $(Ob_i \cap Ob_j = \emptyset; i, j = \overline{1, m}; i \neq j)$ ;



3.  $M = M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_m, M_i \cap M_j = \emptyset (i \neq j; i, j = \overline{1, m});$
4.  $X$  – пространство наблюдаемых признаков компьютерных атак,  $X_i$  – непересекающиеся множества, соответствующие образам одного класса распознавания, где  $X_i \subseteq X (X_i \cap X_j = \emptyset; i, j = \overline{1, n}; i \neq j);$
5.  $f(ob_i; \Delta t^{cb})$  – оператор сбора необходимой информации об атаке  $ob_i (i = \overline{1, n}),$  где  $\Delta t^{cb}$  – время, затрачиваемое на сбор этой информации;
6.  $g'(f(ob_i; \Delta t^{cb}); \Delta t^{obp})$  – оператор обработки информации об атаке  $ob_i (i = \overline{1, n}),$  где  $\Delta t^{obp}$  – время, необходимое на обработку этой информации;
7.  $g'(f(ob_i; \Delta t^{cb}); \Delta t^{obp}) \neq g(ob_i)$  – неверное распознавание класса атаки  $ob_i (i = \overline{1, n});$
8.  $g'(f(ob_i; \Delta t^{cb}); \Delta t^{obp}) = g(ob_i)$  – верное распознавание класса атаки  $ob_i (i = \overline{1, n});$
9.  $I(ob_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } g'(f(ob_i; \Delta t^{cb}); \Delta t^{obp}) = g(ob_i), \\ 0, & \text{если } g'(f(ob_i; \Delta t^{cb}); \Delta t^{obp}) \neq g(ob_i); \end{cases}$
10.  $P^* \{g'(f(ob_i; \Delta t^{cb}); \Delta t^{obp}) \neq g(ob_i)\} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - I(ob_i))$  – частота неверных распознаваний.

Тогда в новых условиях (пункты 1–15) нам требуется найти такой классификатор, который обеспечивает минимальную «результатирующую» частоту неверных распознаваний компьютерных атак в условиях ограничений на суммарное время сбора и обработки информации, которая не должна превышать  $T$  заданное (заданное время, которое меньше времени атаки – для предотвращения развития атаки и нанесения ущерба);

11.  $\left. \begin{array}{l} \Delta t_{k, q_z}^{cb}, \Delta t_{k, q_z}^{obp}, \\ \Delta t_{k, q_z}^{cb \& obp} = \Delta t_{k, q_z}^{cb} + \Delta t_{k, q_z}^{obp} \end{array} \right\}$  – времена сбора, обработки и общее время распознавания системой  $S_{k, q_z}^{cb \& obp} (k = \overline{1, h}; q_z = \overline{1, q_k});$
12.  $f_{k, q_z}(ob_i; \Delta t^{cb})$  и  $g'_{k, q_z}(f(ob_i; \Delta t^{cb}); \Delta t^{obp})$  – сбор и обработка информации системой  $S_{k, q_z}^{cb \& obp} (k = \overline{1, h}; q_z = \overline{1, q_k});$
13.  $\{S_{k, q_z}^{cb \& obp}(f_{k, q_z}, g'_{k, q_z}, \Delta t_{k, q_z}^{cb}, \Delta t_{k, q_z}^{obp})\}$  – множество систем сбора и обработки информации  $(k = \overline{1, h}; q_z = \overline{1, q_k});$
14.  $\varepsilon_{i, j_i}^T = (00 \dots 010 \dots 0)$  –  $q_i$  мерный вектор, содержащий «0» на всех позициях, кроме  $j_i$ -й позиции, содержащей «1»;
15.  $g_\Sigma (P_1^*, P_2^*, \dots, P_h^*)$  – оператор, определяющий «результатирующую» частоту неверных распознаваний.

Требуется:

$$g_\Sigma (\min P^* (\varepsilon_{1, j_1}^T \cdot \left( \begin{array}{l} g'_{1,1}(f_{1,1}(ob_i; \Delta t_{1,1}^{cb}); \Delta t_{1,1}^{obp}) \\ g'_{1,2}(f_{1,2}(ob_i; \Delta t_{1,2}^{cb}); \Delta t_{1,2}^{obp}) \\ \dots \\ g'_{1,q_1}(f_{1,q_1}(ob_i; \Delta t_{1,q_1}^{cb}); \Delta t_{1,q_1}^{obp}) \end{array} \right) \neq g(ob_i)), \dots$$

$$\Delta t_{1, j_1}^{cb} + \Delta t_{1, j_1}^{obp} \leq T_{\text{задан}}$$

$$j_1 = \overline{1, q_1}$$

$$\dots, \min P^*(\varepsilon_{h,q_h}^T \cdot \left( \begin{array}{c} g'_{h,1}(f_{h,1}(ob_i; \Delta t_{h,1}^{cb}); \Delta t_{h,1}^{obp}) \\ g'_{h,2}(f_{h,2}(ob_i; \Delta t_{h,2}^{cb}); \Delta t_{h,2}^{obp}) \\ \dots \\ g'_{h,q_h}(f_{h,q_h}(ob_i; \Delta t_{h,q_h}^{cb}); \Delta t_{h,q_h}^{obp}) \end{array} \right) \neq g(ob_i)),$$

$$\Delta t_{h,j_h}^{cb} + \Delta t_{h,j_h}^{obp} \leq T_{\text{задан}}$$

$$j_h = \overline{1, q_h}$$

Решением этой постановки задачи является байесовский тип классификатора.

Исходными данными для классификатора в нашем случае являются значения индикаторов атак внутреннего нарушителя на информационную систему, а выходными – тип атаки и вероятность ее выполнения. Рассмотрим подробнее эти данные.

Индикаторами атак на информационную систему называют факты и события, которые позволяют с некоторой уверенностью (в нашем случае с некоторой вероятностью) полагать, что реализуется (была реализована или будет реализована – в зависимости от текущей постановки задачи) атака. Будем рассматривать так называемые технические индикаторы, которые отражают знания (в виде фактов и событий) о некоторых действиях в информационной системе.

К атакам внутреннего нарушителя относят: IP-спуфинг, атаки типа «Man-in-the-Middle», атаки на основе вирусов и приложений типа «Троянский конь», sniffing, перехват пакетов на маршрутизаторе, подмена доверенного хоста, удаленное блокирование компьютера, локальное блокирование компьютера, IP Hijack. В роли технических индикаторов (событий и фактов) этих атак были выбраны: «Изменен MAC-адрес», «Изменен заголовок IP-пакета», «Выполнен непосредственный доступ к локальной сети», «Зарегистрировано перенаправление пакетов», «Обнаружен несанкционированный анализ трафика», «Обнаружена временная потеря сигнала», «Выполнено переподключение к точке доступа», «Обнаружен полный доступ к циркулирующей информации в сети», «Выявлено применение специального программного обеспечения (ПО)», «Обнаружено заражение компьютера посредством съемного носителя», «Зафиксировано заражение электронно-вычислительной машины посредством локальной сети», «Отмечена повышенная сетевая активность», «Выявлен подозрительный сетевой трафик», «Реализован привилегированный доступ к маршрутизатору», «Выявлена атака на виртуальном канале», «Зафиксировано ложное ICMP-сообщение», «Отмечено навязывание ложного маршрута», «Выявлено отравление DNS-кеша», «Выполнена посылка служебных сообщений от имени сетевых управляющих устройств» и т. п., всего был выделен 31 технический индикатор.

Исходные данные для эксперимента представлялись в виде упорядоченного множества (кортежа) технических индикаторов  $TI_i$   $\{i=1, 2, \dots, 31\}$  как  $\langle TI_1, TI_2, \dots, TI_{31} \rangle$  с помощью числовых значений «1» и «0», где «1» указывает на то, что  $TI_i$  «сработал». Например, если  $TI_i$  трактуется как «Выявлено применение специального ПО», и в информационной системе действительно выявлено (или имитируется) функционирование специального ПО и оно обнаружено, то этот факт представляется как  $TI_i=1$ . В случае, когда применение специального ПО не выявляется, значению соответствующего технического индикатора присваивается «0»:  $TI_i=0$ . Таким образом, кортеж значений технических индикаторов  $TI_i$  ( $i=1, 2, \dots, 31$ ) для заданного периода времени наблюдения за информационной системой представляется в виде последовательности нулей и единиц.

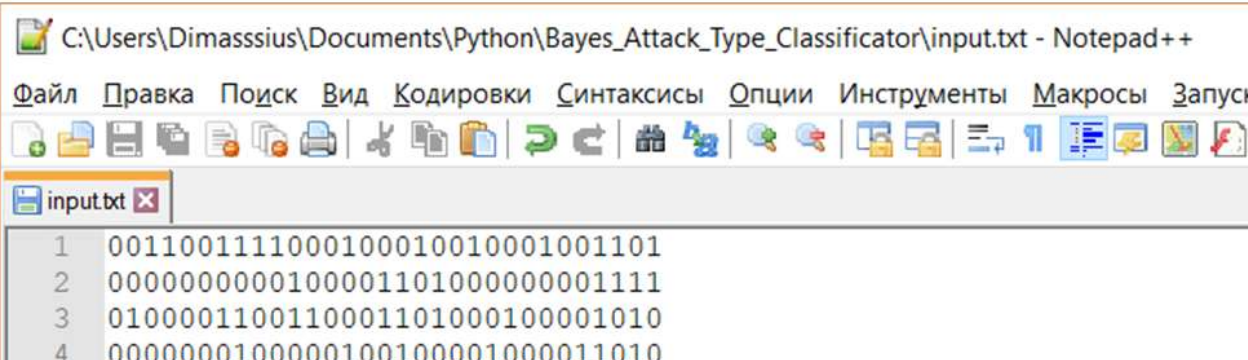
Уточним интерпретацию экспериментальных входных данных (рис. 1) для разработанной программы на языке Python. Здесь под номерами 1, 2, 3 и 4 (они отображены крайними слева) представлены упорядоченные значения технических индикаторов  $TI_i$  ( $i=1, 2, \dots, 31$ ) для 1-го, 2-го, 3-го и 4-го периодов времени наблюдения за информационной системой. Рассмот-

рим, например, нижнюю строку входных данных (она содержит наименьшее количество «единиц»):

4 0000000100000100100001000011010.

Здесь 4 обозначает 4-й период времени наблюдения за информационной системой. Далее:  $TI_i = 1$  ( $i=8, 14, 17, 22, 27, 28, 30$ ) и  $TI_i = 0$  для  $i \in \{1, 2, \dots, 31\} \setminus U$ , где  $U = \{8, 14, 17, 22, 27, 28, 30\}$ . В нашем случае  $TI_8 = 1$  трактуется как «Изменен MAC-адрес»,  $TI_{14} = 1$  трактуется как «Изменен заголовок IP-пакета»,  $TI_{17} = 1$  – «Выполнен непосредственный доступ к локальной сети»,  $TI_{22} = 1$  – «Выявлено отравление DNS-кеша»,  $TI_{27} = 1$  – «Зарегистрировано перенаправление пакетов»,  $TI_{28} = 1$  – «Обнаружена временная потеря сигнала»,  $TI_{30} = 1$  – «Выполнено перепопключение к точке доступа». Остальные  $TI_i = 0$  ( $i \in \{1, 2, \dots, 31\} \setminus U$ , где  $U = \{8, 14, 17, 22, 27, 28, 30\}$ ), т. е. эти индикаторы «не сработали», так как соответствующие им действия (активности) в информационной сети не выявлены.

На выходе байесовского классификатора получаем файл, показанный на рис. 2.

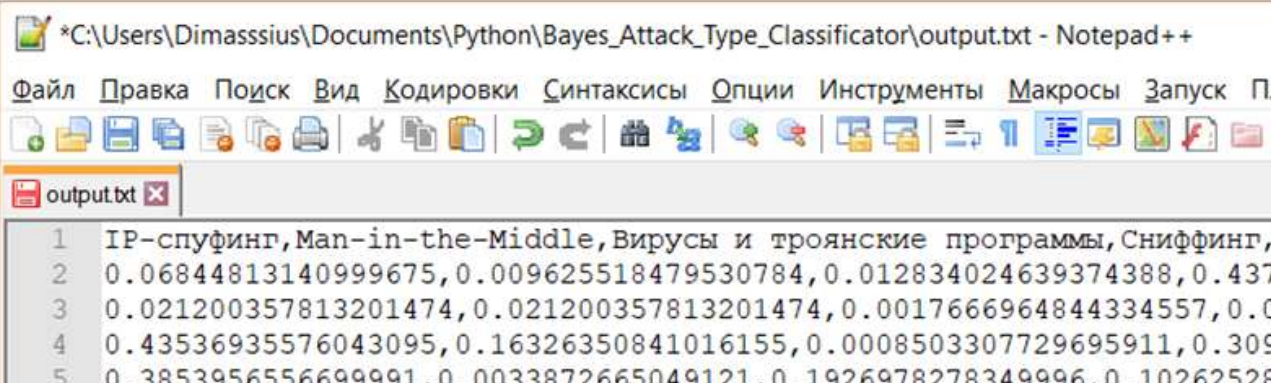


```

C:\Users\Dimasssius\Documents\Python\Bayes_Attack_Type_Classificator\input.txt - Notepad++
Файл Правка Поиск Вид Кодировки Синтаксисы Опции Инструменты Макросы Запуск
input.txt
1 0011001111000100010010001001101
2 0000000000100001101000000001111
3 0100001100110001101000100001010
4 0000000100000100100001000011010

```

Рис. 1. Входные данные для классификации



```

*C:\Users\Dimasssius\Documents\Python\Bayes_Attack_Type_Classificator\output.txt - Notepad++
Файл Правка Поиск Вид Кодировки Синтаксисы Опции Инструменты Макросы Запуск Пл
output.txt
1 IP-спуфинг, Man-in-the-Middle, Вирусы и троянские программы, Сниффинг,
2 0.06844813140999675, 0.009625518479530784, 0.012834024639374388, 0.437
3 0.021200357813201474, 0.021200357813201474, 0.0017666964844334557, 0.0
4 0.43536935576043095, 0.16326350841016155, 0.0008503307729695911, 0.309
5 0.3853956556699991, 0.0033872665049121, 0.1926978278349996, 0.10262528

```

Рис. 2. Результаты классификации

В строке, помеченной слева символом «1», перечислены названия рассматриваемых атак: IP-спуфинг, атаки типа «Man-in-the-Middle», атаки на основе вирусов «Вирусы и троянские программы», «Сниффинг» и т. д.

В строках, помеченных слева символами 2, 3, 4 и 5, представлены рассчитанные байесовским классификатором вероятности атак внутреннего нарушителя в соответствии с порядком их перечисления в строке 1. Так, например, входным данным в строке 1 (рис. 1) соответствуют выходные данные в строке с номером 2 (рис. 2). Заметим, что на рис. 2 номер увеличен на единицу, так как строка 1 занята названиями рассматриваемых атак. Рассмотренному выше 4-му периоду времени наблюдения за информационной системой соответствуют на

рис. 1 четвертая строка входных данных (упорядоченные значения технических индикаторов  $TI_i$  ( $i=1, 2, \dots, 31$ ) и выходные данные на строке 5 на рис. 2. Из строки 5 (рис. 2) видно, что рассчитанная байесовским классификатором вероятность атаки «IP-спуфинг» равна  $0.3853956556699991 \approx 0.385$ , вероятность атаки «Man-in-the-Middle» равна  $\approx 0.003$ , вероятность атаки «Вирусы и троянские программы» равна  $\approx 0.193$ , вероятность атаки «Сниффинг» равна  $\approx 0.103$  и т. д. Отметим, что наибольшая рассчитанная вероятность в этой строке принадлежит атаке «IP-спуфинг». Поэтому байесовским классификатором выдвинуто предположение, что в 4-м периоде времени наблюдения за информационной системой внутренним нарушителем была произведена атака IP-спуффинг (с вероятностью 0.385).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был предложен один из подходов к моделированию нарушителя информационной безопасности, в нашем случае основанный на выявлении сценариев атак при помощи сбора, регистрации, анализа и обработки поступающего потока сведений о фактах и событиях нарушения информационной безопасности.

Для идентификации атаки было обосновано применение и разработан байесовский классификатор. К достоинствам этого классификатора относится хорошее качество работы в условиях малого количества данных.

## Список используемых источников

1. Verizon Incident Preparedness and Response (VIPR) Report. – URL: <https://enterprise.verizon.com/resources/reports/vipr/> (дата обращения: 27.04.2021).
2. Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных: приказ ФСТЭК России от 18.02.2013 № 21. – URL: <http://fstec.ru/component/taqs/taq/prikaz> (дата обращения: 27.04.2021).
3. Моргунов В.М., Странадкин Р.Н. Подход к моделированию нарушителя информационной безопасности // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. – 2020. – №. 29. – С. 48–49.

И.А. Соловьев;  
М.В. Соловьева;  
Н.А. Трофимова

## **КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕСТРУКТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАРУШИТЕЛЯ**

В публикации представлен подход к построению когнитивной модели активности атаки, определяющей базовый элемент как контекстное событие вторжения в совокупности с функциями его сущностей для поддержки аналитических процессов и конструкций динамического связывания событий вредоносной деятельности в потоки активности нарушителя.

Ключевые слова: событие информационной безопасности, корреляция событий, фазирование процесса, поток активности нарушителя, граф активности атаки.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Оперативная атрибуция и анализ современных многоэтапных атак (ТТР) в отношении объектов информационной инфраструктуры зависят не только от учета множества показателей вредоносной активности, но и от успешной интеграции внешнего контекста ее проведения в системы контроля. Это позволяет представить весь объем сведений о деятельности нарушителя, обеспечивающий необходимую детализацию и выражение сложных взаимосвязей между действиями вторжения, расширяющий возможности анализа в реальном времени реализуемых угроз информационной безопасности (ИБ). При этом необходимо избегать описания сложной и глубоко реляционной вредоносной деятельности в виде плоского и простого списка технических индикаторов ее проявления [1]. Для достижения стратегической минимизации деструктивного воздействия деятельность по вторжению должна быть документирована и использована совокупно в поведенческом и техническом контексте при сохранении их существенных и сложных взаимосвязей. В этой связи для систематизации и координации действий при анализе данных на этапах расследования, предотвращения и устранения причин и последствий инцидентов в изменяющихся во времени условиях их возникновения и развития требуется построение модели, обобщающей характеристики угроз с действиями нарушителя по их реализации и отражающей динамику процесса деструктивных воздействий на отдельные элементы инфраструктуры или информационную систему в целом.

Применение таких динамических моделей в деятельности по мониторингу и реагированию на инциденты дает возможность, с одной стороны, решать необходимые задачи обеспечения ИБ оперативного или тактического уровней (передача работы по инциденту от одного специалиста к другому, построение максимально эффективных процессов его расследования и т. д.), с другой – решать такие стратегические задачи, как приоритезация включения в системы мониторинга и реагирования конкретных средств защиты информации, создание контента этих систем, проведения киберучений и т. д., что является актуальным в отношении существующих и выявляемых в дальнейшем сложных атак. При этом важна ценность данных моделей как инструмента, позволяющего описать события вредоносной деятельности в различных интерпретациях проявления для выявления скрытых связей между ними (корреляции событий) и нахождения критических точек безопасности диагностируемой информационной инфраструктуры, на основе которых производится определение направлений дальнейшего развития системы безопасности организации.

## ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ И ОПИСАНИЕ БАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА МОДЕЛИ АКТИВНОСТИ АТАКИ

Представим модель, обогащающую постулируемые пути эксплойтов к активу в дереве атаки знанием об активности нарушителя и определяющую новый ориентированный на интеллектуальный анализ граф активности атаки. Этот граф позволяет специалистам ИБ брать во внимание интеллект нарушителя во время планирования им воздействия и не только блокировать существующие, но также потенциально предсказывать будущие пути атаки, основанные на предпочтении нарушителя.

Основным положением предложенной модели является то, что для каждого события компрометации существует нарушитель, выполняющий действие для решения своей задачи. Он использует возможности, предоставляемые инфраструктурой, направленные против жертвы и служащие для достижения нарушителем своей цели [2]. Представление события как базового элемента модели задает следующий состав и определение ее сущностей:

*Adversary* – нарушитель, представляющий собой исполнителя, т. е. осуществляющее ТТР фактическое лицо (лица), и/или заказчика (противника), олицетворяющего конечную цель проведения атаки;

*Infrastructure* – физические и/или логические коммуникационные структуры, используемые нарушителем для осуществления полномочий и управления целью (*C2*) и характеризующиеся в зависимости от происхождения и атрибуции его деятельности по типу 1 или по типу 2, т. е. являющиеся полностью контролируемыми/принадлежащими нарушителю или контролируемыми посредником (поставщиком услуг) соответственно;

*Capability* – возможности нарушителя, представляющие собой используемые им инструменты и/или методы при реализации конкретного события и характеризующиеся емкостью потенциала (уязвимости и риски) и арсеналом нарушителя (методы и инструментарий), которые выражаются количественными и качественными показателями соответственно;

*Victim* – жертва, представляющая собой персону и/или активы (поверхность приложения атаки), обладающие восприимчивостью к действиям нарушителя, при этом актив жертвы может быть конечной целью в одном событии, а затем использоваться в качестве инфраструктуры в последующих событиях.

Представим событие, являющееся атомарным элементом модели, через характеризующие его функции, а именно, дискретную временную ( $Timestamp_{start}$ ,  $Timestamp_{end}$ ) направленную (*Direction*) деятельность, ограниченную определенной фазой (*Phase*), когда нарушитель, используя внешние ресурсы (*Resources*), реализует возможности и методологию (*Methodology*) над некоторой инфраструктурой с заданным результатом (*Rezult*) в отношении жертвы. Таким образом, событие создается с описанием присутствующих (участвующих) в нем функций с соответствующим показателем достоверности и документируется со всей доступной информацией.

Определим событие  $E$  как маркированный  $n$ -кортеж, элементами которого являются неотъемлемые значения базовых характеристик (сущности) и признаки (функции) события в сочетании с доверительным значением (*Confidence*), определяемым достоверностью аналитического заключения и/или точностью источника данных:

$$E = \langle \langle Adversary, Confidence_{adversary} \rangle, \langle Capability, Confidence_{capability} \rangle, \langle Infrastructure, Confidence_{infrastructure} \rangle, \langle Victim, Confidence_{victim} \rangle, \langle Timestamp_{start}, Confidence_{timestamp_{start}} \rangle, \langle Timestamp_{end}, Confidence_{timestamp_{end}} \rangle, \langle Methodology, Confidence_{methodology} \rangle, \langle Direction, Confidence_{direction} \rangle, \langle Resources, Confidence_{resources} \rangle, \langle Rezult, Confidence_{rezult} \rangle, \langle Phase, Confidence_{phase} \rangle \rangle.$$

Функции создают математическую основу для применения в анализе события таких концепций, как кластеризация, классификация и упорядочивание, что дает возможность фикси-

ровать и определять необходимые для дальнейшего анализа сведения. В частности, выявление пустых функций после документирования события со всей доступной на данный момент информацией выявляет пробелы в знаниях, задающие необходимость дополнения контекста события, например путем разворачивания дополнительных детекторов (датчиков) по сбору требуемых данных.

Модель является расширяемой в части функций. Представим их состав, не охватывающий всю полноту, но достаточный для интеграции в модель, и опишем особенности использования.

*Timestamp* – функция, задающая временные метки, необходимые для определения степени уверенности в знаниях и установления периодичности события с течением времени.

*Phase* – функция, определяющая место события в множестве фаз, которые должны быть успешно выполнены последовательно для достижения желаемого результата. Формально множество фаз определяется как упорядоченный  $n$ -кортеж вида  $P = \langle p_1, p_2, \dots, p_n \rangle$ , где  $p$  – фаза в цепи операций нарушителя,  $n$  – число фаз, которые пользователь модели определил как необходимые и достаточные для описания всех возможных событий, при этом  $n \geq 2$  и фаза каждого события является одним и только одним элементом множества. Наличие данной функции позволяет интегрировать рассматриваемую модель в любую фазированную модель операций нарушителя, например в модель Kill Chain [3].

*Direction* – функция, задающая направленность действий нарушителя для определения их устойчивости в течение времени при реализации, как правило, сетевых событий. К набору значений данной функции относятся направления – *Victim* → *Infrastructure*, *Infrastructure* → *Victim*, *Infrastructure* → *Infrastructure*, *Adversary* → *Infrastructure*, *Infrastructure* → *Adversary*, которые могут в том числе быть двунаправленными, а также невыявленного направления. Значения данной функции важны при выборе мест размещения датчиков обнаружения событий и выработке мер противодействия.

*Resources* – функция, определяющая перечень внешних ресурсов, необходимых для выполнения события. Значениями функции могут быть: элементы программного, аппаратного обеспечения, режимы их эксплуатации, а также сетевые пути и атрибуты доступа. Анализ значения функции используется для выработки стратегии ограничения возможности использования указанных ресурсов и смещения в процессе анализа гипотез центра тяжести к предпочтительным веткам атаки в потоке активности.

*Methodology* – функция, определяющая применяемые нарушителем методы и тактики для реализации события и позволяющая фиксировать общие классы активности за счет представления возможности проводить независимое от индикатора сравнение и группирование событий как для одного нарушителя, так и между ними. Функция позволяет включать в модель существующие таксономии, например MITRE ATT&CK для учета поведенческого характера действий нарушителя [4].

*Rezult* – функция, определяющая с некоторой степенью достоверности постуловия реализации события в соответствии с возможностями, используемыми нарушителем. Совокупность постуловий может быть обобщена в процессе анализа по критерию достижимости (успех, неуспех, не определено) или по критерию направленности намерений нарушителя (нарушение конфиденциальности, целостности, доступности). Также функция допускает возможность использования существующих методов для категорирования и систематизации результатов атак.

Таким образом, событие представляет собой  $n$ -кортеж переменного размера, поскольку модель не ограничена определенными здесь признаками и может быть расширена включением других элементов, в зависимости от потребностей аналитика. Более того, в рамках обеспечения дополнительной гибкости представленной модели базовые элементы кортежа также могут быть детализированы иерархией вложенных упорядоченных пар (субкортежей) в целях

уточнения конкретного признака и сбора знаний для последующего выявления корреляции событий.

Ниже приведен пример расширения базового элемента *Victim* субкортежем для обеспечения полноты его определения с помощью дополнительно выявляемых сведений (организация-жертва, IP-адрес и имя хоста, эксплуатируемое приложение и используемый TCP-порт):

$$\langle \text{Victim}, \text{Confidence}_{\text{victim}} \rangle = \langle \langle \text{Organization}, \text{Confidence}_{\text{organization}} \rangle, \langle \text{HostIPaddress}, \text{Confidence}_{\text{ipaddress}} \rangle, \langle \text{Hostname}, \text{Confidence}_{\text{hostname}} \rangle, \langle \text{Application}, \text{Confidence}_{\text{application}} \rangle, \langle \text{TCPport}, \text{Confidence}_{\text{tcpport}} \rangle \rangle.$$

Для аналитических целей событие может быть визуализировано в виде простого неориентированного графа, представляющего собой ромб, как показано на рис. 1, где вершины определяют основные сущности события, а ребра – естественные отношения между ними, идентифицирующие эти сущности с точки зрения конкретного признака.

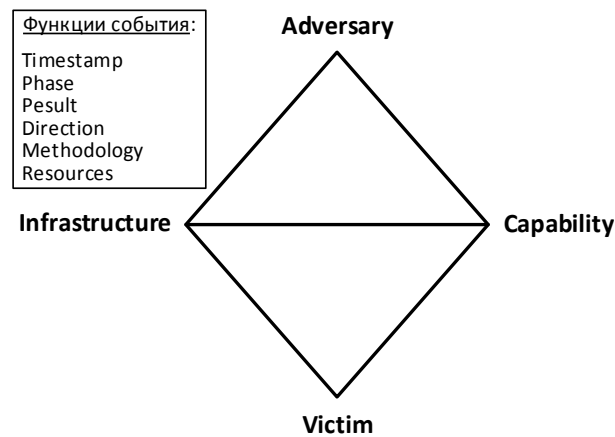


Рис. 1. Графическое представление события компрометации на основе характеристик (сущностей) в вершинах ромба, связанных ребрами отношений, с перечнем идентифицирующих признаков (функций) его состояния

Основным аналитическим использованием модели является переход от одной вершины к другой, т. е. достижение других связанных отношениями (ребрами) сущностей (вершин) с учетом их «видимости». Например, со стороны жертвы аналитик может «видеть» возможности, используемые против жертвы, и в какой инфраструктуре они реализуются. Помимо инфраструктуры, аналитик потенциально может «видеть» противника, контролирующего инфраструктуру.

Графически организованное событие  $E$  в формальном описании множества вершин ( $E_{\text{vertices}}$ ) и множества ребер отношений ( $E_{\text{edges}}$ ) определяется как:

$$E_{\text{vertices}} = \{ \text{Adversary}, \text{Infrastructure}, \text{Capability}, \text{Victim} \};$$

$$E_{\text{edges}} = \{ \{ \text{Adversary}, \text{Capability} \}, \{ \text{Adversary}, \text{Infrastructure} \}, \{ \text{Infrastructure}, \text{Capability} \}, \{ \text{Infrastructure}, \text{Victim} \}, \{ \text{Capability}, \text{Victim} \} \}.$$

Таким образом, событие, как атомарный элемент модели, представляет собой действие нарушителя на определенном этапе воздействия с использованием применяемых им техник/инструментария и характеризуется необходимым набором элементов детализации события.



## ПРИМЕНЕНИЕ К БАЗОВОМУ ЭЛЕМЕНТУ МОДЕЛИ МЕТОДА АНАЛИТИЧЕСКОГО ВРАЩЕНИЯ

В процессе исследования состояния ИБ с целью решения задачи проверки и генерации гипотез применяется метод аналитического вращения, т. е. извлечения элемента данных и его использования в сочетании с источниками данных для обнаружения связанных элементов (свидетельств, доказательств). Успех поворота зависит от нахождения взаимосвязи между элементами и анализа совокупности элемента данных и источников данных. Модель фундаментально поддерживает аналитическое вращение, являющееся одной из ее самых сильных сторон. Поскольку основные элементы структурированы в виде «ромба» и соединены пятью ребрами отношений множества  $E_{edges}$ , они явно задают возможности поворота относительно них для освещения других элементов события.

На данный момент для анализа вторжений методами, основанными на центральностях узлов графа, определяющих роль сущности в анализе, как правило, используется подход, ориентированный на жертву, поскольку реализуется посредством обычного сетевого и хост-мониторинга. Проект Honeynet – пример такого подхода [5]. Представленная модель позволяет использовать несколько концепций специализированного анализа вторжений, ориентированных на жертву, возможности, инфраструктуры или нарушителя. Например, при использовании подхода, ориентированного на жертву, анализ данных, относящихся к потенциальной жертве, выявляет другие связанные элементы (вредоносные возможности и инфраструктуру), как показано на рис. 2.

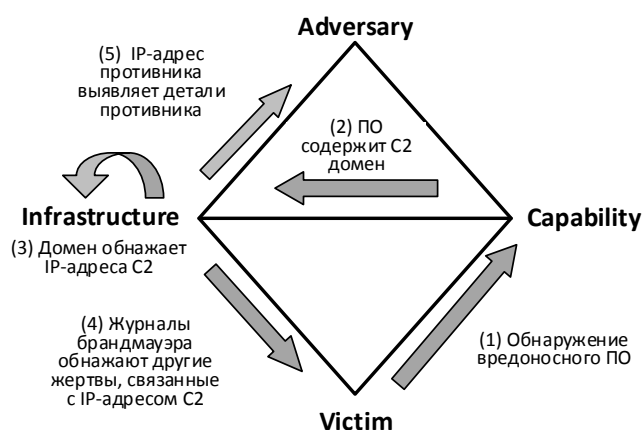


Рис. 2. Аналитическое вращение базового элемента модели с использованием ориентированного на жертву описания события

В этом случае сценарий аналитического вращения разворачивается в следующей последовательности: поворот 1 – жертва обнаруживает вредоносное ПО в своей сети; поворот 2 – вредоносное ПО выявляет связь с командно-контрольным доменом (C2); поворот 3 – домен обнажает базовый IP-адрес, на котором размещен контроллер вредоносного ПО; поворот 4 – журналы брандмауэра исследуются, обнаруживая другие скомпрометированные хосты в сети жертвы, устанавливавшие связь с IP-адресом контроллера вредоносного ПО; наконец, поворот 5 – регистрация IP-адреса выявляет детали нарушителя, обеспечивающие его потенциальную атрибуцию.

Подход, ориентированный на возможности, использует особенности элемента *Capability* выявлять другие элементы, связанные с операциями нарушителя, следующими поворотами:  $\{Capability \rightarrow Victim\}$  – жертву, против которой используется эта возможность;  $\{Victim \rightarrow Infrastructure\}$  – инфраструктуру, поддерживающую возможности;  $\{Infrastructure \rightarrow Capabil-$

ity} – технологию, обеспечивающую возможность; {Capability → Capability} – другие связанные возможности; {Capability → Adversary} – возможные ключи к нарушителю. Результаты такого подхода чаще всего можно увидеть в отчетах поставщиков антивирусных программ.

Подход, ориентированный на инфраструктуру, фокусируется на вредоносной инфраструктуре нарушителя. Из анализа этого элемента могут быть обнаружены другие связанные элементы: жертвы, контактирующие с этой инфраструктурой; возможности, предоставляемые или контролируемые с помощью данной инфраструктуры; другие связанные инфраструктуры (например, IP-адреса, разрешенные ARP-протоколом вредоносного домена) и, возможно, ключи к нарушителю, включая тех, кто может непосредственно контролировать инфраструктуру. Например, отчеты с результатами аудита таких выявленных доменов дают сведения о вредоносных программах, используемых в атаках против разных жертв, а также, вероятно, используемых одним и тем же нарушителем (поворот от инфраструктуры к возможностям).

Подход, ориентированный на нарушителя, является наиболее сложным, поскольку позволяет воссоздавать его поведение только в случае использования прямого мониторинга инициатора злонамеренных действий для обнаружения его инфраструктуры и возможностей.

Путем реализации аналитического вращения представленной конструкции аналитики экспертно или с применением специализированных программных средств автоматизированного анализа могут заполнять вершины элемента описания события по мере выявления ребер взаимосвязей между сущностями. При этом отличительной чертой такой модели является то, что нарушитель и его жертва помещаются в эквивалентное пространство, позволяющее устанавливать (выявлять) отношения между ними в контексте рассматриваемого события и/или групп событий, чего лишены традиционно используемые модели (например, модель угроз и модель нарушителя).

## **ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОЕ УПОРЯДОЧИВАНИЕ ВЕТОК АКТИВНОСТИ НАРУШИТЕЛЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ИХ В СТРУКТУРЕ ДЕРЕВА АТАКИ**

События, документированные посредством аналитического вращения, проходят Incident Response (IR)-процесс идентификации [7] в причинно-следственных цепочках дерева атаки с использованием  $n$ -фазного упорядочивания, так как каждая вредоносная активность состоит из последовательности фаз, успешное выполнение которых приводит к успеху активности в целом. Также события могут относиться к одной фазе и идти последовательно или параллельно.

Для выполнения дальнейшего анализа действий нарушителя идентифицированные события связываются на основе их функций в ветки активности, которые, в свою очередь, организуются вертикально в потоки активности таким образом, что каждый поток включает в себя все события, находящиеся в причинно-следственной связи и реализованные нарушителем против конкретной жертвы с учетом ее особенностей, а также направленные на выполнение его намерения. В связи с этим каждый поток специфичен для одной пары «нарушитель – жертва», хотя во многих случаях потоки активности могут иметь общие черты для нескольких жертв, поскольку нарушитель консолидирует инфраструктуру, процессы и возможности для снижения затрат.

Формально поток активности определяется как ориентированный конечный граф  $AT$ , представляемый в виде  $AT = (V, A)$  – упорядоченной совокупности событий и связывающих их дуг, где  $V$  – это набор всех событий, удовлетворяющий условию  $|V| \geq 1$  (существует по крайней мере одно событие в потоке), состоящий из подмножеств (веток активности), каждое из которых относится к одной и той же паре «нарушитель – жертва», и сгруппированных в  $p$  помеченных кортежей, где  $p$  – количество определенных фаз, при этом каждое событие помещается в кортеж, соответствующий его фазе;  $A$  – множество упорядоченных дуг для пар событий  $x$  и  $y$ , таких что  $arc(x, y)$  определена тогда и только тогда, когда нарушитель успеш-

но выполнил событие  $y$  из-за события  $x$  и событие  $x$  непосредственно предшествовало событию  $y$ , при этом дуги должны удовлетворять следующим условиям:

- к любому событию может существовать более одной дуги [например, при наличии трех событий  $x$ ,  $y$  и  $z$  может существовать путь от  $x$  к  $y$  –  $arc(x, y)$ , а также путь от  $z$  к  $y$  –  $arc(z, y)$ ];
- из любого события может существовать более одной дуги [например, при наличии трех событий  $x$ ,  $y$  и  $z$  может существовать путь от  $x$  до  $y$  –  $arc(x, y)$  и путь от  $x$  до  $z$  –  $arc(x, z)$ ];
- может существовать только один путь от одного события к другому, т. е. каждая дуга определена уникальной в графе упорядоченной парой событий [например, при наличии двух событий  $x$  и  $y$  может существовать только один путь от  $x$  до  $y$  –  $arc(x, y)$ ].

Элементы множества  $A$  помечаются 4-мерным кортежем вида  $\langle Confidence, And / Or, Hypothetical / Actual, Provides \rangle$ , где *Confidence* определяет аналитическую достоверность существования причинной связи между  $x$  и  $y$ ; *And / Or* определяет либо необходимость пути от  $x$  к  $y$  для успешности  $y$  (*And*), либо его альтернативность и необязательность для достижения  $y$  из  $x$  (*Or*); *Hypothetical / Actual* отличает гипотетическую дугу от фактической, т. е. подтвержденной доказательствами; *Provides* определяет ресурсы, которые  $x$  предоставляет  $y$ , перечисленные в функции события *Resources* и удовлетворяющие требованиям успешности.

Таким образом, поток активности – это множество событий, объединенных на основе функций, представленное направленным фазово-упорядоченным графом, где каждая вершина является событием, а дуги идентифицируют причинно-следственные связи между событиями, которые помечаются значением аналитической достоверности независимо от того, является ли путь конъюнктивным (необходимым) или дизъюнктивным (необязательным, т. е. существует более одного потенциального пути от события), является ли дуга фактической или гипотетической. Взаимосвязь между событиями определяется информацией или ресурсом, предоставленными предыдущим событием и необходимыми для реализации следующего события.

На рис. 3 показан пример визуализации фазово-направленной деятельности нарушителя в виде потоков активности, иллюстрирующих события, связанные вертикально (внутри одной жертвы) и горизонтально (между жертвами) с помощью направленных дуг, обозначающих причинно-следственную связь между событиями, что в совокупности представляет собой граф активности атаки.

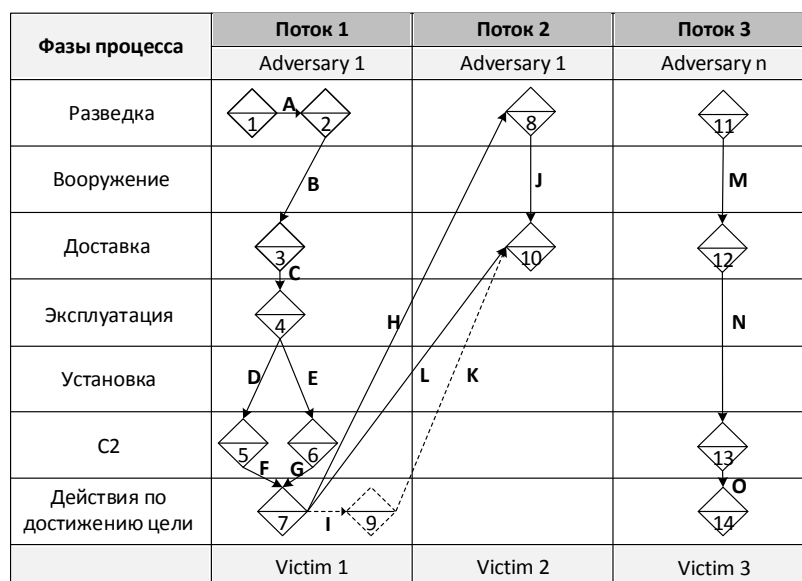


Рис. 3. Визуализация фазово-направленной деятельности нарушителя в виде потоков активности

В данном примере множество событий  $V$  представлено набором элементов  $\{v1, \dots, v14\}$ , включающим как наблюдаемые, так и предполагаемые события, образующие потоки для соответствующих пар «нарушитель – жертва» с нижеследующим описанием событий в них.

Поток 1:  $v1$  – веб-поиск домена целевой инфраструктуры;  $v2$  – поиск адресов электронной почты администраторов сети в обнаруженном домене;  $v3$  – отправка фишинговых электронных писем с троянским вложением сетевым администраторам, найденным в событии  $v2$ ;  $v4$  – открытие одним из сетевых администраторов (NA1) целевой инфраструктуры вредоносного вложения, запускающего эксплойт с кодом полезной нагрузки;  $v5$  – отправка хостом NA1, эксплуатируемым в событии  $v4$ , сообщения HTTP Post на внешний IP-адрес и получение в ответ HTTP Response;  $v6$  – выявление в результате реверс-инжиниринга вредоносного ПО на хосте NA1 дополнительно настроенного IP-адреса в качестве резервного, если первый хост не отвечает;  $v7$  – создание вредоносным ПО прокси-соединения TCP через командно-контрольное сообщение HTTP Response, отправленное на хост NA1;  $v9$  – нарушитель выбирает адрес электронной почты целевой жертвы из сформированного ранее списка (предполагаемое).

Поток 2:  $v8$  – выполнение веб-поиска жертв интереса через прокси-сервер хоста NA1;  $v10$  – получение целевой жертвой фишингового электронного письма от хоста с адресом электронной почты NA1 и той же полезной нагрузкой, что и в событии  $v3$ .

Поток 3:  $v11$  – сканирование уязвимых веб-серверов, включая жертву 3;  $v12$  – доставка по сети жертве 3 эксплойта для уязвимости, проверенной ранее в событии  $v10$ ;  $v13$  – активация удаленного управления (C2) эксплуатируемым сервером (жертва 3);  $v14$  – использование удаленного управления для скачивания документов из частного каталога жертвы 3.

Элементы множества  $A$  упорядоченных дуг для каждой пары событий будут представлены кортежами с нижеследующим описанием дуг в потоках активности.

В потоке 1:  $A - arc(v1, v2) = \langle \text{Низкая, И, Факт, «Предоставление домена целевой инфраструктуры»} \rangle$ ,  $B - arc(v2, v3) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Предоставление адресов электронной почты администраторов сети для целевого фишинга»} \rangle$ ,  $C - arc(v3, v4) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Не определено»} \rangle$ ,  $D - arc(v4, v5) = \langle \text{Высокая, ИЛИ, Факт, «Не определено»} \rangle$ ,  $E - arc(v4, v6) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Не определено»} \rangle$ ,  $F - arc(v5, v7) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Не определено»} \rangle$ ,  $G - arc(v6, v7) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Не определено»} \rangle$ ,  $I - arc(v7, v9) = \langle \text{Низкая, И, Гипотеза, «Доступ к списку контактов электронной почты»} \rangle$ .

К потоку и в потоке 2:  $H - arc(v7, v8) = \langle \text{Средняя, И, Факт, «Предоставление прокси-доступа от предыдущей жертвы к поиску целевой»} \rangle$ ,  $J - arc(v8, v10) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Идентификация целевой жертвы»} \rangle$ ,  $L - arc(v7, v10) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Электронное письмо с фишинговым вложением»} \rangle$ ,  $K - arc(v9, v10) = \langle \text{Низкая, И, Гипотеза, «Идентификация адреса электронной почты, имени и роли жертвы»} \rangle$ .

В потоке 3:  $M - arc(v11, v12) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Обеспечение вывода успешных результатов сканирования, идентифицирующих веб-сервер жертвы как уязвимый для эксплойта»} \rangle$ ,  $N - arc(v12, v13) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Не определено»} \rangle$ ,  $O - arc(v13, v14) = \langle \text{Высокая, И, Факт, «Обеспечение установки удаленного управления (C2)»} \rangle$ .

Природа потоков активности разрешает событию (конкретно – его вершине) удовлетворять одному или нескольким требованиям к ресурсам другого события, позволяя происходить более позднему событию, а объединение их в цепочку происходит по принципу – то, что выступало жертвой или возможностью в одном событии, может стать инфраструктурой в следующем. При этом для возникновения связи событиям не обязательно относиться к одному потоку активности. Это могут быть зависимые потоки. Более того, потоки активности, могут представлять собой вариации реальных событий, а также прогнозирования вероятности и предпочтения нарушителем определенных путей.

Например, так как обычно нарушитель использует ресурсы, полученные в ходе одной операции, для обеспечения будущих операций или использует внутренние доверительные

отношения для получения более глубокого доступа к конкретной сети (известно как боковое перемещение), в отличие от наблюдаемых событий потока 1, событие  $v_9$  представляется как гипотетический источник ресурсов, определенный функцией *Resources* события  $v_{10}$  (сетевой доступ для отправки, доступ к учетным записям и целевой адрес электронной почты, а также вредоносная программа для вложения и активы, используемые в качестве инфраструктуры для создания электронной почты, которая «обойдет» фильтры и побудит цель выполнить вредоносную программу) и обобщающий дуги  $I$  и  $K$ , вырождающиеся в дугу  $L$ , обосновывая взаимосвязь события  $v_7$  с наблюдаемым событием  $v_{10}$  потока 2.

Кроме того, наблюдаемый поток 3 не имеет известных связей с двумя другими и относится к неизвестному противнику, использующему специфический локальный эксплойт, проверенный ранее в событии  $v_{10}$ , против жертвы, обладающей общими чертами с *Victim 2*. Это подчеркивает существование общего пространства угроз, в котором две или несколько жертв удовлетворяют потребности одного или нескольких противников.





Организованные подобным образом потоки активности дают возможность обеспечения реализации аналитического процесса вертикальной корреляции событий для установления всех причинно-следственных связей между ними и определения недостающих значений метрик соответствующих им дуг в пределах потока активности одной пары «нарушитель – жертва». Соответственно, сформированное множество потоков активности позволяет выявлять взаимосвязь событий различных потоков, использовать знания из одного потока активности для заполнения пробелов в знаниях в другом и определять общие черты между жертвами в рамках аналитического процесса горизонтальной корреляции по нескольким парам «нарушитель – жертва». Такая корреляция событий между потоками дает возможность обобщать сведения о действиях нарушителей и на этой основе определять группы типовых действий.

В совокупности вертикальные и горизонтальные связи в графе активности атаки эффективно описывают непрерывный процесс действий нарушителя, который в модели дополнительно детализируется самими событиями, содержащими особенности отдельных действий (например, возможность и используемая инфраструктура, конкретная методология, применяемые внешние ресурсы). Совместно описания событий и взаимосвязи между ними определяют, каким образом нарушитель выполнял свои операции, и его методы работы (*modus operandi*).

Исходя из вышесказанного, объекты  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_4$  и  $v_6$  рассматриваемого графа активности могут быть извлечены в подграф, определяющий типовой процесс нарушителя, который обычно классифицируется как процедура разведки и включает в себя веб-поиск «сетевой администратор», с последующим (но не обязательно немедленно) вручением сообщения электронной почты с троянизированным вложением, за которым следует конкретный и известный эксплойт на локальном компьютере (например, CVE-YYYY-XXX), и, наконец, HTTP-запрос POST, исходящий от жертвы (рис. 4).

Таким образом, формально процессы нарушителя определяются как подграфы потоков активности, которые содержат подмножество их признаков. Теперь каждый подобный процесс может быть использован для сопоставления с любыми другими наблюдаемыми потоками активности, демонстрирующими тот же общий порядок событий и состав функций, по признаку поток, содержащий заданный процесс, будет относиться к группе действий такого типа.

Данная формализация процессов нарушителя позволяет достичь определенного уровня повторяемости в ходе анализа вторжений, задавая гипотетические события и собирая доказательства (например, журналы событий хоста) факта их проявления, что делает гипотезу измеримой и проверяемой. Выстроенный таким образом анализ событий информационной безопасности позволяет делать экспертные заключения по наличию в системе типовых действий нарушителя, сравнивая их с классифицированным оригиналом.

Фазы	Типовой процесс	Особенности
Разведка		Веб-поиск «сетового администратора» [производное от события 2]
Вооружение		
Доставка		Письмо с троянским вложением доставлено [производное от события 3]
Эксплуатация		Специфический локальный эксплойт (например, CVE-YYYY-XXX) [производное от события 4]
Установка		
C2		HTTP Post от жертвы [производное от события 6]
Действия по достижению цели		

*Рис. 4. Пример типового процесса нарушителя, полученного из наблюдаемых ранее потоков активности*

Пользуясь способностью выявлять и формулировать общие черты нарушителя и его поведение, аналитики могут группировать похожие потоки, которые совместно используют сходные процессы, без необходимости совпадения их по точным признакам (например, один и тот же IP-адрес инфраструктуры, одна и та же возможность) для каждого события, фокусируясь на процесс нарушителя, а не на единичные флаги, сигнализирующие о нарушениях. А значит, модель может быть применена к решению более широких аналитических проблем, таких как моделирование сложных организаций противника, путем кластеризации событий и потоков в группы активности, которые, в свою очередь, могут быть иерархически выстроены и организованы в семейства активности, представляющие собой более сложные процессы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная модель отражает сущность деятельности вторжения как набора причинно-следственных событий, связанных в потоки активности, документирующие сквозной процесс противника, и позволяет заполнить пробелы в знаниях в ходе развития атаки. Функции событий позволяют описать детали атаки, а результатом является более точная и быстрая генерация и проверка гипотез в ходе текущих IR-расследований. Накладывая множество горизонтально связанных потоков активности на дерево атаки, возможно прогнозировать следующее или пропущенное при расследовании событие, а свидетельства предыдущих вредоносных действий позволяют оценить вероятность наличия текущих и (или) будущих действий. Используя такое расширенное знание, аналитик имеет возможность не только обнаружить и подтвердить вторжение, что доступно с традиционными индикаторами, но и определить, является ли оно частью организованной деятельности нарушителя, а также целевую информацию и намерения нарушителя.

Модель детализирует фундаментальные аспекты вредоносной деятельности, а также применение основных аналитических концепций, используемых для обнаружения, мониторинга, группирования и в конечном счете противодействия как процессу активности, так и намерениям противника. Построение потоков активности в рамках разработанной модели позволяет определять и прогнозировать фазово-направленные процессы реализации нарушителем вредоносных воздействий, что обосновывает возможность ее применения в системах обнаружения вторжений [6], а уровень ее абстракции достаточен для соотнесения атакующих действий с применяемыми действиями по защите и построению эшелонированной (относи-

тельно фаз воздействия) системы защиты информации с выбором средств защиты для закрытия наиболее используемых возможностей атакующих.

В конечном итоге модель предоставляет возможности для автоматизации корреляции между событиями и кластеризации их потоков, а также прогнозирования действий нарушителя при планировании в игровых стратегиях противоборствующих сторон. Поиск и документирование инцидентов с применением данной модели предоставляет фреймворк для описания процесса атаки и конвертации результатов расследования в базы индикаторов компрометации TI [8].

В данном контексте требуется проведение дальнейших исследований по развитию возможности применения представленной модели к решению задачи определения координатора атакующих действий путем обнаружения общих признаков проявления событий и нахождения подобия в видах активности, а в дальнейшем с использованием функций их кластеризации проводить идентификацию группировок противника.

Кроме того, при использовании данной модели в анализе событий вторжений подходом, ориентированным на противника, и представления потоков активности потенциальными вариантами атак появляется возможность построения системы ИБ с точки зрения атакующего и перехода на этой основе от реактивных к проактивным действиям по обеспечению защиты информационной инфраструктуры.

#### Список используемых источников

1. *Richards J. Heuer Jr.* Psychology of Intelligence Analysis // Central Intelligence Agency. – 1999. – 214 p.
2. *Cris Carreon* Applying Threat Intelligence to the Diamond Model of Intrusion Analysis. – July 25, 2018. – URL: <https://www.recordedfuture.com/diamond-model-intrusion-analysis/> (дата обращения: 19.03.2021).
3. Cyber Kill Chain. – URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/cyber/cyber-kill-chain.html> (дата обращения: 26.03.2021).
4. MITRE ATT&CK. – URL: <https://attack.mitre.org/> (дата обращения: 26.03.2021).
5. The Honeynet Project. – URL: <https://www.honeynet.org/> (дата обращения: 26.03.2021).
6. Putting Intelligence to Work. – URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/cyber/intelligence-driven-defense.html> (дата обращения: 12.03.2021).
7. Incident Response Guide. – URL: [https://media.kasperskycontenthub.com/wp-content/uploads/sites/43/2018/03/07171449/Incident\\_Response\\_Guide\\_eng.pdf](https://media.kasperskycontenthub.com/wp-content/uploads/sites/43/2018/03/07171449/Incident_Response_Guide_eng.pdf) (дата обращения: 02.04.2021).
8. Threat Intelligence Platforms: The Next 'Must-Have' For Harried Security Operations Teams. – URL: <https://www.darkreading.com/threat-intelligence-platforms-the-next-must-have-for-harried-security-operations-teams/d/d-id/1320671> (дата обращения: 02.04.2021).

С.В. Агишев;  
И.О. Голиков,  
*кандидат техн. наук;*  
Е.Л. Лебедев,  
*доктор техн. наук, профессор*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДГОТОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С помощью модели оценивания отдельных технологических операций проанализирован процесс функционирования подсистемы подготовки КА с точки зрения эффективности подготовки КА в целом (с учетом самых разнообразных факторов).

Представлены аналитические зависимости оценивания моментных и спектрально-корреляционных характеристик с применением алгоритмов подсчета числа пересечений траекторией телеметрируемого процесса заданных уровней. Предлагается способ обнаружения нелинейных изменений вероятностных характеристик телеметрируемых параметров, основанный на регистрации числа пересечений реализацией процесса заданных уровней. Сформировано признаковое пространство для различения процессов с  $\chi$ -распределениями (Релея, Максвелла) и Гаусса.

Ключевые слова: деградационная модель, средство измерений, метрологический отказ, надежность.

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации средств измерения (СИ) под воздействием различных факторов (внешней среды, внутренних тепловых шумов, источников питающих напряжений) происходит деградация СИ, что приводит к возникновению отказов СИ. На основе проведенных исследований установлено, что по характеру проявления отказы СИ подразделяются на функциональные и метрологические.

Функциональные (внезапные) отказы проявляются в виде резкого скачкообразного изменения основных параметров под влиянием одного или нескольких случайных факторов. К функциональным отказам относятся многие виды конструктивных, производственных и эксплуатационных отказов (обрывы растяжек, проводов катушек, паек, отказы комплектующих элементов и др.).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДГОТОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Большой объем статистических исследований позволяет утверждать, что характерной особенностью функциональных отказов является постоянство во времени их интенсивности, т. е. для таких отказов

$$\lambda_{\phi}(t) = \lambda_{\phi} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\phi}$  – интенсивность функциональных отказов. Значения  $\lambda_{\phi}$  для электроизмерительных приборов приведены в работе [1].

Расчет показателей надежности по функциональным отказам сводится к определению общей интенсивности отказов СИ по интенсивностям отказов его элементов. В частности, при



последовательном (с точки зрения надежности) соединении элементов СИ общую интенсивность функциональных отказов можно определить следующим образом:

$$\lambda_{\phi} = \sum_{i=1}^n \lambda_i m_i, \quad (2)$$

где  $n$  – количество типов элементов, входящих в состав СИ;

$i$  – порядковый номер элемента СИ;

$m_i$  – количество элементов  $i$ -го типа.

Для большинства серийно выпускаемых электрических и радиотехнических элементов СИ (транзисторов, резисторов, конденсаторов, сопротивлений и т. п.) применяются специальные таблицы, в которых указаны интенсивности их отказов ( $\lambda$ -характеристики).

Функция распределения времени безотказной работы  $\hat{t}_{\phi}$  определяется по формуле

$$F_{\hat{t}_{\phi}}(t) = 1 - l^{-\lambda_{\phi} t} \quad (3)$$

с учетом получаемых значений интенсивности отказов СИ, вычисленных по формуле (2).

Метрологические (постепенные) отказы СИ проявляются в виде плавного изменения параметров в результате старения или износа. К метрологическим отказам относятся: уход параметров намоточных сопротивлений, износ зерна в паре «жерн – подпятник подвижной системы», уменьшение сопротивления изоляции, изменение магнитной индукции магнитной системы и др. Время наступления постепенного отказа функционально связано с интенсивностью физических процессов, происходящих в работающем приборе. Как правило, такие отказы являются скрытыми (и поэтому наиболее опасными), т. е. их можно обнаружить только при поверках СИ. Метрологические отказы снижают точность измерений параметров СС (сложных систем).

Точность измерений параметров СС обусловлена в общем случае инструментальными, методическими и личными погрешностями [2, 3]. При измерениях параметров СС в основном проводят однократные измерения, при которых СИ применяются обычно в тех условиях, в которых гарантируются их метрологические характеристики. Поэтому считается [4], что методические и личные погрешности учтены в точности СИ, и погрешность измерений полностью определяется инструментальной погрешностью СИ, обусловленной свойствами СИ.

Правильная достоверная оценка инструментальной погрешности СИ является одной из главных задач технологических измерений. Специфика ее заключается в том, что она, как правило, должна решаться до проведения измерений на стадии выбора или проектирования измерительных процессов, и единственным практически доступным способом ее решения в этом случае являются расчетные оценки инструментальной погрешности по нормированным в технической документации на СИ метрологическим характеристикам. Под метрологическими характеристиками понимаются такие характеристики свойств СИ, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений. Способы нормирования, оценивания и использования метрологических характеристик подробно изложены в ГОСТ 8.009-84 и методических приложениях к нему.

Комплекс нормируемых метрологических характеристик должен позволять оценить и описать все четыре указанных составляющих (в общем случае представляющих собой случайные процессы) и описать в такой форме, чтобы при расчете инструментальной погрешности в реальных условиях применения СИ их можно было статистически объединить. Методы расчета инструментальных погрешностей измерений по нормированным метрологическим характеристикам имеются в работах [2, 5].

Для использования на практике вероятностного подхода к оценке погрешностей результатов измерений прежде всего необходимо установить для данной конкретной погрешности  $\hat{y}$  вид аналитической модели закона распределения  $\varphi_{\hat{y}}(y)$ . Возможность идентификации формы распределения экспериментальных данных ограничена в первую очередь малостью объема выборки. Поэтому приобретает большое значение накопление данных и составление каталога распределений погрешностей СИ, участвующих в подготовке КА к применению.

Погрешность СИ не остается постоянной, а существенно меняется во времени, поэтому реальную точность прибора следует оценивать с учетом стабильности его метрологических характеристик. С этой точки зрения под метрологическим отказом понимается «выход» метрологических характеристик за допускаемые пределы [6].

Решение задач метрологической надежности, сущность которых заключается чаще всего в определении начальных изменений метрологических характеристик во времени и экстраполяции полученных результатов на значительный интервал времени, должно базироваться на глубоком изучении физического механизма процессов, протекающих во времени. Довольно широкое распространение получил способ описания функционирования СИ полиномиальной моделью [7]. Данный способ предполагает, что в силу сложности СИ получить систему дифференциальных уравнений, описывающих механизм явления, невозможно. Далее предполагается, что уравнения имеют решение, которое также неизвестно и неизвестен аналитический вид функции, которой оно задается. Коэффициенты полинома, используемого в качестве модели, можно интерпретировать как коэффициенты ряда Тейлора, т. е. как частные производные разложения неизвестной функции, задающей решение неизвестных дифференциальных уравнений. Пользуясь статистическими методами, можно оценить степень адекватности представления результатов полиномом заданного порядка. Однако, зная численные значения коэффициентов отрезка ряда Тейлора, нельзя восстановить исходную функцию, аналитическое выражение которой остается неизвестным, и тем более дифференциальные уравнения, которыми описывается механизм процесса. Другими словами, исследователь ищет связь между выходным параметром и множеством входных параметров, почти ничего не зная о механизме явлений, протекающих в исследуемом СИ. В связи с этим область применения подобного метода анализа метрологической надежности СИ ограничена.

Для исследования метрологической надежности СИ на этапе проектирования перспективными являются модели, связывающие выходные характеристики СИ с параметрами комплектующих элементов, которые, в свою очередь, зависят от внешних воздействий и времени [1, 8]. Модели этого типа позволяют исследовать метрологическую надежность СИ на ранних стадиях проектирования. Они эффективны для СИ, где наибольшее влияние на метрологические характеристики оказывают свойства комплектующих элементов, их функциональное назначение, физическая реализация и взаимодействие. Однако область применения моделей такого типа ограничена СИ, функционирование которых может быть описано некоторой системой линейных уравнений.

Другая группа способов исследования метрологической надежности СИ основывается на описании изменения во времени метрологических характеристик аппаратом случайных функций [9]. При этом используются разные модели: нестационарного случайного процесса, авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего и ряд других. Эти модели могут применяться на заключительных этапах проектирования, когда имеются опытные образцы, и при анализе серийно выпускаемых СИ.

Еще одним способом исследования метрологической надежности СИ является определение закона распределения  $\varphi_{t_M}(t)$  времени безотказного функционирования СИ (по метрологическим отказам). На основе исследований, опубликованных в работах [10, 11], установлено, что в зависимости от типа СИ время безотказной работы по отношению к метрологическим отказам может быть описано нормальными и логарифмически нормальными

законами распределений. В работе [10] показано, что для учета нестационарного характера процесса изменения погрешностей СИ на этапе их эксплуатации может быть использовано  $\alpha$ -распределение, частотность которого имеет вид

$$\varphi_{\hat{t}_M}(t) = \frac{\beta}{t^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{t} - \alpha\right)^2\right], \quad (4)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметры  $\alpha$ -распределения, называемые относительной средней скоростью изменения параметра и относительным запасом долговечности соответственно.

В случае отсутствия исходных данных для идентификации закона распределения времени безотказной работы СИ принимается экспоненциальный закон распределения. В эксплуатационной документации на СИ довольно часто приводится показатель надежности СИ в виде  $T_0$  – наработки на отказ СИ. В этом случае наработку на метрологический отказ можно считать по формуле

$$T_M = T_0 / [8760(K_n + 0,01)к], \quad (5)$$

где  $T_0$  – наработка на отказ СИ;

$K_n$  – коэффициент использования СИ;

$к$  – коэффициент, характеризующий отношение наработки на метрологический отказ к наработке на отказ СИ.

Знание вида закона распределения  $\varphi_{\hat{t}_M}(t)$  и его параметров позволяет определить вероятность  $P_M(t)$  работы СИ без метрологических отказов за время следующим образом:

$$P_M(t) = 1 - \int_0^t \varphi_{\hat{t}_M}(t) dt = \int_t^\infty \varphi_{\hat{t}_M}(t) dt. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что для исследования влияния изменения погрешности во времени на достоверность измерений модели изменения надежности СИ являются грубыми, так как учитывают только два состояния СИ: работоспособное и неработоспособное. Более точной моделью является представление погрешности СИ, имеющей плотность вероятностей  $\varphi_{\hat{y}}(y)$  в виде нестационарного случайного процесса. В работе [4] показано, что для большинства войсковых СИ изменение погрешности во времени представляет собой нестационарный нормальный процесс с плотностью вероятностей

$$\varphi_{\hat{y}}(y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D[\hat{y}(t)]}} l^{-\frac{y-M[\hat{y}(t)]}{2D[\hat{y}(t)]}}. \quad (7)$$

Для определения параметров распределения  $\varphi_{\hat{y}}(y, t)$  рассмотрим линейную модель погрешности, которая наиболее часто используется в метрологической практике:

$$\hat{y}(t) = \hat{y}_n + \hat{V}_y t, \quad (8)$$

где  $\hat{y}_n$  – начальная (на момент поверки или аттестации) погрешность СИ;

$\hat{V}_y$  – случайная (для совокупности СИ данного типа) скорость изменения погрешности.

Математическое ожидание и дисперсия функции, заданной выражением (6), определяются выражениями:

$$M[\hat{y}(t)] = M[\hat{y}_H] + tM[\hat{V}_y]; \quad (9)$$

$$D[\hat{y}(t)] = D[\hat{y}_H] + t^2D[\hat{V}_y] + 2tK[\hat{y}_H, \hat{V}_y], \quad (10)$$

где  $K[\hat{y}_H, \hat{V}_y]$  – коэффициент связи случайных величин  $\hat{y}_H$  и  $\hat{V}_y$ .

Так как у большинства СИ величины  $\hat{y}_H$  и  $\hat{V}_y$  определяются различными по природе факторами ( $\hat{y}_H$  – характеристиками операций градуировки, поверки СИ;  $\hat{V}_y$  – интенсивностью старения и износа элементов СИ), то выражение (10) принимает следующий вид:

$$D[\hat{y}(t)] = D[\hat{y}_H] + t^2D[\hat{V}_y]. \quad (11)$$

Способ экспериментальной оценки параметров принятой модели погрешностей СИ (8) заключается в следующем. Отбирается  $N$  образцов однотипных СИ. В процессе испытаний образцов определяют:

- 1) начальные (при  $t = 0$ ) значения погрешностей каждого образца  $\hat{y}_{H_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ );
- 2) изменения погрешностей за определенное время ( $t = \tau$ ) работы (изменения выходных сигналов) образцов:

$$\theta_i = y_i(\tau) - \hat{y}_{H_i}.$$

Затем для каждого образца подсчитывают скорость изменения погрешности  $V_{y_i} = \theta_i / \tau$  и для всей их совокупности вычисляют:

$$M^*[\hat{y}_H] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_{H_i}; \quad D^*[\hat{y}_H] = \frac{\{y_{H_i} - M^*[\hat{y}_H]\}}{N-1}; \quad (12)$$

$$M^*[\hat{V}_y] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n V_{y_i}; \quad D^*[\hat{V}_y] = \frac{\{V_{y_i} - M^*[\hat{V}_y]\}}{N-1}. \quad (13)$$

В первом приближении все необходимые параметры можно получить по результатам определительных или контрольных испытаний на надежность, а также в процессе эксплуатации по результатам первых двух проверок группы СИ. Однако, как отмечено в работе [9], погрешность полученных результатов может оказаться очень высокой. Поэтому в процессе дальнейшей эксплуатации СИ при накоплении статистических данных эти параметры необходимо уточнять, что позволит повысить достоверность определения плотности вероятностей, заданной выражением (7).

Таким образом, при исследовании деградиционной модели СИ используют либо модель скачкообразного изменения технического состояния СИ, либо модель случайного изменения во времени метрологических характеристик. Вопрос о применении той или иной модели решается в зависимости от имеющейся информации о характеристиках СИ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены модели деградации СИ, позволяющие учесть влияние процессов износа и старения эксплуатационно-технических характеристик СИ при их эксплуатации. Проанализированы различные методы определения показателей надежности СИ по отношению как к функциональным, так и метрологическим отказам. Показано, что при исследовании деградационной модели СИ можно использовать либо модель скачкообразного изменения технического состояния СИ, либо модель случайного изменения во времени погрешности СИ в зависимости от имеющейся информации о характеристиках СИ.

## Список используемых источников

1. *Екимов А.В., Ревяков М.И.* Надежность средств электроизмерительной техники. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
2. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
3. *Рабинович С.Г.* Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.
4. *Фунтиков А.Г.* Научные основы эксплуатации войсковых средств измерений. – М.: Военное изд-во, 1988. – 240 с.
5. *Рейх Н.Н., Тупиченков А.А., Цейтлин В.Г.* Метрологическое обеспечение производства. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 247 с.
6. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 22 с.
7. *Тюков Б.В.* Метод расчета надежности средств измерений по постепенным отказам // Метрология. – 1982. – № 1. – С. 3–9.
8. *Редкина В.П.* Исследование связи надежности различных групп электроизмерительных приборов с их конструктивными и технологическими особенностями: автореф. дисс. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – Киев, 1980. – 19 с.
9. *Лабунец В.С.* Исследование вероятностных характеристик потока метрологических отказов электроизмерительных приборов // Метрология. – 1990. – № 3. – С. 19–24.
10. *Кузнецов В.А., Петров В.А.* Закон распределения погрешностей измерения с учетом времени эксплуатации измерительных приборов // Измерительная техника. – 1992. – № 7. – С. 28–30.

Е.Н. Алёшин,  
*кандидат техн. наук;*  
В.Н. Воротягин;  
А.Н. Павлов,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
Д.А. Павлов,  
*кандидат техн. наук;*  
А.Б. Умаров

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СТРУКТУРНО- ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ МНОГОРЕЖИМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

На этапах проектирования, создания и применения сложных объектов для выработки решений, направленных на повышение их устойчивости, требуется оценивать показатели структурно-функциональной надежности с учетом задействования различных режимов функционирования. В данной статье предлагается концепция параметрического генома структуры сложных многорежимных объектов для вычисления интегральных показателей структурно-функциональной надежности. Приводятся результаты расчета значений указанных показателей на примере системы управления движением малого космического аппарата «Аист-2Д».

Ключевые слова: сложный многорежимный объект; структурно-функциональная надежность; схема функциональной целостности; параметрический геном.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В ходе выполнения этапов проектирования и создания сложных объектов (СЛО) одна из важнейших задач связана с необходимостью оценивания показателей структурно-функциональной надежности их элементов и подсистем.

Как правило, структурно-функциональный анализ СЛО начинается с построения схемы функциональной целостности (СФЦ) объекта [1, 2]. СФЦ представляет собой логически универсальное графическое средство структурного представления исследуемых свойств системных объектов. СФЦ позволяют корректно представлять как все традиционные виды структурных схем (блок-схемы, деревья отказов, деревья событий, графы связности с циклами), так и принципиально новый класс немонокотонных (некогерентных) структурных моделей различных свойств исследуемых систем. СФЦ СЛО позволяет графически представить логические условия реализации собственных функций элементами и подсистемами, а также цели моделирования – логические условия реализации исследуемого системного свойства, например безотказности или отказа СЛО, безопасности или возникновения аварии, реализации тех или иных режимов функционирования СЛО и т. п.

Как правило, СЛО является многофункциональной многорежимной системой [2]. В зависимости от изменения условий применения СЛО и его структурно-функциональных состояний выполнение тех или иных функций может осуществляться в нескольких режимах. При этом отдельные режимы несовместны (т. е. могут выполняться поочередно) и являются основными, а другие являются дополнительными и могут осуществляться одновременно с основными режимами. Поэтому функциональные вершины СФЦ отражают как работоспособность тех или иных функциональных элементов (ФЭ) СЛО, так и потребности в реализации тех или иных функций и режимов функционирования СЛО.

## КОНЦЕПЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНОМА СТРУКТУРЫ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Используя программный комплекс логико-вероятностного моделирования «Арбитр» [1], получим для СФЦ СЛО вероятностный полином успешного его функционирования:

$$\mathfrak{R}(P_1, P_2, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, Q_2, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m}), \quad (1)$$

где  $P_i(Q_i)$  – вероятность безотказной работы (отказа) ФЭ СЛО,  $i = 1, \dots, n$ ;  
 $P_{n+i}(Q_{n+i})$  – интенсивность потребности (невостребования) в реализации режимов функционирования СЛО,  $i = 1, \dots, m$ .

Обозначим интенсивности потребностей в реализации режимов функционирования СЛО через  $\alpha_i = P_{n+i}$ ,  $i = 1, \dots, m$ , а соответственно, интенсивность отсутствия потребности –  $\beta_i = 1 - \alpha_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Далее, исходя из предположения, что все ФЭ СЛО однородные по вероятности безотказной работы (т. е.  $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$ ), вероятностный полином успешного функционирования объекта (1) можно преобразовать к следующему виду:

$$\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^2 + \dots + \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^n. \quad (2)$$

По аналогии с введенным в работе [2] понятием генома структуры назовем вектор  $\bar{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m))^T$  *параметрическим геномом структуры*.

Используя параметрический геном структуры СЛО, можно вычислить интегральные оценки структурно-функциональной надежности СЛО, зависящие от параметров  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  интенсивности потребностей в реализации режимов функционирования СЛО.

Так, в случае вероятностного описания безотказной работы ФЭ для однородной структуры (одинаковая вероятность безотказной работы ФЭ СЛО) функция успешного функционирования СЛО, представленная полиномом

$$\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^2 + \dots + \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^n,$$

изменяет свои значения в интервале  $[0, 1]$ . Причем, чем ближе график функции к прямой  $\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 1$ , тем выше структурно-функциональная надежность СЛО. Поэтому в качестве интегрального показателя структурно-функциональной надежности в этом случае

предлагается использовать  $F_{\text{однор}}(\bar{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) dP$ . Тогда для вычисле-

ния показателя структурно-функциональной надежности СЛО можно использовать параметрический геном структуры по следующей формуле (3):

$$F_{\text{однор}}(\bar{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) dP = \sum_{i=0}^n \chi_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \cdot \frac{1}{i+1}$$

или

$$F_{\text{однор}}(\bar{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) dP = \bar{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right)^T. \quad (3)$$

В случае неоднородной структуры (различная вероятность безотказной работы ФЭ СЛО) можно использовать в качестве интегрального показателя структурно-функциональной

надежности объекта  $F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \dots \int_0^1 \mathfrak{R}(P_1, P_2, \dots, P_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) dP_1 dP_2 \dots dP_n$  или с использованием параметрического генома структуры формулу

$$F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T. \quad (4)$$

В случае, когда при выполнении функций ФЭ, входящих в структуру СЛО, не удастся выявить хорошо определенную стохастическую закономерность безотказной работы, то предлагается использовать нечетко-возможностный подход к описанию поведения ФЭ, в основе которого лежит понятие пространства с мерой возможности [2].

Так, в качестве интегрального показателя структурно-функциональной надежности СЛО при нечетко-возможностном описании поведения его ФЭ можно использовать [2] нечеткий интеграл по мере возможности:

$$F_{\text{однор-возм}}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min \{R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), g(\mu)\} = \sup_{\gamma \in [0,1]} \min \{\gamma, G(\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma\})\}. \quad (5)$$

Для вычисления интегрального показателя следует определить меру возможности  $G$  и, если возможно, ее функцию распределения  $g(\mu)$ .

Для *монотонных однородных структур* график полинома возможности безотказной работы  $R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  имеет вид, представленный на рис. 1.

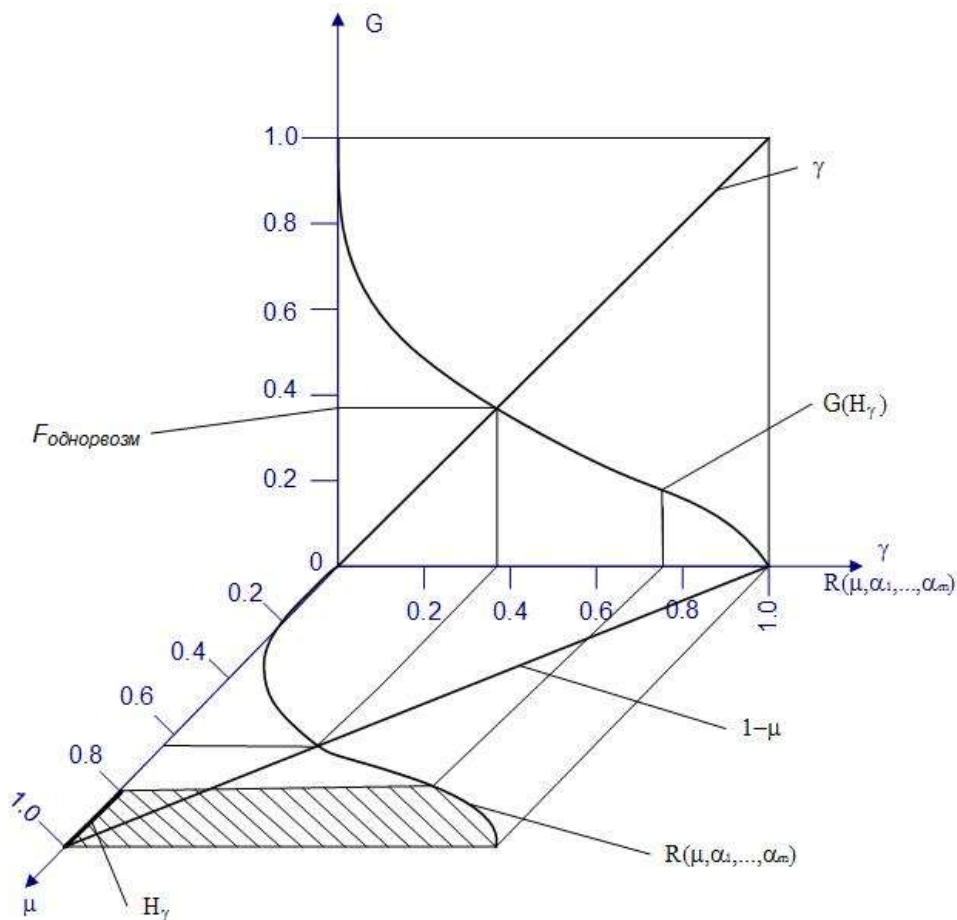


Рис. 1. Графическая интерпретация нахождения интегрального показателя возможности безотказной работы однородных структур



На рис. 1 полином

$$R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)\mu + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)\mu^2 + \dots + \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)\mu^n$$

получается из полинома  $\mathcal{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  заменой вероятности  $P$  безотказной работы ФЭ на возможность  $\mu$  безотказной работы ФЭ СЛО. В качестве меры возможности будем использовать  $G(\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma\}) = G(H_\gamma) = \sup_{A \subseteq H_\gamma} |A| = \sup_{R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma} \{1 - \mu\}$ , где  $|A|$  – мера Лебега. Следовательно, в случае монотонных однородных структур функцией распределения меры возможности является  $g(\mu) = 1 - \mu$ .

Тогда для рассматриваемого случая нечетко-возможностного описания безотказной работы ФЭ СЛО интегральный показатель возможности безотказной работы монотонной однородной структуры можно вычислять по формуле

$$F_{\text{однор.-возм}}(\tilde{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = 1 - \mu_*, \tag{6}$$

где  $\mu_*$  – решение уравнения  $\tilde{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \cdot (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = 1 - \mu_*$ .

Для немонотонных однородных структур полином возможности безотказной работы  $R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  либо не сохраняет «0» ( $R(0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 1$ ), либо не сохраняет «1» ( $R(1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 0$ ). Графики полиномов возможности безотказной работы представлены на рис. 2.

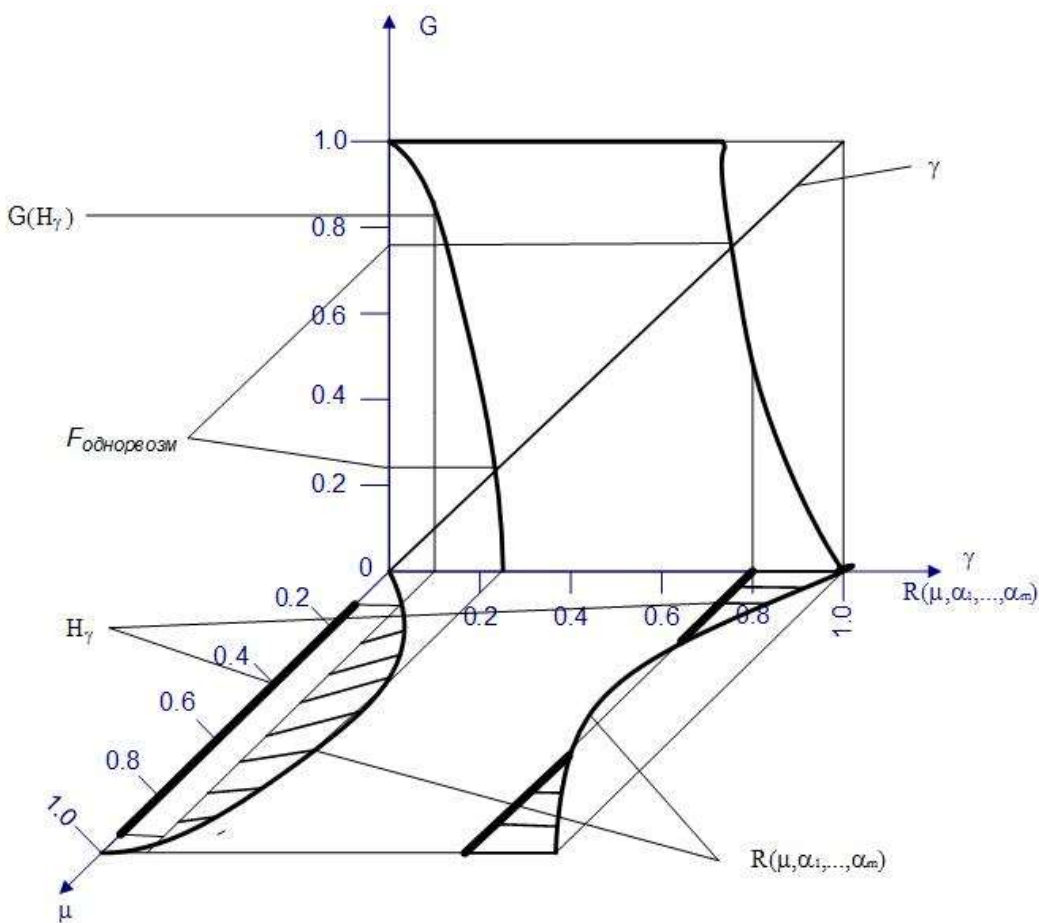


Рис. 2. Графическая интерпретация нахождения интегрального показателя возможности безотказной работы немонотонных однородных структур

Мера возможности, когда  $R(1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 0$ , есть

$$G(\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma\}) = G(H_\gamma) = \sup_{A \subseteq H_\gamma} |A| = \sup_{R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma} \{\mu^{\max} - \mu^{\min}\},$$

где  $\mu^{\max} = \sup\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma\}$  и  $\mu^{\min} = \inf\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma\}$ .

Мера возможности, когда  $R(0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 1$ , есть

$$G(\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \leq \gamma\}) = G(H_\gamma) = \sup_{A \subseteq H_\gamma} |A| = \sup_{R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \leq \gamma} \{1 - (\mu^{\max} - \mu^{\min})\},$$

где  $\mu^{\max} = \sup\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \leq \gamma\}$  и  $\mu^{\min} = \inf\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \leq \gamma\}$ .

Графическая интерпретация нахождения интегрального показателя возможности безотказной работы в данном случае представлена на рис. 2.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Проведем анализ структурно-функциональной надежности системы управления движением (СУД) малого космического аппарата (МКА) «Аист-2Д» [3]. Структурная схема СУД МКА «Аист-2Д» приведена на рис. 3. В соответствии с целевым предназначением МКА «Аист-2Д» для СУД можно выделить следующие режимы функционирования [3–5]: гашения угловых скоростей (ГУС); одноосной солнечной ориентации (ОСО); трёхосной ориентации в орбитальной системе координат (ОСК); проведения экспериментов (ПЭ). Как правило, СУД МКА включает чувствительные элементы и исполнительные органы. В данной работе основное внимание будет сосредоточено на структуре чувствительных элементов СУД МКА. К чувствительным элементам СУД МКА относятся: одноосные измерители угловой скорости, 4 шт.; оптические солнечные датчики (ОСД), 2 шт.; мини-блок определения координат звезд (мБОКЗ), состоящий из блока электроники и оптических головок (ОГ), 2 шт.; изделия 105М – приборы ориентации по Земле (ПОЗ), 2 шт.

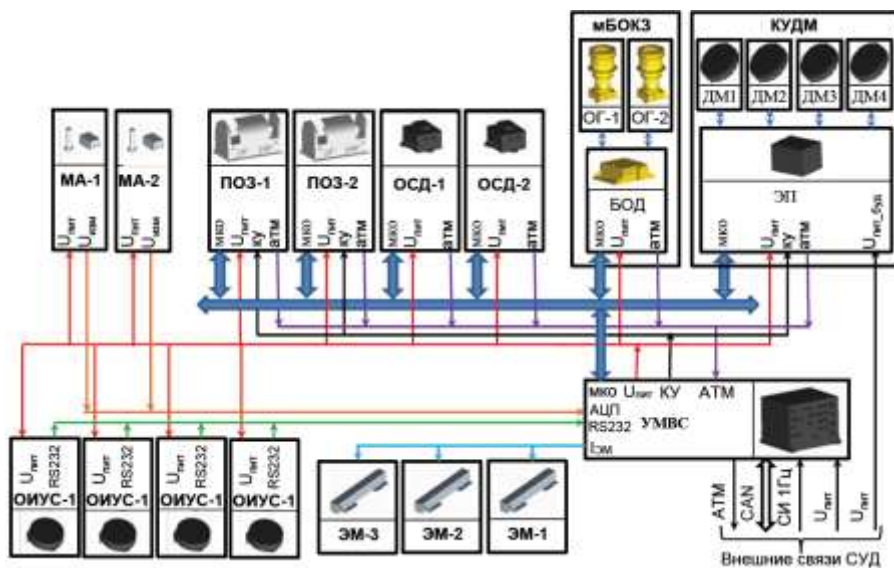


Рис. 3. Структурная схема СУД МКА «АИСТ-2Д»

Рассмотрим штатные алгоритмы ориентации для приведенных выше режимов функционирования МКА. Штатная схема режима ГУС для МКА «Аист-2Д» использует в качестве чувствительных элементов ОИУС, при этом для нахождения вектора угловой скорости достаточно измерений трех любых ОИУС [3–5]. Для штатного режима одноосной солнечной ориентации также используются три любых ОИУС и один любой ОСД. Трехосная ориентация в ОСК осуществляется с помощью трех любых ОИУС и ПОЗ. Режим ПЭ соответственно заключается в определении ориентации с помощью прибора мБОКЗ.

Практика эксплуатации МКА показывает, что помимо штатных алгоритмов определения ориентации разработчики бортовых систем также используют аварийные (нештатные) алгоритмы. К ним можно отнести: алгоритм приведения МКА в солнечную ориентацию с использованием солнечного датчика и одного ОИУС [6], который не должен быть сонаправлен ни с одной из осей КА; алгоритм по трехосной схеме ориентации в ОСК с использованием приборов ориентации на Землю и одним измерителем угловой скорости, расположенным в канале крена [7]; алгоритм по контрольно-резервной схеме высокоточного определения ориентации (КРСОО) [8], основанной на использовании одного ОИУС в канале крена, одного ПОЗ и одного ОГ мБОКЗ. Как видно из описания вышеприведенных алгоритмов ориентации, ключевыми элементами рассматриваемой СУД являются ОИУС. Данные приборы используются во всех режимах функционирования МКА, при этом алгоритмы ориентации зависят от того, как расположены оси ОИУС относительно осей, связанных с МКА. Предлагаются [9] различные схемы ориентации осей для четырех ОИУС. Рассмотрим одну из них – кубической конфигурации, когда три ОИУС расположены соосно осям МКА и четвертый – по диагонали куба.

Задействования чувствительных элементов в штатных и нештатных алгоритмах ориентации МКА для указанной конфигурации ОИУС приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Соответствие чувствительных элементов (ЧЭ) СУД и режимов функционирования МКА для кубической конфигурации ОИУС**

ЧЭ СУД	Алгоритмы ориентации для режимов функционирования МКА						
	ГУС	ОСО		ОСК		ПЭ	
		Штатная	Нештатная [6]	Штатная	КРСОО [7]	Штатная	КРСОО [8]
ОИУС	3 из 4	3 из 4	4 ОИУС	3 из 4	1 ОИУС	3 из 4	1 ОИУС
ОСД	–	1 из 2	1 из 2	–	–	–	–
ПОЗ	–	–	–	1 из 2	1 из 2	–	1 из 2
ОГ мБОКЗ	–	–	–	–	–	1 из 2	1 из 2

СФЦ СУД для выполнения задачи определения ориентации МКА в различных режимах и для кубической конфигурации ОИУС приведена на рис. 4. В табл. 2 представлено описание вершин СФЦ.

Фрагмент полинома СФЦ СУД МКА для конфигурации «Куб» имеет следующий вид:

$$\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = P^4(1-P)^6(1-\alpha_2)(1-\alpha_4) + P^2(1-P)^3(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\alpha_3(1-\alpha_4) + \dots - 4P^5(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\alpha_3(1-\alpha_4).$$

Для проведения исследования структурно-функциональной надежности СУД МКА воспользуемся формулами (3) – (5). При этом будем предполагать, что все режимы могут выполняться как индивидуально, так и совместно.

Результаты вычислений для  $\alpha_i \in \{0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , представлены на рис. 5.

Вариант 1 соответствует отсутствию задействования режимов ( $\alpha_1 = 0; \alpha_2 = 0; \alpha_3 = 0; \alpha_4 = 0$ ). Варианты со 2-го по 6-й отражают постепенное повышение от 0.2 до 1.0 интенсивности задействования режима ГУС с шагом 0.2. Варианты с 7-го по 11-й, с 12-го по 16-й, с 17-го по 21-й соответствуют повышению интенсивности режимов ОСО, ОСК и ПЭ соответственно.

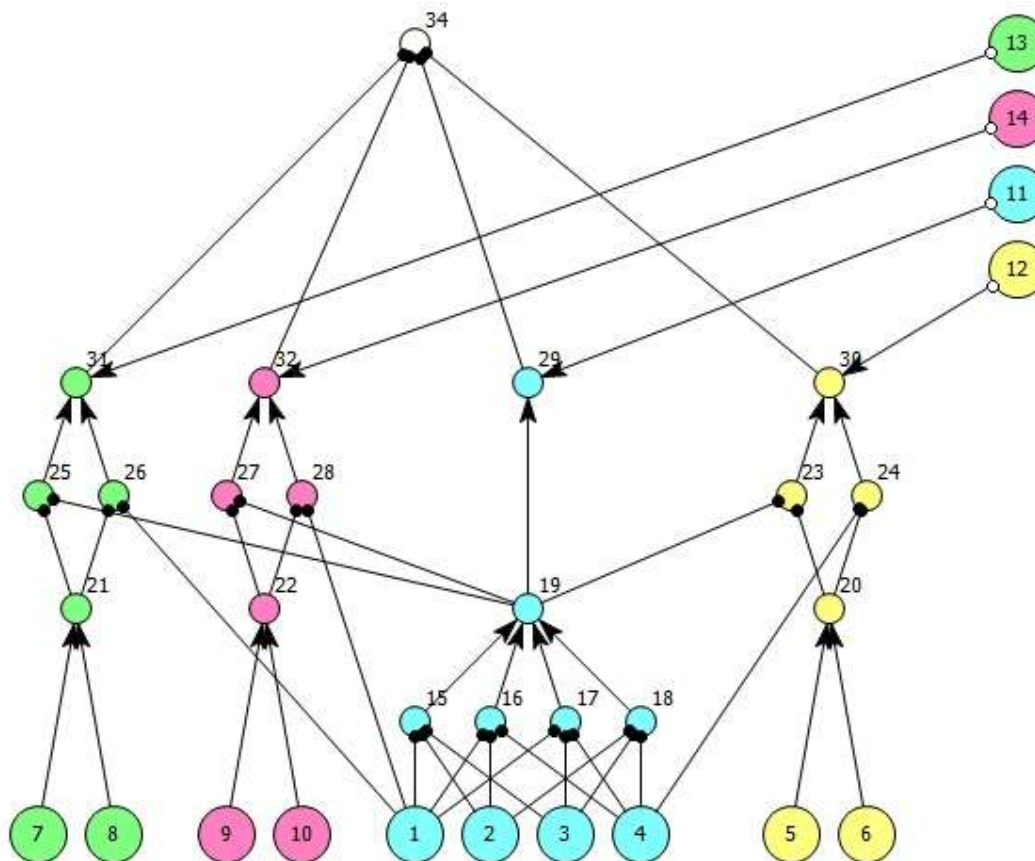


Рис. 4. СФЦ СУД для конфигурации «Куб»

Таблица 2

**Описание вершин СФЦ СУД МКА**

Номер вершины	Описание	Тип
1	Работоспособность ОИУС1	Функциональная
2	Работоспособность ОИУС2	
3	Работоспособность ОИУС3	
4	Работоспособность ОИУС4	
5	Работоспособность ОСД1	
6	Работоспособность ОСД2	
7	Работоспособность ПОЗ1	
8	Работоспособность ПОЗ1	
9	Работоспособность ОГ1 мБОКЗ	
10	Работоспособность ОГ2 мБОКЗ	
11	Потребность в режиме ГУС	
12	Потребность в режиме ОСО	
13	Потребность в режиме ОСК	
14	Потребность в режиме ПЭ	
15	Рабочая конфигурация ОИУС 1, 2, 3	Фиктивная
16	Рабочая конфигурация ОИУС 1, 2, 4	
17	Рабочая конфигурация ОИУС 1, 3, 4	
18	Рабочая конфигурация ОИУС 2, 3, 4	
19	Работают любые 3 ОИУС из 4	

Окончание табл. 2

20	Работает любой ОСД	Фиктивная
21	Работает любой ПОЗ	
22	Работает любая ОГ мБОКЗ	
23	Условие определения ориентации для штатного ОСО	
24	Условие определения ориентации для нештатного ОСО	
25	Условие определения ориентации для штатного ОСК	
26	Условие определения ориентации для КРСОО	
27	Условие определения ориентации для штатного ПЭ	
28	Условие определения ориентации для КРСОО при штатном определении ориентации на мБОКЗ	
29	Условия определения ориентации для режима ГУС	
30	Условия определения ориентации для режима ОСО (штатный и нештатный)	
31	Условия определения ориентации для режима ОСК или КРСОО	
32	Условия определения ориентации для режима ПЭ (или совместно с КРСОО)	
33	Условие неориентированного полета (когда нет потребности ни в одном из режимов)	
34	Определение ориентации СУД для всех режимов	

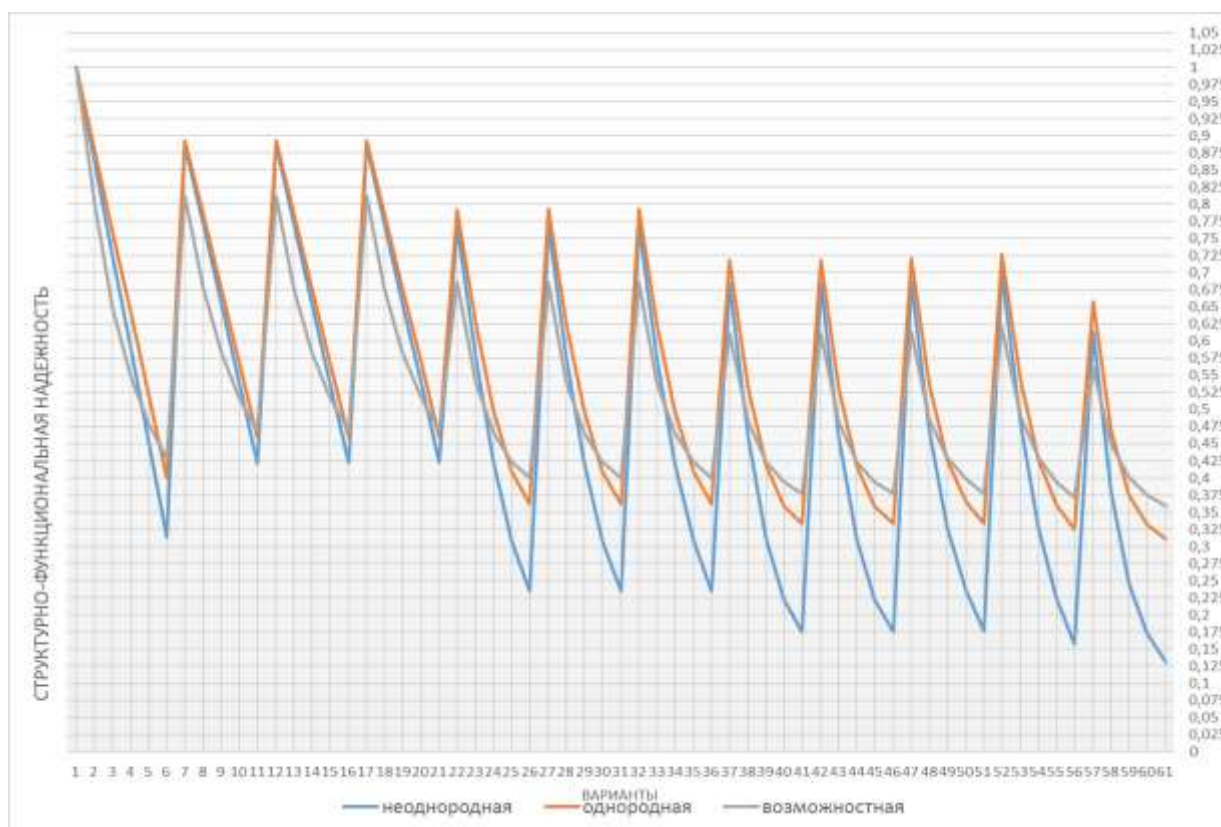


Рис.5. Структурно-функциональная надежность СУД МКА для конфигурации «Куб»

Далее варианты с 22-го по 26-й, с №27-го по 31-й, с 32-го по 36-й отражают структурно-функциональную надежность постепенного повышения совместного выполнения двух режимов ГУС и ОСО, ГУС и ОСК, ГУС и ПЭ соответственно. Затем расположены варианты совместного задействования трех режимов (ГУС, ОСО, ОСК; ГУС, ОСО, ПЭ; ГУС, ОСК, ПЭ; ОСО, ОСК, ПЭ). И, наконец, варианты с 57-го по 61-й – совместное задействование четырех режимов. Следует отметить, что при индивидуальном использовании режимов функционирования структурно-функциональная надежность СУД МКА является более высокой, чем при совместном использовании этих режимов. Кроме того, из графиков видно, что структурно-функциональная надежность имеет кусочно-линейную зависимость при измене-

нии интенсивностей задействования отдельно взятых режимов функционирования. Причем для однородной СУД МКА нельзя явно выделить наилучший вариант совместного задействования режимов функционирования в отличие от неоднородной системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи предложен подход к исследованию структурно-функциональной надежности сложных объектов путем вычисления интегральных оценок надежности с использованием параметрического генома структуры. Анализ результатов, приведенных в настоящей статье, показал, что выбор в пользу того или иного варианта задействования режимов функционирования СУД МКА не так очевиден и влияет на надежность функционирования СУД. Следует отметить, что исследование структурно-функциональной надежности и живучести сложных многофункциональных и многорежимных объектов, к которым, в частности, относятся МКА, с использованием предложенной концепции формального компактного представления структурного состояния системы требует дальнейшего продолжения.

## Список используемых источников

1. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография / В.И. Поленин [и др.]; под ред. А.С. Можаяева. – СПб.: СПб региональное отделение РАЕН, 2011. – 416 с.
2. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник / Е.Н. Алешин [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 357 с.
3. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А.Н. Кирилин [и др.]. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
4. Математическое обеспечение системы управления движением МКА / А.В. Филатов [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии: материалы Международной конференции и молодежной школы. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (Национальный исследовательский университет)», Самара, 29 июня-01 июля 2015 г. – Самара, 2015. – С. 290–294.
5. *Шипов М.Г.* Гашение угловых скоростей КА «Аист-2Д» с использованием системы сброса кинетического момента // Вестник самарского университета. Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2019. – № 2, т. 18 – С. 121–127.
6. *Шипов М.Г., Стеклова А.А., Давыдов А.А.* Приведение космического аппарата в солнечную ориентацию по измерениям одноосного датчика угловой скорости // Вестник самарского университета. Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2020. – № 1, т. 19. – С. 96–105.
7. *Беленький А.Д., Васильев В.Н., Семёнов М.Е.* Ориентация и стабилизация космического аппарата «Метеор-М» №2 в орбитальной системе координат // Вопросы электромеханики: труды ВНИИЭМ. – 2018. – № 6, т. 167. – С. 3–8.
8. *Богов А.Н., Сотников М.В., Вознюк А.М.* Контрольно-резервная схема определения ориентации для КА дистанционного зондирования Земли // Сборник трудов молодежной конференции ФГУП КБ Арсенал. – СПб., 2012. – С. 146–149.
9. *Mehdi Jafari* Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system // Aerospace Science and Technology. – 2015. – Vol. 47. – P. 467–472.



В.М. Ананенко,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
А.Д. Голяков,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
И.В. Фоминов,  
*доктор техн. наук, доцент*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ РОБАСТНОСТИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Представлен методический подход к оцениванию робастности бортовых систем навигации летательных аппаратов, функционирующих в условиях влияния возмущающих факторов различной физической природы. Приведены теоретические аспекты методологии Г. Тагути и теории планирования эксперимента, позволяющие сформулировать основные этапы исследования чувствительности навигационных систем к воздействию возмущающих факторов. В качестве подтверждения возможности применения теории планирования эксперимента к задаче оценивания робастности бортовых навигационных систем приведен пример влияния первичных ошибок определения опорной орбиты на определение навигационных параметров автономной навигационной системой космического аппарата, реализующей «зенитный» метод навигации.

Ключевые слова: робастность, теория планирования эксперимента, система навигации, летательный аппарат, возмущающие воздействия.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Основной задачей бортовой системы навигации (СН) как пилотируемого, так и беспилотного летательного аппарата (ЛА) является высокоточное и своевременное определение параметров движения центра масс – навигационных параметров (НП) в выбранной системе координат. Теоретическим и экспериментальным исследованиям точности и оперативности определения параметров движения ЛА посвящен ряд монографий и научных статей [1–8]. Известны работы, в которых поставлены и решены проблемы влияния различного рода внутренних и внешних возмущающих факторов (ВФ), способных привести к снижению точности оценок навигационных параметров ЛА [9–16]. В этих работах в качестве возмущающих факторов рассмотрены отказы измерительных приборов, входящих в состав СН ЛА [9–11], естественные помехи окружающей среды [12–15] и воздействия, возникающие в антагонистической среде [16].

Для парирования влияния возмущающих факторов и поддержания заданных показателей точности навигации ЛА в аппаратуру СН дополнительно вводятся специальные технические средства защиты [4, 6], а в программное обеспечение СН – статистические алгоритмы обработки результатов измерений, в том числе алгоритмы на основе адаптивных и робастных подходов [17–22].

Известно, что алгоритмы робастного оценивания навигационной информации ЛА позволяют обеспечить удовлетворительную точность определения параметров движения в условиях информационных сбоев в измерительных трактах, обусловленных переключением аппаратуры СН на различные режимы функционирования, а также при возникновении отказов измерительных приборов.

Опыт эксплуатации ЛА свидетельствует о том, что некоторые возмущающие факторы способны привести не только к снижению точности определения навигационных параметров, но и к потере чувствительности СН к изменению параметров движения ЛА. Поэтому при разработке перспективных ЛА повышенный интерес проявляется к таким СН, которые в

процессе летной эксплуатации сохраняют чувствительность к изменениям НП ЛА и нечувствительны к изменениям величин возмущающих факторов, то есть обладают свойством робастности.

Для оценивания робастности СН ЛА применяются методы, основанные на построении физических или математических моделей, экспертном оценивании воздействия возмущающих факторов на характеристики исследуемых систем, теории планирования эксперимента.

В настоящей статье описан методический подход к оцениванию робастности СН ЛА на основе теории планирования эксперимента в соответствии с методологией Г. Тагути [23].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ РОБАСТНОСТИ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

В соответствии с теорией планирования эксперимента на процесс функционирования СН ЛА оказывает влияние целый ряд факторов. При этом все факторы разделим на две группы: управляемые и неуправляемые.

В каждом эксперименте среди управляемых факторов выделим изменяемые в соответствии с программой эксперимента параметры, которые варьируются исследователем, и параметры, которые остаются постоянными и в ходе эксперимента не изменяются. К изменяемым параметрам относятся составляющие вектора  $Q(t)$ , которые представляют собой первичные измеряемые параметры движения ЛА, и составляющие вектора  $W(t)$ , которые представляют собой управляемые факторы.

К исследуемым факторам (ИФ) отнесем используемые для определения оценок НП ЛА алгоритмы обработки навигационной информации, выбранный состав первичных навигационных параметров, характеристики навигационной измерительной аппаратуры, условия или режимы проведения навигационных измерений, алгоритмы функционирования СН и другие факторы.

Неуправляемые (случайные) факторы отнесем к возмущающим факторам  $B(t)$ , которые снижают качество функционирования СН ЛА. К возмущающим факторам отнесем погрешности средств измерений первичных навигационных параметров, сбои вычислительных средств и средств передачи и приема информации и т. д.

В соответствии с теорией планирования эксперимента для оценивания робастности СН ЛА разрабатывается два плана, которые принято называть внутренним и внешним планами эксперимента соответственно. Параметрами внутреннего плана являются исследуемые факторы  $W_v(t)$ ,  $v = \overline{1, m_w}$ , где  $m_w$  – количество ИФ, а параметрами внешнего плана – возмущающие факторы  $B_k(t)$ ,  $k = \overline{1, m_b}$ , где  $m_b$  – количество ВФ.

Внутренний и внешний планы представляют собой таблицы, которые различаются столбцами. Столбцы таблицы внутреннего плана содержат значения исследуемых факторов  $W(t)$ , а столбцы таблицы внешнего плана – значения возмущающих факторов  $B(t)$ .

При реализации внутреннего плана эксперимента проводятся опыты. Количество опытов  $N$  соответствует числу строк внутреннего плана. В каждом  $i$ -м опыте ( $i = \overline{1, N}$ ) оценивается качество функционирования СН ЛА при определенной комбинации уровней ИФ с последующим оцениванием показателя робастности.

Показатель робастности  $\eta_i(t)$  для каждого  $i$ -го опыта внутреннего плана рассчитывается по данным, которые получены в процессе эксперимента по внешнему плану. Поэтому количество экспериментов, выполняемых по внешнему плану, равно количеству опытов  $N$ , которые содержит эксперимент, выполняемый по внутреннему плану.

Количество строк  $n$  внешнего плана равно числу комбинаций уровней ВФ, воздействие которых на СН ЛА исследуется при эксперименте. При каждой  $j$ -й реализации ( $j = \overline{1, n}$ )



внешнего плана эксперимента моделируется процесс решения навигационной задачи при  $i$ -м сочетании ИФ и оцениваются составляющие вектора параметров движения  $\hat{Q}_{ij}(t)$ , полученные в  $i$ -м опыте при  $j$ -м сочетании уровней ВФ. С помощью экспериментально полученных значений составляющих вектора  $\hat{Q}_{ij}(t)$  определяется показатель робастности СН ЛА.

В качестве показателя робастности по Тагути используется величина, обратная вариативности, то есть отношение характеристики выходного сигнала СН при определенном сочетании ИФ к характеристике, обусловленной ВФ, или логарифм этого отношения [23–27].

Показателем качества выходной информации СН в  $i$ -м опыте может выступать среднее значение оценки НП ЛА, которое получено по результатам  $n$  реализаций внешнего плана эксперимента следующего вида:

$$\Delta Q_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{Q}_{ij}(t). \quad (1)$$

Другим важным показателем качества выходной информации СН, учитывающим влияние ВФ в  $i$ -м опыте, является разброс оценок НП ЛА  $\hat{Q}_{ij}(t)$  относительно среднего значения  $\Delta \hat{Q}_i(t)$ . Показателем разброса при малом количестве реализаций  $n$  является изменчивость значений показателя качества функционирования НС в  $i$ -м опыте, которая рассчитывается по формуле

$$\delta \hat{Q}_i(t) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\hat{Q}_{ij}(t) - \Delta \hat{Q}_i(t))^2}. \quad (2)$$

С учетом выражений (1) и (2) показатель робастности СН ЛА в  $i$ -м опыте определяется с помощью соотношения

$$\eta_i(t) = 10 \lg \frac{\Delta Q_i}{\delta Q_i}. \quad (3)$$

Далее определяется номер опыта, соответствующий максимальному значению показателя робастности  $\eta_i(t)$ . Сочетание уровней ИФ в этом опыте характеризует наименьшую чувствительность значения  $\eta_i(t)$  к выбранным ВФ.

Требуется найти такие уровни ИФ  $W_i(t)$ , которые обеспечивают наибольшее значение показателя робастности  $\eta_i(t) = \max$ .

## ПРОЦЕДУРА ОЦЕНИВАНИЯ РОБАСТНОСТИ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ В СООТВЕТСТВИИ С ТЕОРИЕЙ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Процедура оценивания робастности автономной СН ЛА содержит следующие этапы:

- 1) выбор номенклатуры искомых НП ЛА;
- 2) определение диапазонов изменения выбранных НП ЛА;
- 3) определение способа получения оценок НП ЛА (выходных сигналов);
- 4) определение перечня ИФ;
- 5) выбор диапазонов и количества уровней изменения ИФ;
- 6) составление внутреннего плана эксперимента;
- 7) определение перечня ВФ;
- 8) выбор диапазонов и количества уровней изменения ВФ;
- 9) составление внешнего плана эксперимента;
- 10) проведение эксперимента и фиксация его результатов;
- 11) обработка результатов эксперимента и расчет показателя робастности;

12) анализ полученных результатов и выводы.

Номенклатура искомых НП определяется исходя из функционального назначения ЛА. Например, искомыми НП космического аппарата (КА) могут быть шесть элементов орбиты – прямое восхождение восходящего узла, угол наклона орбиты, большая полуось, эксцентриситет и истинная аномалия или три координаты и три составляющие вектора скорости в выбранной системе отсчета в заданный момент времени.

При определении диапазонов изменения НП ЛА базируются на требованиях, которые предъявляются к СН исходя из особенностей и условий эксплуатации ЛА. Например, в качестве диапазонов изменения НП КА могут использоваться погрешности его выведения ракетой-носителем.

Оценки НП ЛА, которые формируются СН ЛА, могут быть получены в результате моделирования процесса решения навигационной задачи путем проведения имитационного моделирования. При однократном моделировании полученные оценки имеют случайный характер, что снижает достоверность выводов. С целью устранения этого недостатка может применяться способ, который заключается в многократном моделировании процесса решения навигационной задачи с последующим расчетом средних значений оценок НП ЛА.

Основная цель оценивания робастности заключается в выявлении таких ИФ, которые менее чувствительны к ВФ. Поэтому в перечень ИФ в планируемом эксперименте включаются факторы, которые, с одной стороны, функционально связаны с оценками НП ЛА, вырабатываемых СН, а с другой – могут быть реализованы в эксперименте.

Диапазоны изменения  $v$ -го ИФ,  $W_{v \min}(t)$  и  $W_{v \max}(t)$ , выбираются из условия реально достижимых значений ИФ. С ростом числа  $U_w$  факторов растет количество опытов  $N$  в эксперименте по внутреннему плану и усложняется процедура обработки его результатов.

С целью исследования влияния ВФ на СН при каждом  $i$ -м сочетании уровней ИФ формируется перечень ВФ, содержащий  $m_b$  факторов. Значения ВФ могут быть непрерывными и дискретными. Примером непрерывного ВФ является среднеквадратическая погрешность результата навигационного измерения, а примером дискретного ВФ – техническое состояние (работоспособное или неработоспособное) средства измерения навигационного параметра.

При определении робастности СН ЛА рассматриваются все возможные источники ВФ. При этом выбираются такие диапазоны изменения  $B_{k \min}$  и  $B_{k \max}$   $k$ -го ВФ, которые охватывают реальные и предполагаемые условия эксплуатации СН ЛА. Для каждого  $k$ -го ВФ устанавливается  $U_{bk}$  уровней.

Внешний план эксперимента для оценивания робастности СН ЛА соответствует плану полного факторного эксперимента и содержит  $n$  реализаций всех комбинаций уровней ВФ. Расчет показателя робастности СН ЛА в каждом  $i$ -м опыте выполняется на основании полученных при эксперименте результатов с использованием соотношения (3).

Анализ показателей робастности направлен на выявление таких уровней ИФ, которые обеспечивают наибольшее значение  $\eta_i(t) = \max$ .

## **ПРИМЕР ОЦЕНИВАНИЯ РОБАСТНОСТИ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Процедуру оценивания робастности СН ЛА рассмотрим на примере автономной СН космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли, теоретические основы построения которой были разработаны коллективом ученых Ленинградской военной инженерной академии имени А.Ф. Можайского во главе с профессором Л.Ф. Порфирьевым [28]. Принцип работы системы базируется на «зенитном» методе навигации [2, 6]. Первичными

навигационными параметрами в этом методе являются зенитные расстояния двух звезд и высота полета КА.

Представленный пример носит демонстрационный характер, поясняющий особенности получения оценок робастности СН ЛА. Поэтому введем несколько допущений. Предположим, что движение КА происходит по круговой орбите в центральном гравитационном поле Земли, погрешности навигационных измерений подчинены нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями, обработка измерений выполняется методом наименьших квадратов, который позволяет найти оценку НП КА в начальный момент времени  $t_0$ . Первая навигационная звезда находится вблизи плоскости опорной орбиты КА, а орт второй звезды совпадает с нормалью к этой плоскости.

Выходной навигационной информацией СН КА является оценка одной компоненты вектора  $\hat{Q}(t_0)$ , например оценка трансверсальной (вдоль орбиты) составляющей радиуса КА.

Элементы опорной орбиты КА имеют следующие значения: прямое восхождение восходящего узла  $\Omega = 0$ , наклонение орбиты  $i = 0$  в момент  $t_0$ , аргумент широты  $u = 0$ , радиус орбиты  $r = 700$  км.

Истинное движение КА происходит по орбите, которая в начальный момент времени  $t_0$  отличается от опорной орбиты по трансверсальной составляющей радиуса на величину  $\Delta x(t_0)$ , значение которой является одним из ВФ и варьируется в эксперименте.

В качестве исследуемых факторов выбраны продолжительность навигационного режима  $T$  и орбитальное склонение первой звезды  $\delta$ . Уровни значений ИФ приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Уровни значений ИФ

Исследуемый фактор		Уровень значения фактора		
		1	2	3
1	$T$ , мин	50	100	–
2	$\delta$ , град	0	10	20

Возмущающими факторами в планируемом эксперименте являются смещение истинного начального положения КА относительно опорного положения  $\Delta x(t_0)$ , среднеквадратические значения погрешностей средств измерений зенитного угла  $\sigma_\beta$  и высоты полета КА  $\sigma_H$ . Уровни значений ВФ приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Уровни значений ВФ

Возмущающий фактор		Уровень значения фактора	
		1	2
1	$\Delta x(t_0)$ км	10	20
2	$\sigma_\beta$ , угл.мин	2,5	5,0
3	$\sigma_H$ , м	100	200

Планы внутреннего и внешнего экспериментов представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

В качестве показателя качества функционирования СН КА в эксперименте выступает ее погрешность:

$$\delta \hat{x}(t_0) = \Delta \hat{x}(t_0) - \Delta x(t_0).$$

Таблица 3

## План внутреннего эксперимента

Номер опыта	Номер исследуемого фактора		Номер опыта	Номер исследуемого фактора	
	1	2		1	2
1	1	1	4	2	1
2	1	2	5	2	2
3	1	3	6	2	3

Таблица 4

## План внешнего эксперимента

Номер реализации	Номер ВФ			Номер реализации	Номер ВФ		
	1	2	3		1	2	3
1	1	1	1	5	2	1	1
2	1	1	2	6	2	1	2
3	1	2	1	7	2	2	1
4	1	2	2	8	2	2	2

В табл. 5 сведены значения погрешностей  $\delta\hat{x}_{ij}(t_0)$ , которые получены в результате решения навигационной задачи в  $i$ -м опыте и при  $j$ -й реализации ВФ.

Таблица 5

## Значения погрешностей трансверсальной координаты СН КА, км

Номер реализации	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
1	-0,3619435	-1,2496586	-1,2146896	0,0029122	0,0073836	0,0070812
2	-0,3619470	-0,9948709	-1,2618428	0,0029122	0,0026901	0,0027741
3	-0,3619427	-1,0605459	-1,002040	0,0029123	-0,0070043	-0,0151110
4	-0,3619435	-1,2496586	-1,2146896	0,0029122	0,0073836	0,0070812
5	-0,7277570	-2,1840872	-2,0574944	0,0058011	0,0056577	-0,0047836
6	-0,7277639	-2,5016234	-2,4366230	0,0058010	0,0074197	0,0065136
7	-0,7277553	-7,2932197	-3,3018519	0,0058012	-0,0534455	-0,0572149
8	-0,7277570	-2,1840872	-2,0574944	0,0058011	0,0056577	-0,0047836

Результаты обработки экспериментальных данных (табл. 5) содержат средние значения и изменчивости навигационных параметров СН.

Значения показателей робастности, рассчитанных с помощью соотношения (3), приведены в табл. 6.

Таблица 6

## Результаты обработки экспериментальных данных

Определяемый показатель	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
Среднее значение, км	-0,545	-2,340	-1,818	0,004	-0,003	-0,007
Изменчивость, км	0,196	2,085	0,793	0,002	0,021	0,022
Робастность, дБ	4,451	0,500	3,604	4,505	-8,391	-4,712

Анализ результатов, представленных в табл. 6, показывает, что наибольшие значения показателя робастности, исследуемой СН КА (по реакции на погрешность оценки трансверсальной координаты), наблюдается в первом и четвертом опытах. Это позволяет сделать вывод, что наименьшая чувствительность СН КА к вариациям выбранных ВФ достигается при условии нахождения орта первой навигационной звезды в плоскости опорной орбиты КА, то есть при  $\delta = 0$ . При таком выборе положения навигационной звезды относительно плоскости опорной орбиты КА робастность СН достигает своего наибольшего значения при любом значении продолжительности навигационного режима из выбранного диапазона и вариациях ВФ, рассмотренных в демонстрационном примере.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен методический подход, основанный на теории планирования эксперимента и методологии Г. Тагути, позволяющий оценивать робастность СН ЛА, функционирующих в условиях различного рода возмущающих факторов.

Это позволяет оценить влияние возмущающих факторов на показатели качества функционирования СН ЛА; оценить возможность достижения наибольших значений робастности путем вариации методических и технических средств СН ЛА и параметров, характеризующих процессы организации навигационных измерений и уточнения истинного движения центра масс ЛА; получить количественные оценки робастности при решении задачи обоснованного выбора состава аппаратных и программных средств СН ЛА.

Для подтверждения эффективности разработанного методического подхода приведен пример оценивания робастности СН КА дистанционного зондирования Земли.

Полученные теоретические результаты исследований могут найти применение при обосновании состава и технических характеристик СН беспилотных ЛА.

## Список используемых источников

1. Молоканов Г.Ф. Точность и надежность навигации летательных аппаратов – М.: Машиностроение, 1967. – 215 с.
2. Порфирьев Л.Ф., Смирнов В.В., Кузнецов В.И. Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
3. Каргу Л.И. Точность гироскопических устройств систем управления летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1990. – 207 с.
4. Автономная навигация космических аппаратов / Г.П. Аншаков [и др.]. – Самара: Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», 2011. – 486 с.
5. Михайлов Н.В. Автономная навигация космических аппаратов при помощи спутниковых радионавигационных систем. – СПб.: Политехника, 2014. – 362 с.
6. Голяков А.Д., Ананенко В.М., Фоминов В.И. Системы навигации летательных аппаратов. – СПб.: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 2018. – 273 с.
7. Облик бортовой интегрированной навигационной системы летательного аппарата, обеспечивающей высокоточное позиционирование фазового центра антенны бортовой РЛС / Е.М. Ильин [и др.] // Вестник СибГУТИ. – 2016. – №3. – С. 33–45.
8. Кузнецов В.И., Калашников С.Д., Миклин Д.В. Метод расчета точностных характеристик системы автономной навигации и ориентации космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 1. – С. 35–45.

9. *Голяков А.Д., Романов В.В.* Метод обеспечения длительных сроков автономного функционирования системы астронавигации космического аппарата // *Навигация и гидрография.* – 1996. – № 3. – С. 56–59.
10. *Гэн К., Чулин Н.А.* Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей // *Наука и Образование / МГТУ им. Н.Э. Баумана.* – 2016. – № 12. – С. 182–206.
11. *Чернодаров А.В., Матюшин В.А.* Прогнозирующий контроль и оценка уровня надежности инерциальных измерительных модулей в режиме реального времени // *Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Авиационные электросистемы и авионика.* – 2009. – № 248. – С. 71–83.
12. *Комплексная система навигации летательного аппарата / А.Ю. Мишин [и др.] // Труды МАИ.* – 2010. – № 38. – С. 27–33.
13. *Фомичев А.В., Тань Л.* Разработка алгоритма быстрой компенсации погрешностей комплексированной инерциально-спутниковой системы навигации малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в условиях сложной среды // *Наука и Образование / МГТУ им. Н.Э. Баумана.* – 2015. – № 10. – С. 252–270. – Doi: 10.7463/1015.0821641.
14. *Уманский В.И.* Решение задачи интеграции спутниковых и инерциальных навигационных систем на основе теории нелинейной фильтрации // *Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* – 2011. – № 4. – С. 32–37.
15. *Автономная система навигации и ориентирования беспилотных летательных аппаратов для полетов в городе: задачи и требования функционирования / Р.С. Хаметов [и др.] // Молодой ученый.* – 2018. – № 45 (231). – С. 37–41.
16. *Абросимов В.К.* Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. – М.: Наука, 2013. – 168 с.
17. *Чернодаров А.В.* Контроль и адаптивно-робастная оценка состояния интегрированных навигационных систем на базе квантово-оптических измерителей // *Научный вестник МГТУ ГА.* – 2012. – № 185. – С. 5–12.
18. *Голяков А.Д., Фоминов В.И.* Аналитическая оценка точности автономной навигации космического аппарата по результатам адаптивных измерений высоты его полета // *Вестник СГАУ.* – 2015. – Т. 14, № 1. – С. 18–24.
19. *Колосов К.С.* Робастное комплексирование навигационных измерений БЛА // *Информационные процессы.* – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 245–257.
20. *Чубич В.М., Прокофьева А.Э.* Сравнительный анализ некоторых робастных фильтров для нестационарных линейных дискретных систем // *Вестник ИрГТУ.* – 2017. – Т. 21, № 12. – С. 123–137.
21. *Грошев А.В., Фролова О.А.* Помехоустойчивый адаптивно-робастный алгоритм контроля данных в комплексной инерциально-спутниковой навигационной системе // *Управление большими системами.* – 2018. – № 74. – С. 63–80.
22. *Герус М.И.* Перспективы применения робастно-адаптивного управления БЛА // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2018. – Вып. 5. – С. 25–31.
23. *Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути: пер. с англ. / Р. Леон [и др.].* – М.: Сейфи, 2002. – 384 с.
24. *Табунщик Г.В.* Робастное планирование эксперимента в задачах моделирования технических объектов // *Радиоэлектроника. Информатика. Управление.* – 2004. – №1. – С. 90–94.
25. *Брагин Ю.В.* Робастная оптимизация производственного процесса // *Методы менеджмента качества.* – 2007. – № 3. – С. 35–41.
26. *Разумов-Раздолов К.Л., Волокитина И.В.* Применение робастной оптимизации при проектировании // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2008. – № 1. – С. 223–228.

27. *Протасьев Б.В., Петренко Е.С.* Улучшение качества по методам Генити Тагути // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып. 5, ч. 3. – С. 432–436.

28. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и разработки ОАО «РКЦ «Прогресс» / под ред. А.Н. Кирилина. – Самара: Издательский дом «АГНИ», 2011. – 280 с.

М.А. Бубликов;  
И.О. Голиков,  
кандидат техн. наук;  
Г.М. Завьялова,  
кандидат техн. наук, доцент

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В работе представлена модель нагрева термоаккумулирующих материалов, позволяющая учесть процесс аккумуляции тепловой энергии за счет фазовых превращений. Применение данной модели позволяет получить термические кривые нагрева и обоснованно провести сравнительный анализ свойств различных термоаккумулирующих материалов.

Выполнены экспериментальные исследования нагрева термоаккумулирующих материалов на основе галлия и парафинов, в результате которых доказано преимущество галлийсодержащих термоаккумулирующих материалов. Показана хорошая сходимость теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: теплоаккумулирующий материал, галлий, парафин, фазовое превращение, термическая кривая.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] представлены результаты сравнительного термодинамического анализа парафинов и галлия (и сплавов на его основе) как основы термоаккумулирующего материала тепловых аккумуляторов бортовых систем космических аппаратов. Показано, что для обоснования практического применения данных материалов необходимо учитывать их теплофизические свойства, которые указаны в табл. 1 [1]. При этом важным является то, что объемная теплоемкость галлия выше, чем у парафинов примерно на 30 % [1], кроме этого, при фазовом механизме поглощения тепловой энергии теплоаккумулирующий материал на основе галлия будет поглощать тепловую энергию на 250–300 % больше, чем теплоаккумулирующий материал на основе парафинов того же объема [1].

Таблица 1

Основные теплофизические свойства парафинов [1, 5-7] и галлия [8, 9]

ТАМ	Свойства									
	Температура плавления, °С	Коэф. теплопроводности, Вт/(м·К)	Уд. теплоемкость, кДж/(кг·К)		Плотность, 10 <sup>-3</sup> кг/м <sup>3</sup>		Изменение объема при фазовом изменении, %	Объемная теплоемкость, 10 <sup>-3</sup> кДж/(м <sup>3</sup> ·К)		Теплота плавления, кДж/кг
			тв.	ж.	тв.	ж.		тв.	ж.	
Парафины	10–50	0,15–0,25	2,1	2,1	0,8	0,9	15	1,68	1,89	150–200
Ga	29,9	21	0,37	0,41	5,91	6,09	3,4	2,2	2,5	78

Данные результаты могут быть рассмотрены как исходные при моделировании процессов функционирования тепловых аккумуляторов бортовых систем космических аппаратов. Осо-



бенно важным является модель нагрева теплоаккумулирующих материалов с учетом как теплоемкостного, так и фазового механизмов поглощения тепловой энергии. Под нагревом понимается процесс повышения температуры материала за счет подведения к нему тепловой энергии от внешнего источника. При этом результатом математического моделирования должно быть получение зависимости температуры нагреваемого теплоаккумулирующего материала от времени – термической кривой нагрева. Наличие термической кривой нагрева позволяет оценить возможности применения термоаккумулирующего материала по ряду критериев, основным из которых является время нагрева теплоаккумулирующего материала до предельного значения температуры, которое, в свою очередь, определяется допустимым значением температуры элементов бортовой аппаратуры космического аппарата. Для этого предлагаемая модель должна учитывать то, что в условиях фазового перехода – плавления – температура термоаккумулирующего материала не изменяется. Многие авторы [2–5] для решения подобной задачи использовали допущение, согласно которому при температуре плавления теплоемкость материала условно принималась равной бесконечности (рис. 2). Это допущение позволяет моделировать отсутствие приращения температуры в условиях подведения тепловой энергии [2–5], но не позволяет оценить время, в течение которого будет реализовываться фазовый механизм поглощения тепловой энергии.

Целью данной работы является разработка модели нагрева термоаккумулирующего материала с учетом временных характеристик его фазовых превращений.

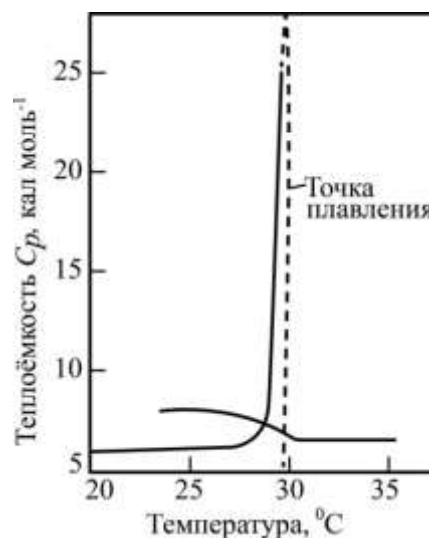


Рис. 1. Зависимость теплоемкости галлия от температуры [2]

## МОДЕЛЬ НАГРЕВА ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Суть предлагаемой модели нагрева теплоаккумулирующего материала с учетом фазовых превращений заключается в построении уравнений теплового баланса между тепловой энергией, генерируемой элементами бортового оборудования космического аппарата, и поглощенной тепловой энергией теплоаккумулирующим материалом как теплоемкостным, так и фазовым механизмами аккумуляирования тепла:

$$Q_{\text{БА}} = Q_{\text{ТМТ}} + Q_{\text{ФМ}} + Q_{\text{ТМЖ}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{БА}}$  – энергия, генерируемая элементами бортового оборудования;  
 $Q_{\text{ТМТ}}$  – энергия, аккумулируемая теплоемкостным механизмом твердой фазой теплоаккумулируемого материала (нагрев твердой фазы);  
 $Q_{\text{ТМЖ}}$  – энергия, аккумулируемая теплоемкостным механизмом жидкой фазой теплоаккумулируемого материала (нагрев жидкой фазы);  
 $Q_{\text{ФМ}}$  – энергия, аккумулируемая телом аккумулируемого материала при его плавлении (фазовый механизм поглощения тепловой энергии).

Для построения термической кривой нагрева термоаккумулирующих материалов важно рассмотреть тепловой баланс на этапе нагрева его твердой фазы и плавления, при этом энергия, потребная для нагрева твердой фазы до температуры плавления термоаккумулирующего материала, определяется уравнением

$$Q_{\text{ТМТ}} = (T_{\text{пл}} - T_0)C_{\text{ТМ}}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальное значение температуры;  
 $T_{\text{ПЛ}}$  – температура плавления;  
 $C_T$  – теплоемкость твердой фазы;  
 $M$  – масса теплоаккумулирующего материала.

Для плавления теплоаккумулирующего материала требуется энергия, которая определяется выражением

$$Q_{\text{ФМ}} = C_{\text{ПЛАВ}}M, \quad (3)$$

где  $C_{\text{ПЛАВ}}$  – теплота плавления.

Учитывая выражения (1) – (3), а также то, что генерируемая бортовой аппаратурой тепловая энергия может быть представлена выражением

$$Q_{\text{БА}} = N\tau, \quad (4)$$

где  $N$  – мощность;

$\tau$  – время функционирования бортового оборудования.

Можно составить систему уравнений, которая позволит рассчитывать термические кривые нагрева. При этом необходимо учитывать следующие условия:

- теплоемкостный механизм аккумуляции тепловой энергии твердой фазой теплоаккумулирующего материала будет осуществляться до тех пор, пока его температура не превысит температуру плавления;
- при фазовом механизме аккумуляции тепловой энергии температура теплоаккумулирующего материала не будет изменяться до тех пор, пока значение подводимой тепловой энергии не превысит энергию, требуемую для нагрева до температуры плавления, и энергию, потребную для расплавления теплоаккумулирующего материала;
- повышение температуры жидкой фазы теплоаккумулирующего материала будет (начнет) осуществляться после окончания предыдущего условия фазового механизма аккумуляции тепловой энергии (окончания плавления).

Ниже представлена дифференциальная форма уравнений предложенной математической модели, реализованная в среде Mathcad.

Given

$$T'_{\text{Гал}}(\tau) = \begin{cases} \frac{N}{C_{\text{Галт}} \cdot M} & \text{if } T_{\text{Гал}}(\tau) \leq T_{\text{ПлГал}} \quad \text{теплоемкостный механизм нагрева твердой фазы} \\ \frac{N}{C_{\text{Галж}} \cdot M} & \text{if } T_{\text{Гал}}(\tau) > T_{\text{ПлГал}} \quad \text{теплоемкостный механизм нагрева жидкой фазы} \\ 0 & \text{if } T_{\text{Гал}}(\tau) > T_{\text{ПлГал}} \wedge N \cdot \tau < C_{\text{Галт}} \cdot M \cdot T_{\text{ПлГал}} + C_{\text{ПлавГал}} \cdot M \quad \text{плавление} \end{cases}$$

$$T_{\text{Гал}}(0) = 18$$

$$T'_{\text{Пар}}(\tau) = \begin{cases} \frac{N}{C_{\text{Пар}} \cdot M_{\text{Пар}}} & \text{if } T_{\text{Пар}}(\tau) \leq T_{\text{ПлПараф}} \quad \text{теплоемкостный механизм нагрева твердой фазы} \\ \frac{N}{C_{\text{Пар}} \cdot M_{\text{Пар}}} & \text{if } T_{\text{Пар}}(\tau) > T_{\text{ПлПараф}} \quad \text{теплоемкостный механизм нагрева жидкой фазы} \\ 0 & \text{if } T_{\text{Пар}}(\tau) > T_{\text{ПлПараф}} \wedge N \cdot \tau < C_{\text{Пар}} \cdot M_{\text{Пар}} \cdot T_{\text{ПлПараф}} + C_{\text{ПлавПар}} \cdot M_{\text{Пар}} \quad \text{плавление} \end{cases}$$

$$T_{\text{Пар}}(0) = 18$$

$$\begin{pmatrix} T_{\text{Гал}} \\ T_{\text{Пар}} \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[ \begin{pmatrix} T'_{\text{Гал}} \\ T'_{\text{Пар}} \end{pmatrix}, \tau, 6000 \right]$$

Помимо физических величин, указанных в уравнениях (1) – (4), в данной системе уравнений использованы следующие переменные:

$T'$  – приращение температуры термоаккумулирующего материала в единицу времени;  
 $T$  – текущее значение температуры термоаккумулирующего материала.

Дополнительные подстрочные надписи в обозначении переменных используются для соотношения этих величин к тому или иному термоаккумулирующему материалу (галлий, парафин), а также к их жидкой или твердой фазе.

В данной модели приняты следующие допущения:

- не учтен теплоотвод от теплоаккумулирующего материала в окружающую среду;
- подводимая тепловая энергия аккумулируется всей массой теплоаккумулирующего материала.

На рис. 2 показаны термические кривые нагрева элемента бортовой аппаратуры ( $N = 20$  Вт) в парафине и галлии как результат решения данной модели.

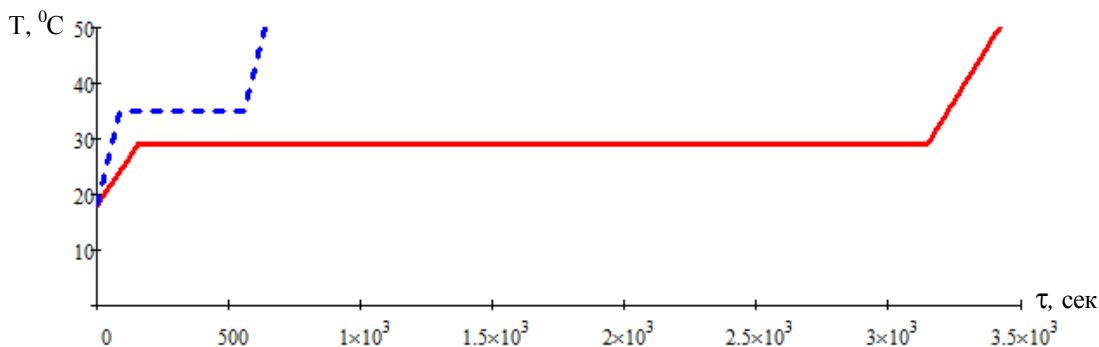


Рис. 2. Расчетные термические кривые нагрева элемента бортовой аппаратуры ( $N = 20$  Вт):  
 пунктиром обозначена кривая нагрева в парафине, сплошной линией – в галлии

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ КРИВЫХ НАГРЕВА ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГАЛЛИЯ И ПАРАФИНОВ

Для подтверждения предположений о возможности применения галлия и сплавов на его основе в качестве теплоаккумулирующих материалов для обеспечения термической стабилизации бортовых систем космических аппаратов и проверки правильности предлагаемой модели были проведены экспериментальные исследования. Суть данных исследований заключалась в регистрации температуры и построении термических кривых нагрева нагревательных элементов одинаковой мощности (имитирующих элементы бортовой аппаратуры), помещенных в парафин и галлий одинакового объема. Схема эксперимента представлена на рис. 3 и 4.

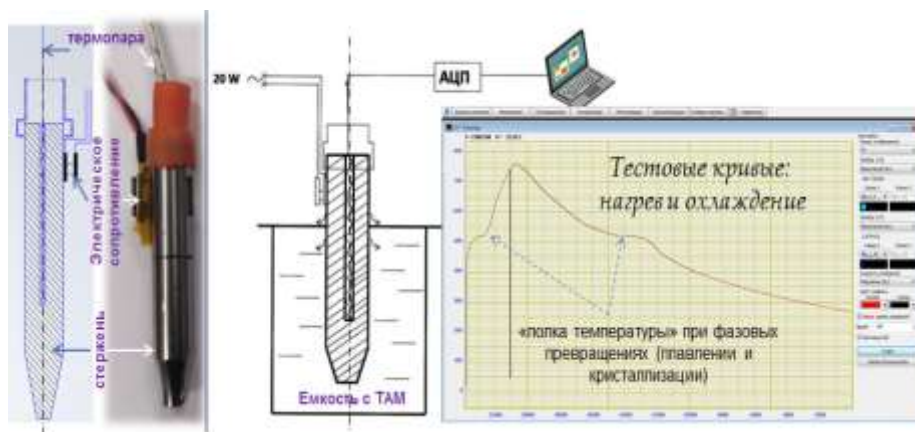


Рис. 3. Схема эксперимента

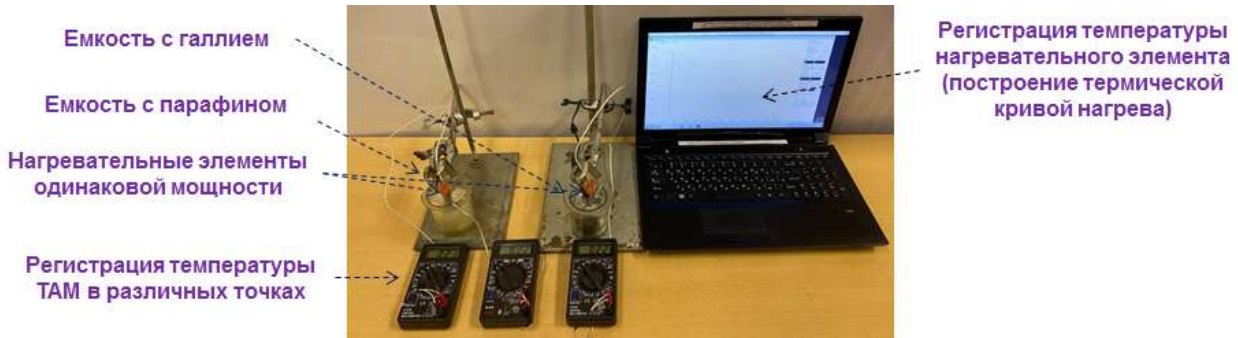


Рис. 4. Фото экспериментальной установки

В качестве нагревательного элемента был использован стержень, в верхней части которого генерировалась тепловая энергия от электрического сопротивления мощностью 20 Вт (рис. 3 и 4). Вдоль оси стержня выполнено отверстие, в которое была помещена термопара, регистрирующая его температуру. Сигнал от термопары через аналого-цифровой преобразователь регистрировался двухкоординатным самописцем программы ZetLab. Стержень помещался в емкости с парафином и галлием одинакового объема –  $0,8 \text{ м}^3$ .

Согласно полученным результатам, при поглощении тепловой энергии парафином, по причине его низкой теплопроводности, не вся масса парафина воспринимает тепловую энергию. Парафин возле нагревательного элемента расплавился, а основная его масса даже не нагрелась. В этом случае температура стержня повышалась быстро, почти так же, как на воздухе – без использования теплоаккумулирующего материала.

При поглощении тепловой энергии галлием, по причине его высокой теплопроводности (почти в 100 раз большей, чем у парафина), весь объем нагрелся, то есть вся масса галлия воспринимала тепловую энергию. Наблюдалось плавление галлия, но при этом на термической кривой была «полка» температуры, соответствующая фазовому механизму поглощения тепловой энергии. В итоге термическая кривая доказывает, что применение галлия позволяет обеспечить более стабильное значение температур нагревательного элемента, чем парафин.

На рис. 5 представлен график нагрева нагревательного элемента на воздухе, нагревательного элемента, помещенного в парафин и нагревательного элемента, помещенного в галлий.

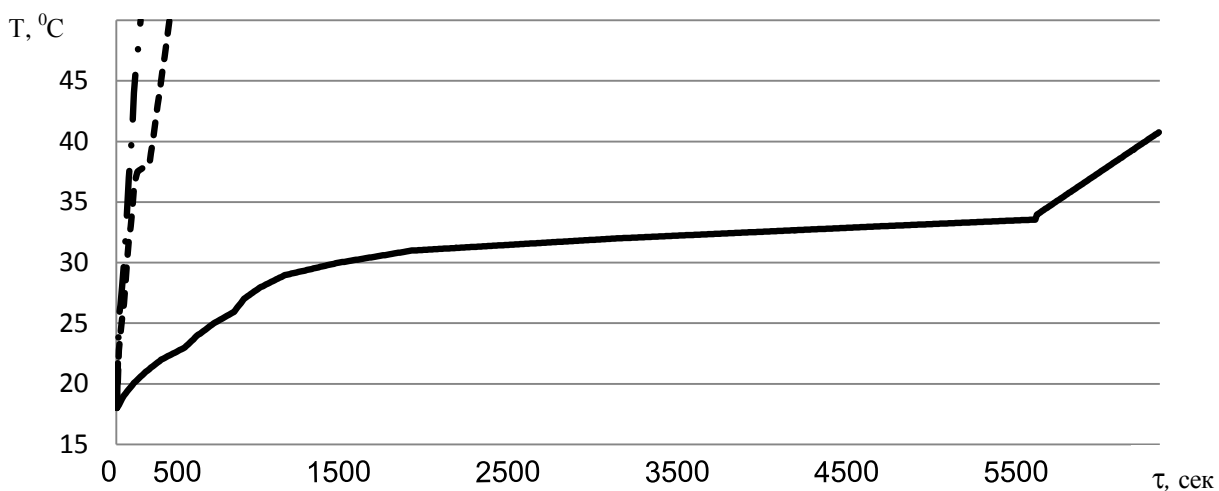


Рис. 5. Экспериментальные термические кривые нагрева нагревательного элемента [элемента бортовой аппаратуры ( $N = 20 \text{ Вт}$ )]: пунктирная линия – в парафине; сплошная – в галлии; линия, обозначенная точкой тире, – на воздухе

Согласно полученным результатам, для нагрева галлия требуется больше времени, чем показывает теоретическая кривая нагрева. Для парафина – наоборот, на практике он нагревается быстрее, чем в теории.

Более длительный нагрев галлия объясняется тем, что в математической модели не учтен отвод тепловой энергии в окружающую среду. С другой стороны, быстрый, по сравнению с теорией, нагрев парафина связан с тем, что математическая модель не учитывает «локализацию» тепловой энергии массой теплоаккумулирующего вещества, непосредственно примыкающей к источнику тепловой энергии.

Поскольку коэффициент теплопроводности галлия значительно выше аналогичного коэффициента парафина, это позволяет теплоаккумулирующему материалу на основе галлия более равномерно – по всему объему – аккумулировать выделяемую тепловую энергию. Парафины по причине низкой теплопроводности будут в основном воспринимать выделяемую тепловую энергию только тем объемом (массой), который непосредственно примыкает к источнику тепла, что может привести к перегреву последнего.

Таким образом, если при проектировании космического аппарата реализовывать объемный критерий, то галлийсодержащий теплоаккумулирующий материал имеет предпочтения по сравнению с парафинами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

- разработана модель нагрева термоаккумулирующего материала с учетом фазовых превращений, решением данной модели являются термические кривые нагрева;
- проведены экспериментальные исследования, которые показали правильность предложенной модели и преимущества галлийсодержащих расплавов по сравнению с парафинами;
- основным преимуществом галлийсодержащих термоаккумулирующих материалов, по сравнению с парафинами, является высокий коэффициент теплопроводности. Парафины, по причине низкого коэффициента теплопроводности, «блокируют» распределение тепловой энергии по всему объему теплоаккумулирующего материала. Это приводит к быстрому, по сравнению с расчетными значениями, нагреву элементов бортовой аппаратуры.

## Список используемых источников

1. *Лебедев Е.Л., Завьялова Г.М.* Теплоаккумулирующий материал на основе галлия в решении задач термостабилизации бортовых систем космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 673. – С. 183–190.
2. *Яценко С.П.* Галлий: взаимодействие с металлами. – М.: Наука, 1974.
3. *Щена И.А., Чаус И.С., Митюрева Т.Т.* Галлий. – Киев.: ГИТЛ УССР, 1963.
4. *Резницкий Л.А.* Теплоаккумулирующие вещества и процессы // Журнал неорганической химии. – 1998. – Т. 43, № 8. – С. 1288–1298.
5. Термические свойства жидких сплавов литий–свинец околоэвтектического состава Р.Н. Абдуллаев [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, №2. – С. 257–234.

В.О. Головчинский,  
*кандидат техн. наук;*  
Н.В. Головчинская;  
А.В. Федоров,  
*доктор техн. наук*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕСУРСА ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АГРЕГАТАХ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ОТСУТСТВИИ ДЕФЕКТОВ**

Представлены результаты исследования по оцениванию и прогнозированию показателей технического состояния циклически нагруженных элементов в агрегатах стартового комплекса. Определены подходы к оценке остаточного ресурса циклически нагруженных элементов с учетом процесса постепенного накопления повреждений в их материалах. Предложена методика оценки остаточного ресурса циклически нагруженных элементов агрегатов СК при отсутствии дефектов.

Ключевые слова: стартовый комплекс, остаточный ресурс, поврежденность, циклическая долговечность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Задача оценивания и прогнозирования технического состояния циклически нагруженных элементов в сложных технических устройствах, в том числе элементах агрегатов стартового комплекса (СК), является одной из наиболее актуальных задач с точки зрения обеспечения их надежности и безопасности. Решение данной задачи непосредственно связано с разработкой методических подходов к оцениванию остаточного ресурса циклически нагруженных элементов с учетом процесса постепенного накопления повреждений в их материалах. Учитывая достаточно богатые результаты теоретических и экспериментальных исследований по прогнозированию остаточного ресурса с применением моделей роста трещин, основанных на анализе накопления повреждений, особого внимания заслуживают подходы, опирающиеся на анализ процессов структурных изменений в материале конструкций за счет накопления поврежденности в условиях его старения и усталости. Данная задача может быть решена путем мониторинга характеристик, отражающих структурные изменения и повреждения материала, на основе комплексного использования методов неразрушающего контроля.

Одной из задач, связанных с обеспечением надежности и безопасности эксплуатации циклически нагруженных элементов в агрегатах СК при отсутствии дефектов, является разработка подходов к прогнозированию их ресурса на основе контроля и анализа процессов и механизмов структурных изменений в материале за счет накопления поврежденности в условиях его старения и усталости.

### **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Элементы агрегатов стартового комплекса (резервуары для хранения компонентов топлива, трубопроводы, стрела транспортно-установочного агрегата и пр.) в процессе эксплуатации подвергаются воздействию циклически изменяющихся нагрузок, что влечет циклическую переменность во времени их напряженно-деформированного состояния и постепенное накопление повреждений в материале конструкции. Процесс постепенного накопления повреждений в материале при длительным воздействием циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций, приводящий к изменению свойств материала, образованию трещин, их развитию и разрушению называется усталостью материалов, а способ-

ность материалов воспринимать циклические нагрузки без разрушения – сопротивлением усталости или циклической прочностью [1–5].

В качестве основного параметра, характеризующего сопротивление усталости того или иного материала, является циклическая долговечность – число циклов напряжений или деформаций, выдержанных нагруженным объектом до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения. Многочисленные исследования по усталости материалов в окончательном виде не дают достаточной информации о природе и кинетике развития данного процесса, так как достоверность прогнозирования долговечности различных материалов, в том числе конструкционных металлических материалов элементов агрегатов стартового комплекса, в условиях циклического нагружения зависит от их структурного состояния материала и множества факторов, таких как вид материала, частота и асимметрия нагружения, концентраторы напряжений и пр.

Исследованием и разработкой моделей накопления усталостных повреждений занимались С.В. Серенсен, В.П. Когаев, В.В. Новожилов, А. Пальмгрен, М. Майнер, С. Марко, В. Старки, и др.; развитию концепции механики поврежденной среды посвящены работы Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова, Я. Мураками, Я. Леметра и др.; о разработке деформационных критериев разрушения писали С.В. Серенсен, Н.А. Махутов, Л.Ф. Коффин, С. Мэнсон и др.; моделированию накопления повреждений для описания роста трещин посвящены работы В.В. Болотина, И.А. Волкова, Ю.Г. Коротких, С.А. Капустина, Ф. Эллина, Г. Чаланта, Яо Д. и др.; тема экспериментального исследования процессов поведения материалов при циклическом деформировании звучит в трудах И. Баушингера, Л. Берстоу, Г. Мазинга, Г. Закса и Х. Шойи, Н.Н. Давиденкова, Л.Ф. Коффина, И.М. Ройтмана и Я.Б. Фридмана, Р.М. Шнейдеровича, В.Г. Зубчанинова и Н.Л. Охлопкова, И. Охаши и К. Камашимы и др. Однако на сегодняшний день отсутствуют объективные количественные характеристики физического состояния материала, которые бы однозначно оценивали кинетику накопления усталостных повреждений и остаточный ресурс элементов изделий.

Исследование процессов зарождения и развития повреждений является одной из задач анализа усталости материалов. В механике твердого тела сложились два совершенно различных представления о том, что следует понимать под поврежденностью. Первое из них предложено Пальмгреном, а второе – Л.М. Качановым и Ю.Н. Работновым. Необходимо отметить, что в настоящее время на практике широко используется формальная методология оценивания усталостного повреждения, в основе которой лежит понятие поврежденности материала как универсальной величины, позволяющей производить оценку усталостной долговечности и остаточного ресурса [6, 7], а также существует множество моделей поврежденности материала, основанных на различных подходах к определению данной величины [8, 9].

В линейной модели поврежденности Пальмгрена – Майнера, мерой усталостного повреждения объекта служит отношение текущего числа циклов нагружения  $N$  к долговечности (числу циклов до разрушения)  $N_k$  при заданном уровне циклических напряжений  $\sigma$ :

$$D = \frac{N}{N_k(\sigma)}, \quad (1)$$

где  $N_k(\sigma)$  представляет собой зависимость  $N_k = f(\sigma)$ , которая принимается по усталостным кривым (кривым Велера).

Данный подход основывается на гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений, при этом принимается, что  $\Delta N$  циклов в начале процесса нагружения создают точно такое же повреждение, как и  $\Delta N$  циклов в середине или конце процесса нагружения.

Развитием линейной модели явился переход к гипотезе нелинейного суммирования усталостных повреждений по модели рассеянной поврежденности Качанова – Работнова:

$$\omega = 1 - \psi, \quad (2)$$

где  $\psi$  – сплошность материала, характеризующая степень распространения дефектов по объему нагружаемого тела.

В работе [8] представлен обзор нелинейных моделей, отражающих нелинейный характер роста поврежденности материала в рамках модели рассеянной поврежденности.

В рамках линейной механики разрушения на основе идей, предложенных Гриффитсом, принята модель поврежденности, согласно которой свободная от дефектов среда содержит хотя бы одну остроконечную трещину. При этом кинетика развития трещины определяет усталостную долговечность материала, а поврежденность оценивается по длине усталостной трещины. На основе различных физических представлений были получены зависимости скорости роста трещины от числа циклов приложенного напряжения и длины трещины, а в дальнейшем установлена взаимосвязь скорости роста трещины с коэффициентом интенсивности напряжений [10].

Таким образом, в основе прогнозирования остаточного ресурса циклически нагруженных элементов, в том числе и элементов агрегатов стартового комплекса, лежит подход, который отражает относительно длительный процесс зарождения и развития усталостных повреждений (не сплошностей, трещин и концентраторов напряжений) в материале и включает следующие стадии: зарождение макротрещины, устойчивое развитие микротрещины, ускоренный рост до макротрещины критического размера и окончательное разрушение [11–17]. При этом следует отметить, что планомерный мониторинг процессов деградации материала (накопления поврежденности в условиях их старения и усталости) также может быть построен на анализе процессов и механизмов изменений их характеристик (структурных, механических, акустических, магнитных и пр.). Анализ данных процессов позволил бы своевременно выявлять повреждения в материале и дал возможность прогнозирования остаточного ресурса циклически нагруженных элементов при отсутствии дефектов. Решение данной задачи предлагается проводить на основе разработки методик прогнозирования остаточного ресурса по результатам контроля и мониторинга характеристик материалов, отражающих процесс накопления повреждений в материале, методами неразрушающего контроля (НК).

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

При циклическом нагружении элементов в агрегатах СК накопление повреждений преимущественно происходит в поверхностных слоях материала в зонах концентрации напряжений (зоны резкого изменения геометрии конструкции элементов, зоны термического влияния сварных соединений, зоны температурного воздействия источников тепловыделения и др.), что обусловлено развитием механизмов микронапряжений и пластической деформации в виде повышения объемной плотности дислокаций, устойчивых полос скольжения различной конфигурации, экструзии и интрузии [18–21]

Для локализации зон концентрации напряжений могут применяться следующие «интегральные» методы НК:

1) вибрационный метод, который позволяет выявлять повреждения циклически нагруженных вращающихся элементов оборудования (роторов, подшипников, валов и др.), при помощи вибродиагностических признаков. Не преуменьшая достоинств данного метода, необходимо отметить один из его основных недостатков – влияние шумовых процессов на информативность диагностических признаков [22, 23];

2) тепловизионный метод, основанный на дистанционной регистрации распределения температурного поля поверхности объекта контроля и позволяющий оперативно определять аномальные изменения температуры, обусловленные наличием повреждений. К основным недостаткам, влияющим на достоверность результатов НК с применением данного метода, следует отнести необходимость обеспечения доступа к поверхности объекта контроля и учета воздействия внешних источников инфракрасного излучения [24, 25];



3) метод акустической эмиссии (АЭ), который обладает высокой чувствительностью к процессам пластической деформации и изменения свойств и состояния материала и позволяет обнаруживать дефекты его структуры на уровне скопления дислокаций. Основным источником информации при использовании данного метода выступает акустический сигнал, в качестве диагностических параметров – амплитуда, длительность, время нарастания (спада) импульса АЭ и др. Основным недостатком АЭ-метода является регистрация большого числа шумовых сигналов, осложняющих процедуру обработки [26–29].

Результаты контроля вышеперечисленными методами могут быть также использованы и для оценки поврежденности материала элементов.

Но для более детального контроля областей с повышенным уровнем локальных напряжений могут использоваться следующие «локальные» методы НК:

- ультразвуковой;
- магнитный;
- электрический;
- вихретоковый и др.

Например, учитывая взаимосвязь изменения скорости распространения ультразвуковой волны со структурными изменениями материала и действующими механическими напряжениями для оценки уровня и скорости накопления повреждений может быть применен метод ультразвукового контроля. Это определяется теоретической взаимосвязью модулей упругости с плотностью материала и скоростью распространения ультразвуковых волн различных типов (продольных, поперечных и др.) [30], а также результатами исследований, которые показывают, что структурные изменения материала, вызванные развитием микронапряжений и микродеформаций, приводят к достаточно малым, но подлежащим измерению скоростям распространения ультразвуковых волн и других информативных параметров (амплитуды, времени, коэффициента затухания ультразвукового сигнала и др.) [31–35]

Структурные изменения в материале в процессе развития повреждений отражаются в соответствующих изменениях значений магнитных и электрофизических характеристик материалов, которые связаны с изменением их доменной структуры. Например, учитывая наличие корреляционной зависимости между остаточной пластической деформацией и коэрцитивной силой, по ее значению можно контролировать накопление упругопластических деформаций и повреждений в ферромагнитном материале [36–38]. По изменению значений коэрцитивной силы можно судить и о величине напряжений в материале. Так, при нагружении материала значение коэрцитивной силы возрастает до величины, соответствующей пределу его текучести. В области течения и разупрочнения в материале начинается необратимая перестройка его доменной структуры, а с повышением нагрузки в области необратимых деформаций одновременно с формированием новой доменной структуры и накоплением повреждений продолжается увеличение значений коэрцитивной силы до значения, соответствующего пределу его прочности, т. е. величине, при которой происходит разрушение материала. Учитывая, что запас энергии, затрачиваемой на накопление повреждений и разрушение, примерно одинаков как при статическом, так и при циклическом нагружении, то данное значение коэрцитивной силы также характеризует предел усталостной прочности материала [39–42].

Процесс развития механизмов микронапряжений и пластической деформации с учетом роста плотности дислокаций приводит, например, к изменению механических (прочностных и пластических) свойств материала. Таким образом, можно сформулировать новый подход к оцениванию текущего значения показателей ресурса и его прогнозированию на основе комплексного измерения значений механических характеристик, которые чувствительны к структурным изменениям и повреждениям материала. Произвести их оценку возможно по корреляционным соотношениям со значениями твердости (микротвердости) материала [43–46]. При этом целесообразно применение методов твердомерии, использующих портатив-

ное оборудование [47–51], так как применение «классических» методов измерения твердости [52–56] предполагает использование стационарного оборудования и изготовление образцов из элементов агрегатов с нарушением целостности последних.

Таким образом, предлагаемый подход к прогнозированию технического ресурса циклически нагруженных элементов агрегатов стартового комплекса при отсутствии дефектов основан на использовании методов НК, а также положений физики и механики твердого тела. В качестве диагностического параметра, характеризующего остаточный ресурс элемента, предлагается использовать параметр поврежденности, который является показателем накопления повреждений в материале и выступает в качестве «связующего звена» между значениями информативных параметров, получаемых средствами НК, и значениями характеристик сопротивления усталости или циклической прочности. Для обеспечения достоверности результатов контроля требуется выбор и адаптация методов и средств НК и их комплексирование, а при разработке методики оценки остаточного ресурса циклически нагруженных элементов агрегатов СК при отсутствии дефектов – использование обоснованных параметров, критериев и моделей, учитывающих многофакторные структурные изменения материала в процессе развития повреждений.

Методика оценки остаточного ресурса циклически нагруженных элементов агрегатов СК при отсутствии дефектов предполагает реализацию следующих основных процедур:

1. Анализ «истории» создания и эксплуатации элемента агрегата СК, которая является типовой и предполагает анализ конструкторской, технологической и эксплуатационной документации, определение циклов, амплитуд и других особенностей эксплуатационных нагрузок, воздействующих на элемент агрегата.

2. Формирование множества параметров и разработка моделей повреждаемости, в том числе:

- анализ процессов потенциального возникновения и опасного проявления повреждаемости материала элементов;

- определение состава признаков и характера возможных предельных состояний анализируемых элементов с учетом вероятностных механизмов накопления ими повреждений и утраты работоспособности (достижения предельной поврежденности);

- определение состава параметров, характеризующих процесс развития повреждений с учетом выбранных признаков и разработка моделей, отражающих связь значений параметров с мерой (относительной мерой) поврежденности.

3. Обследование элемента с использованием методов и средств НК и оценка текущей поврежденности по результатам обследования.

4. Прогнозирование остаточного ресурса и уточнение срока очередного обследования. Оценками остаточного ресурса служат средний остаточный ресурс  $T_{ост}$  и гамма-процентный остаточный ресурс  $T_\gamma$ . Учитывая уникальность агрегатов стартового комплекса, для оценки остаточного ресурса их элементов является предпочтительным использование вероятностных методов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Накопление повреждений в материалах элементов агрегатов СК сопровождается снижением их работоспособности вплоть до их разрушения. Для обеспечения безопасной эксплуатации элементов и агрегатов СК в целом с учетом процессов развития повреждений необходимо располагать адаптированными методиками расчета, позволяющими с допустимой погрешностью определять остаточный ресурс. Для прогнозирования повреждений и остаточного ресурса элементов агрегатов СК с достаточной точностью вполне допустимо использование методов и средств НК при обследовании их технического состояния. В настоящее время назрела острая необходимость разработки (с последующим включением в норма-

тивные документы) методики прогнозирования остаточного ресурса циклически нагруженных элементов агрегатов СК при отсутствии дефектов. В основу разработки данной методики может быть положен предлагаемый подход.

### Список используемых источников

1. Сопротивление усталости элементов конструкций: учебник / А.З. Воробьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. *Болотин В.В.* Ресурс машин и конструкций: учебник. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
3. *Серенсен С.В., Козаев В.П., Шнейдерович Р.М.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. *Форрест П.* Усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
5. *Coffin L.F., Schenectady Jr.* Study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal // *Trans. ASME.* – 1954. – V. 76, № 6. – P. 931–950.
6. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения. – М., 1974. – 311 с.
7. *Работнов Ю.Н.* Введение в механику разрушения. – М., 1987. – 388 с.
8. *Сосновский Л.А., Щербаков С.С.* Концепции поврежденности материалов // *Вестник Тернопольского национального технического университета.* – 2011. – № S1. – С. 14–23.
9. *Волегов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В.* Поврежденность и разрушение: классические континуальные теории // *Физическая мезомеханика.* – 2015. – Т. 18, № 4. – С. 68–86.
10. *Кулик Н.С., Кучер А.Г., Мильцов В.Е.* Сравнительный анализ поврежденности и остаточной долговечности элементов конструкции с различными дефектами типа трещин при действии спектра нагрузок // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2009. – № 10 (67). – С. 156–166.
11. *Иванова В.С.* Усталостное разрушение металлов. – М.: Металургиздат, 1963. – 272 с.
12. *Ярема С.Я.* Стадийность усталостного разрушения и ее следствия // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1973. – Т.9, № 6. – С. 66–72.
13. *Глуханов А.С., Некрасов И.Н., Сеньченков В.И.* Оптимизация процесса диагностирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха специальных объектов // *Труды ВКА им. А.Ф. Можайского.* – 2018. – Вып. 663. – С. 54–58.
14. *Романив О.Н., Андрусив В.Н., Борсукевич В.И.* Трещинообразование при усталости металлов: (Обзор) // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1988. – Т.24, № 1. – С. 3–21.
15. *Трощенко В.Т.* Прогнозирование долговечности металлов при многоцикловом нагружении // *Пробл. прочности.* – 1980. – № 10. – С. 31–39.
16. *Циклические деформации и усталость металлов: в 2 т. / В.Т. Трощенко [и др.].* – Киев: Наукова думка, 1985. – Т. 1: Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов. – 216 с.
17. *Циклические деформации и усталость металлов: в 2 т. / В.Т. Трощенко [и др.].* Киев: Наукова думка, 1985. – Т. 2: Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов. – 224 с.
18. *Новожилов В.В.* О сложном нагружении и перспективах феноменологического подхода к исследованию микронапряжений // *ПММ.* – 1964. – Т. 28, вып. 3. – С. 393–400.
19. *Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И., Черняков Ю.А.* Теория пластичности, учитывающая микродеформации: докл. АН СССР, 284:4 (1985). – URL:[http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=dan&paperid=47196&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=dan&paperid=47196&option_lang=rus) (дата обращения: 07.05.2021). – С. 821–823.
20. *Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И.* Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

21. *Chaboche J.-L., Dang-Van K., Cordier G.* Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel // Proceedings of the 5th International Conference on SMiRT. Div L. – Berlin, 1979. – Paper L. 11/3. – URL: <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/26854/L11-3.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 07.05.2021).
22. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 7: в 2 кн. Кн. 1. *Иванов В.И., Власов И.Э.* Метод акустической эмиссии. – С. 155–159.
23. *Николайчук А.Н., Дорошев Ю.С.* Методы вибродиагностики электрических машин // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. – 2014. – №6. – С. 38–51.
24. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 5: в 2 кн. Кн. 1. *Вавилов В.П.* Тепловой контроль; кн. 2. Электрический контроль / К.В. Подмастерьев [и др.]. – 679 с.
25. *Троцкий-Марков Р.Т.* Тепловой контроль технического состояния электрооборудования с целью обеспечения электробезопасности и пожаробезопасности // Энергобезопасность в документах и фактах. – 2008. – №3. – С. 30–33.
26. *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 272 с.
27. *Баранов В. М., Гриценко А.И., Карасевич А.М.* Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
28. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 7: в 2 кн. Кн. 2: Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий [и др.]. – С. 529–531.
29. *Иванов В.И., Барат В.А.* Акустико-эмиссионная диагностика: справочник. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.
30. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 4: в 3 кн. Кн. 1. Акустическая тензометрия / В.А. Анисимов [и др.]; кн. 2. *Шелихов Г.С.* Магнитопорошковый метод контроля; кн. 3. *Филинов М.В.* Капиллярный контроль. – 736 с.
31. *Tokuoka T., Iwashimizu Y.* Acoustical birefringence of ultrasonic waves in deformed isotropic elastic materials // Int. J. Solids Structures. – 1968. – Vol. 4. – P. 383–389.
32. *Горицкий В.М., Терентьев В.Ф.* Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980.
33. *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996.
34. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 3. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Ультразвуковой контроль. – 864 с.
35. *Никитина Н.Е.* Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТАЛАН, 2005. – 208 с.
36. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 6: в 3 кн. Кн. 1. Магнитные методы контроля / В.В. Клюев [и др.]; кн. 2. *Филинов В.Н., Кеткович А.А., Филинов М.В.* Оптический контроль; кн. 3. *Матвеев В.И.* Радиоволновой контроль. – 832 с.
37. *Щербинин В.Е., Горкунов Э.С.* Магнитный контроль качества металлов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 264 с.
38. *Бакунов А.С., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е.* Магнитный контроль: учеб. пособие. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 192 с.
39. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей / В.А. Захаров [и др.] // Дефектоскопия. – 1992. – №1. – С. 41–46.

40. *Бида Г.В., Ничипурук А.П.* Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. – 2000. – № 10 – С. 3–28.
41. *Безлюдько Г.Я.* Коэрцитиметрия как основной метод неразрушающего контроля усталости и как приоритетный метод в диагностическом наборе // Сборник материалов 10-й Европейской конференции по неразрушающему контролю – ECNDT2010. – М., 2010. – С. 38–39.
42. *Кулеев В.Г.* Экспериментальное нахождение критических полей смещения 90-градусных доменных границ в пластически деформированных малоуглеродистых сталях / В.Г. Кулеев [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – №10. – С. 37–41.
43. Применение метода микротвердости к исследованию изменения свойств конструкционных материалов при циклических нагружениях / А.А. Гольденберг [и др.] // Заводская лаборатория. – 1969. – № 7, т. 35. – С. 846–849.
44. *Крамаренко О.Ю., Куликовская О.В.* Применение метода микротвердости при оценке усталостного повреждения // Заводская лаборатория. – 1972. – № 1. – С. 80–85.
45. *Федоров В.В.* Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. – Ташкент: Фан, 1979. – 168 с.
46. *Горицкий В.М.* Диагностика металлов. – М.: Металлургиздат, 2004. – 402 с.
47. ГОСТ 22761–77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – URL:<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294831/4294831194.pdf> (дата обращения: 07.05.2021).
48. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). – М.: ИПК "Изд-во стандартов", 1995.
49. ГОСТ 8.969-2019 (ИСО 16859-1:2015). Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений. – М.: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2020.
50. ГОСТ Р 56474-2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования. – М.: «НПО "Энергомаш им. Академика В.П. Глушко"», 2016.
51. РД ЭО 0027–2005. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. – URL:<https://docs.cntd.ru/document/437211983> (дата обращения: 07.05.2021).
52. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – М.: Министерство черной металлургии СССР, 1960.
53. ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – М.: ЦНИИ черных металлов, 1969.
54. ГОСТ 2999–75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М.: Госстандарт, 1976.
55. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78). Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: Госстандарт, 1977.
56. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний. – М.: ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, 2013.

О.В. Жердев,  
*кандидат юридических наук;*  
А.Ю. Онуфрей,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
А.А. Орлов,  
*кандидат техн. наук;*  
А.В. Разумов,  
*доктор техн. наук, профессор*

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ СТОЙКОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ**

В статье рассматривается методика оценивания критериальных уровней стойкости вычислительных средств к воздействию сверхкоротких импульсов. Методика основана на анализе ранее проведенных натуральных экспериментов воздействия СК ЭМИ на вычислительные средства и устройства вычислительной техники и формирование аналитических зависимостей критериальных уровней стойкости ВС от параметров СК ЭМИ. Определяющими при этом являются механизмы воздействия и физические процессы взаимодействия электромагнитного поля с полупроводниковыми структурами ВС.

Ключевые слова: критериальный уровень, сверхкороткий электромагнитный импульс, механизмы воздействия, тепловой и электрический пробой, экспериментальные исследования, натуральный эксперимент.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современное развитие сложных технических систем связано с широким применением в их составе вычислительных средств различного назначения: начиная от отдельных вычислителей для приема и обработки первичной информации и заканчивая вычислительными комплексами управления процессами функционирования технических систем. Наряду с положительным эффектом использование вычислительных средств привело к резкому снижению уровней стойкости РЭА технических систем к воздействию деструктивных факторов электромагнитной природы, одними из которых являются электромагнитные излучения сверхкоротких электромагнитных импульсов (СК ЭМИ). Объясняется это следующими обстоятельствами. Согласно [1] стойкость технической системы определяется наименьшими значениями критериальных уровней стойкости ее отдельных подсистем. В данном случае вычислительные средства (ВС), являясь одной из составных частей технической систем, имеют наименьшие значения критериальных уровней стойкости к воздействию электромагнитных излучений и, следовательно, будут определять стойкость всей системы в целом. Кроме того, дальнейшее совершенствование ВС, связанное с высокой степенью интеграции и миниатюризации элементной базы привело к еще большему снижению уровня стойкости ВС и усугубило проблему защиты современных технических систем от воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов (СК ЭМИ). В связи с этим вопросы исследования стойкости ВС от воздействия СК ЭМИ являются в настоящее время приоритетными при разработке и конструировании РЭА ТС.

Исследованию стойкости ВС к воздействию СК ЭМИ посвящено большое количество работ [2–11]. Часть из них обращена к теоретическому исследованию влияния СК ЭМИ на элементную базу ВС и определению физической сущности механизмов воздействия [5–8]. В работах [2–4, 6, 7, 11] рассмотрены вопросы экспериментального исследования воздействия СК ЭМИ на отдельные устройства ВС и вычислительные комплексы.

Наиболее достоверные данные о стойкости ВС и оценке критериальных параметров СК ЭМИ дают натурные эксперименты при непосредственном воздействии СК ЭМИ на устройства и составные части ВС. Однако на этапах раннего проектирования ввиду отсутствия опытного образца проведение таких исследований не представляется возможным. Кроме того, не всегда ясно, при каких значениях параметров СК ЭМИ будут функционировать ВС в процессе эксплуатации. Поэтому в настоящее время важной и актуальной задачей является разработка методического обеспечения априорной оценки критериальных уровней стойкости ВС в зависимости от параметров СК ЭМИ.

Важной представляется разработка на основе экспериментальных данных о критериальных уровнях стойкости ВС к воздействию СК ЭМИ методики аналитического оценивания стойкости типовых устройств ВС при произвольных значениях параметров электромагнитных импульсов.

### МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ И МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ СТОЙКОСТИ

Критериальные уровни стойкости к воздействию СК ЭМИ являются основными требованиями при проектировании ВС и представляют собой минимальные значения плотности потока мощности или энергии стороннего электромагнитного излучения, при которых происходят нарушения в работе РЭА ВС. Оценивание критериальных параметров стойкости ВС к воздействию СК ЭМИ является чрезвычайно сложной задачей и требует знания механизмов и моделей влияния электромагнитного излучения на элементную базу ВС, анализа ранее полученных экспериментальных данных воздействия СК ЭМИ на типовые вычислительные средства и учета взаимного влияния параметров СК ЭМИ на критериальные уровни стойкости.

В настоящее время различают два основных механизма воздействия: тепловой и электрический пробой. Для оценивания теплового пробоя, как правило, используют модель Вунша – Белла – Такса, которая отражает взаимосвязь величины критериального уровня от параметров СК ЭМИ [11]. Данная модель может быть использована для оценивания критериальных уровней стойкости в случаях, когда повреждения в полупроводниковых структурах ВС происходят при больших длительностях СК ЭМИ (более десятка наносекунд). Другим ограничением модели является то, что она не учитывает процесс накопления энергии при воздействии последовательности СК ЭМИ. В работе [8] предлагается усовершенствовать модель теплового воздействия с учетом времени повторения СК ЭМИ. Для этого зависимость критериального уровня плотности потока мощности предлагается оценивать по выражению:

$$k_{кр} = A\tau_{и}^{-1} + B\tau_{и}^{-0.5} + C\tau_{и}^0, \quad (1)$$

где  $\tau_{и}$  – длительность СК ЭМИ;

$A, B, C$  – параметры аппроксимации, определяемые, как правило, экспериментально.

В данной модели влияние времени повторения импульсов учитывается в двух предельных ситуациях, одна из которых соответствует импульсной передаче при  $\tau_{и}^{-1}$ , а другая – при  $\tau_{и}^{-0.5}$ , которые отражают закономерности воздействия с учетом времени тепловой релаксации в полупроводниковых структурах.

Электрический пробой является наиболее распространенным случаем влияния СК ЭМИ на полупроводниковые структуры ВС. Происходит электрический пробой за счет наведения в токоведущих элементах схем дополнительных токов и напряжений, превышающих электрическую прочность элементной базы устройств ВС. Поражающим фактором СК ЭМИ при электрическом пробое является электрическая составляющая электромагнитного поля. Для определения критериального уровня стойкости в работе [9] предложена методика, позволя-

ющая на основе обобщения экспериментальных данных воздействия мощных электромагнитных излучений на РЭА, получить функциональную зависимость напряженности электрического поля как отклик системы на воздействия с заданными параметрами. Вид функциональной зависимости представляется выражением

$$E_{кр} = f(x_i + h_i) + S, \quad (2)$$

где  $E_{кр}$  – математическое ожидание отклика;  
 $x_i$  – управляемые факторы воздействия;  
 $h_i$  – контролируемые, но неуправляемые факторы воздействия;  
 $S$  – ошибка эксперимента.

Для случая воздействия СК ЭМИ функцию отклика можно сформировать с учетом физических процессов, происходящих в РЭА ВС при необратимых отказах. Анализ экспериментальных данных показывает, что значения импульсных токов и напряжений, наводимых СК ЭМИ на проводниках печатных плат устройств ВС и внешних цепях, прямо пропорциональны длительности фронта импульса и обратно пропорциональны длительности СК ЭМИ [9]. Взаимное влияния этих параметров на значение отклика системы можно учесть через дополнительные факторы, объясняемые как скорость ввода энергии, а частоту следования импульсов – как интенсивность ввода энергии в поражаемый элемент [9]. При этих допущениях о механизме электрического пробоя функцию для определения критериального уровня стойкости ВС к электрическому полю СК ЭМИ можно записать как

$$E_{кр} = A \cdot \tau_{\phi} + B/\tau_{и} + C \cdot (\tau_{\phi}/\tau_{и}) + D \cdot F (\tau_{\phi}/\tau_{и}) + G, \quad (3)$$

где  $\tau_{\phi}$  – значение длительности фронта СК ЭМИ  
 $\tau_{и}$  – значение длительности импульса;  
 $F$  – частота следования импульсов;  
 $A, B, C, D, G$  – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению.

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Особенностью воздействия СК ЭМИ на ВС является появление в процессе функционирования массовых сбоев и отказов в работе устройств ВС, в результате чего происходят искажения в программах обработки информации, а в конечном итоге остановка вычислительного процесса. В этом случае кратковременные сбои в работе отдельных устройств можно рассматривать как отказ системы. С учетом данного предположения проведем анализ экспериментальных данных по воздействию СК ЭМИ на ВС в серии натуральных экспериментов, представленных в работах [2, 6]. Обобщенные данные по экспериментам приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Экспериментальные данные воздействия СК ЭМИ на типовые устройства ВС

Номер эксперимента	Объект воздействия	Характеристика СК ЭМИ			Критериальный уровень $E_{кр}$ , кВ/м
		Длительность импульса, нс	Длительность фронта импульса, нс	Частота, Гц	
1	Intel Pentium CPU G4600 3.60 ГГц	5	0,5	10	0,5 [ 2 ]
2		10	0,3	50	0,8 [ 2 ]
3		20	1	30	1,0 [ 2 ]
4		15	0,7	20	1,5 [ 2 ]



Окончание табл. 1

Номер эксперимента	Объект воздействия	Характеристика СК ЭМИ			Критериальный уровень Екр, кВ/м
		Длительность импульса, нс	Длительность фронта импульса, нс	Частота, Гц	
5	Сервер Pentium 4 и Хеон	0,40	0,15	1000	2,50[ 6 ]
6	Сервер Pentium1	0,45	0,25	100	5,00[6]
7	Сервер Pentium2	1,00	0,25	100	5,00[6]
8	Сервер Pentium3	0,50	0,15	500	8,50[6]
9	Сервер Pentium4	0,50	0,25	600	7,80[6]

Данные экспериментов показывают, что параметры СК ЭМИ, при которых происходят отказы в работе ВС, изменяются в широких пределах. Нормировка по наибольшим (наименьшим) значениям параметров позволила определить диапазон варьирования параметров в ходе экспериментов. Нормированные значения параметров СК ЭМИ по максимальным значениям представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Нормированные значения параметров СК ЭМИ при воздействии на типовые устройства ВС**

Номер эксперимента	Объект воздействия	Характеристика СК ЭМИ			Критериальный уровень Екр, норм
		Длительность импульса, норм	Длительность фронта импульса, норм	Частота, норм	
1	Intel Pentium CPU G4600 3,60 ГГц	0,25	0,50	0,01	0,05
2		0,50	0,30	0,05	0,09
3		1,00	1,00	0,03	0,10
4		0,75	0,70	0,02	0,20
5	Сервер Pentium4 и Хеон	0,02	0,15	1,00	0,30
6	Сервер Pentium1	0,02	0,25	0,10	0,60
7	Сервер Pentium2	0,05	0,25	0,10	0,60
8	Сервер Pentium3	0,025	0,15	0,50	1,00
9	Сервер Pentium4	0,025	0,25	0,60	0,90

Анализ результатов показывает, что длительности импульсов в экспериментах меняются от максимального значения до минимального в 40 раз, длительности фронта – в 7 раз, частота менялась в 50 раз. При таком разбросе параметров можно считать, что выборка отражает диапазон изменения параметров существующих источников генерации СК ЭМИ, является представительной и характеризует влияние параметров СК ЭМИ на значения критериальных уровней стойкости типовых устройств ВС.

### РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И ОЦЕНКА КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ СТОЙКОСТИ ВС К ВОЗДЕЙСТВИЮ СК ЭМИ

Используем нормированные значения параметров табл. 2 для составления системы уравнений и решим ее относительно неизвестных коэффициентов  $A, B, C, D$ . Количество уравнений должно быть не меньше числа коэффициентов:

$$\begin{cases} 0,05 = A \cdot 0,5 + B \cdot 4 + C \cdot 0,01 + D \cdot 0,02; \\ 0,1 = A + B + C \cdot 0,03 + D \cdot 0,03; \\ 0,3 = A \cdot 0,15 + B \cdot 50 + C + D \cdot 7,5; \\ 0,6 = A \cdot 0,25 + B \cdot 20 + C \cdot 0,1 + D \cdot 2. \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы (4) методами Крамера [12] в среде Mathcad показало следующие значения коэффициентов:

$$A = 0,17; B = -0,02; C = -3; D = 0,4.$$

С учетом полученных результатов были рассчитаны значения критериальных параметров стойкости ВС для воздействия СК ЭМИ, указанных в табл. 1.

Для сравнительной оценки результатов аналитического моделирования на рис. 1 представлены зависимости критериальных уровней стойкости ВС, полученных в ходе экспериментов [10] и расчета.

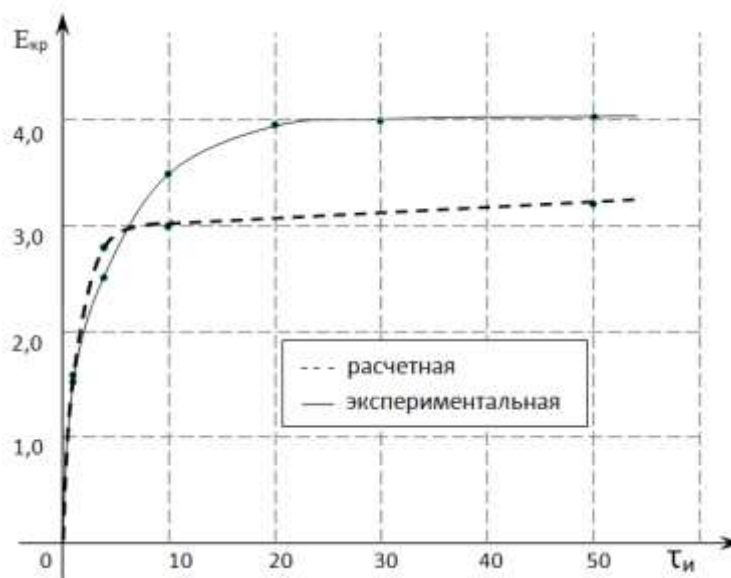


Рис. 1. Зависимости  $E_{кр}$  вычислительных средств от воздействия СК ЭМИ

Анализ зависимостей показывает относительно небольшую расхожимость результатов расчета и экспериментальных данных, что позволяет судить о достоверности расчетных оценок и возможности использования предложенного подхода для предварительной оценки стойкости разрабатываемой РЭА ВС. Относительно небольшой разброс в значениях крите-

риальных уровней стойкости объясняется прежде всего однородностью объектов исследования и использованием в них однотипной элементной базы, которая в основном и определяет стойкость ВС к воздействию СК ЭМИ. Расхождение результатов наблюдается в области больших значений длительностей СК ЭМИ, что подтверждает использование для этих значений длительностей модели теплового механизма воздействия.

Таким образом, методика расчетно-экспериментального оценивания критериальных уровней стойкости вычислительных средств к воздействию сверхкоротких импульсов включает ряд этапов, таких как:

- сбор и анализ экспериментальных данных воздействия СК ЭМИ на ВС;
- формирование аналитических зависимостей значений критериальных уровней стойкости ВС от параметров СК ЭМИ;
- составление системы алгебраических уравнений и ее решение;
- расчет критериальных уровней стойкости ВС для произвольных значений параметров СК ЭМИ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика является дальнейшим продолжением работ в области исследования стойкости радиоэлектронных средств к воздействию мощных электромагнитных излучений. В ней на основе обобщения экспериментальных данных о стойкости ВС к воздействию СК ЭМИ и моделей аналитического описания механизмов воздействия получены расчетно-экспериментальные зависимости критериальных уровней стойкости ВС от параметров СК ЭМИ. Новым является использование при оценивании критериальных уровней стойкости, наряду с длительностью и скоростью нарастания фронта, частоты следования СК ЭМИ при многократных воздействиях.

Сравнение результатов аналитического и экспериментального исследования показывает, что в наибольшей степени значения критериальных уровней стойкости совпадают в области длительностей СК ЭМИ менее 10 нс, что характерно для модели электрического пробоя. При больших значениях длительностей СК ЭМИ целесообразно использовать тепловую модель воздействия. Предложенный подход и методика расчета могут быть использованы на ранних этапах проектирования при обосновании требований к ВС по стойкости к воздействию СК ЭМИ и разработке технических решений по ее обеспечению.

## Список используемых источников

1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
2. Проблема защиты технических средств телевизионных систем наблюдения от воздействия мощных электромагнитных излучений / А.В. Разумов [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2016. – № 1. – С. 94–99.
3. *Юшков Ю.Г., Чумерин П.Ю., Артеменко С.Н.* Экспериментальное исследование воздействия СВЧ-импульсов на работу персонального компьютера // Радиоэлектроника. – 2001. – Т. 46, №8. – С. 1020–1024.
4. *Корнев А.Н., Сахаров К.Ю.* Исследование воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов на персональные компьютеры // Технологии ЭМС. – 2006. – №2. – С. 44–49.
5. *Camp M., Garbe H., Nitsch D.* UWB and EMP Susceptibility of Modern Electronics // IEEE International Symposium on EMC. – 2001. – Vol. 2. – P. 1015–1020.
6. *Михайлов В.А.* Разработка методов и моделей анализа и оценки устойчивого функционирования БЦВК в условиях преднамеренных СКИ: докт. дисс. – М., 2014. – 390 с.

7. *Фомина И.А.* Метод тестирования устойчивости телекоммуникационной системы БПЛА к воздействию СКИ: канд. дисс. – М., 2015. – 125 с.
8. *Волков А.А., Трифонов П.А.* Учет времени повторения и числа импульсов электромагнитного поля при оценке уровней стойкости радиоэлектронных средств в рамках тепловой модели // Вестник ВГУ. Сер. Физика, математика. – 2015. – № 4. – С. 5–11.
9. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Оценка уровней стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию электромагнитного излучения, характерного для электромагнитного терроризма // Техника и электрофизика высоких напряжений: сборник научных трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – № 39. – С. 105–109.
10. Модель воздействия электромагнитных излучений на оптико-электронные устройства телевизионных систем / А.В. Разумов и др. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2017. – Вып. 3. – С. 95–100.
11. *Добыкин В.Д.* Развитие теории теплового поражения полупроводниковых структур мощным электромагнитным излучением // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, № 1. – С. 108–111.
12. *Ильин В.А., Позняк Э.Г.* Линейная алгебра: учебник для вузов. – 6-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 280 с.

С.А. Поляков;  
А.Н. Степенко,  
*кандидат техн. наук;*  
Д.В. Шаповалов,  
*кандидат техн. наук*

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКОВ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ**

Проведен анализ существующих подходов к определению периодичности проведения ремонтно-профилактических работ в рамках технического обслуживания технологического оборудования. С учетом известных методов прогнозирования параметров технического состояния предложен подход к использованию прогнозной информации о безотказности вентиляционного оборудования и стоимости ремонтно-профилактических и ремонтных работ для определения времени обслуживания системы, обеспечивающий минимальные эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: техническое обслуживание, управление техническим состоянием, ремонтно-профилактические работы, функция потерь, функция риска.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Проблема, связанная с обеспечением требуемой готовности, характерна для этапа эксплуатации любой сложной технической системы. Обеспечение требуемых показателей качества функционирования вооружения и военной техники (ВВТ), к которым можно отнести и показатели готовности, решается в рамках системы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) – совокупности взаимосвязанных средств технического обслуживания, исполнителей и документации, взаимодействие которых обеспечивает поддержание и восстановление работоспособного или исправного состояния ВВТ [1].

Техническое обслуживание представляет собой вмешательство (целенаправленное внешнее воздействие) в работу системы ВВТ, направленное на получение требуемого или максимально возможного в заданных условиях эффекта от эксплуатации системы. Объектом управления в этом случае является система ВВТ, а именно – ее техническое состояние, характеризующееся в определенный момент времени значениями показателей эксплуатационно-технических свойств системы или качественными признаками, установленными в эксплуатационной и ремонтной документации на систему.

Воздействовать на техническое состояние системы ВВТ можно выбором различных мероприятий обслуживания, различающихся содержанием, правилами подготовки и методами определения сроков проведения. Такие совокупности мероприятий в ряде источников называются стратегиями управления техническим состоянием ВВТ или стратегиями обслуживания.

Их выбор определяется влиянием целого ряда факторов, например физических принципов, положенных в основу функционирования эксплуатируемой системы, характеристик индикации возникающих отказов, наличия встроенных или возможности использования внешних средств контроля параметров технического состояния, критичности оборудования и располагаемого количества ресурсов (в том числе и финансовых) и т. д. Существенное влияние на формирование множества допустимых стратегий управления оказывает объем и качество информации о характере воздействия на оборудование в процессе эксплуатации случайных факторов. Принципиальная невозможность учета влияния всех внешних факторов на процес-

сы, протекающие в оборудовании и приводящие к его отказам, характерна для эксплуатации сложных технических систем, в том числе и технологического оборудования (ТЛО).

### АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБСЛУЖИВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Целью проведения технических обслуживаний является обеспечение безотказного функционирования ТЛО на заданном интервале времени путем проведения профилактических мероприятий, периодичность проведения которых, следовательно, должна быть непосредственно связана с возможностью предотвращения отказа оборудования за счет прогнозирования возможного времени его возникновения. В зависимости от подходов к оцениванию этого момента времени и планированию периодичности и объема профилактических мероприятий можно выделить три базовые группы стратегий: жесткие, гибкие и смешанные. К группе жестких стратегий или стратегий без обратной связи относят наиболее распространенные для обслуживания ВВТ системы ТО и Р по наработке или по сроку службы. Профилактические работы при использовании такого вида стратегий планируются через интервалы календарного времени или наработки, установленные с учетом требуемой гарантии недопущения отказа (рис. 1). Определение периодов выполнения мероприятий обслуживания основывается, как правило, на данных, полученных по результатам эксплуатации до отказа совокупности однотипных систем. Установленные в процессе эксплуатации фактические времена наступления отказов используются для расчета показателей надежности данной выборки статистическими методами обработки испытаний. Полученные таким способом оценки экстраполируются на всю генеральную совокупность систем подобного вида и в литературе, рассматривающей вопросы исследования надежности технических систем, известны как «статистический подход к оцениванию и прогнозированию показателей долговечности» [2].

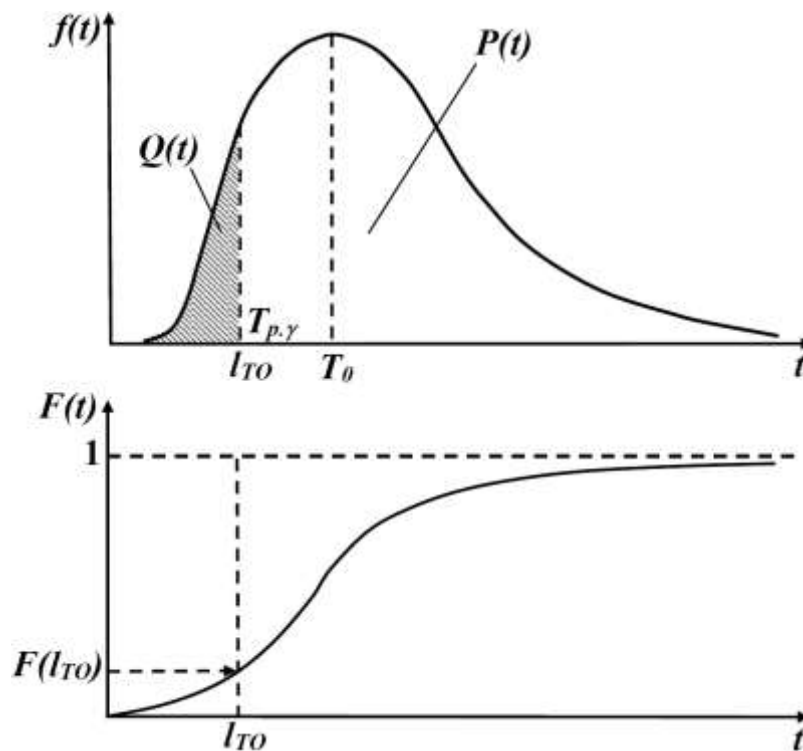


Рис. 1. Определение периодичности ТО с использованием статистического подхода

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $P(t)$  – допустимая вероятность безотказной работы изделия;  $Q(t)$  – вероятность отказа изделия,  $Q(t)=1-P(t)$ ;  $T_{\text{пг}}$  – гамма-процентная наработка до отказа;  $l_{\text{ТО}}$  – периодичность ТО изделия;  $T_0$  – средняя наработка на отказ (считая изделие восстанавливаемым);  $F(t)$  и  $f(t)$  – функция и плотность распределения времени наработки на отказ соответственно.

Условие, определяющее выбор периодичности проведения ТО, запишем в следующем виде:

$$P(T \geq l_{\text{ТО}}) \geq P(t) = \gamma; \quad (1)$$
$$l_{\text{ТО}} = T_{\text{пг}}.$$

Наличие априорной информации позволяет установить такую периодичность выполнения ТО, при которой прогнозируемая вероятность отказа элемента  $q(t)$  (системы ТЛО) не превысит заранее заданной величины  $Q(t)$ .

Проведение ТО с использованием жестких стратегий предполагает выполнение установленного в эксплуатационной документации на оборудование фиксированного объема мероприятий обслуживания, реализуемых, как правило, на всех эксплуатируемых однотипных системах независимо от их фактического состояния.

Статистический подход и использующие его в качестве основного механизма определения периодичности профилактических мероприятий жесткие стратегии имеют определенные положительные стороны и недостатки, что обусловило границы их применения на практике.

Несмотря на относительную простоту планирования ТО и отсутствие необходимости в промежуточных измерениях параметров, характеризующих состояние объекта эксплуатации, точность и достоверность статистических оценок могут оказаться недостаточными вследствие принципиальной невозможности формирования представительной выборки однотипных объектов. Причинами этого являются уникальность и малая серийность, высокая надежность эксплуатируемого оборудования, у которого сроки наработки до возникновения отказа могут исчисляться десятками тысяч часов, высокая цена отказа и, как следствие, нецелесообразность наработки таких объектов до отказа и неоднородность условий эксплуатации.

Необходимо отметить, что кажущаяся низкая стоимость стратегий, основанных на учете времени эксплуатации или наработки, характерна только для эксплуатации оборудования в течение назначенного ресурса или наработки. В случае уникальных и дорогостоящих объектов, продолжающих эксплуатироваться за пределами назначенного ресурса, такой подход оказывается неэффективным из-за резкого роста затрат на поддержание готовности, порой многократно превышающих затраты на разработку и изготовление объектов эксплуатации. Это связано с тем, что мероприятия обслуживания в начальный период эксплуатации проводятся преждевременно, а при длительных сроках эксплуатации – слишком поздно, что приводит к потерям, обусловленным издержками на преждевременное проведение ТО или же потерям, связанным с устранением последствий отказов систем.

Как правило, статистический подход к определению межрегламентных периодов целесообразно использовать для типового общепромышленного оборудования, изготавливаемого крупными партиями и в течение длительного времени. Отметим, что такое оборудование, будучи использованным в составе ТЛО, характеризуется незначительной ценой отказа и ограниченной степенью контролепригодности и ремонтпригодности. Однако и в случаях определения сроков обслуживания систем с высокой или неприемлемой ценой последствий отказа в случае неудовлетворительной контролепригодности целесообразно использование статистического подхода [3]. При этом под контролепригодностью понимается свойство системы ТЛО, характеризующее возможность определения ее предотказного состояния, то есть состояния, характеризующего повышенным риском отказа оборудования до момента проведения его обслуживания.

В случае использования стратегий управления техническим состоянием ТЛО с обратной связью объем и сроки проведения профилактических мероприятий зависят от значений параметров текущего состояния оборудования, измеренных с использованием одного из доступных для конкретного оборудования методов неразрушающего контроля.

В зависимости от используемых для описания технического состояния ТЛО показателей, а также возможности прогнозирования изменения их значений принято выделять четыре типа «гибких» стратегий управления техническим состоянием: по уровню надежности, по уровню эксплуатационных затрат, по текущим оценкам параметров объекта и по текущим и прогнозным оценкам этих параметров [3].

Первые два подхода, как правило, используют для общепромышленного оборудования, не влияющего существенным образом на результативность функционирования всего комплекса. Следовательно, такое оборудование может использоваться по назначению до отказа и уже затем подвергаться восстановлению путем проведения ремонтно-восстановительных работ. Интервалы проведения обслуживаний для систем первого типа выбираются на основе оценки уровня надежности множества однотипных систем ТЛО. В качестве инструмента получения оценок могут быть использованы статистические методы. Во втором случае в качестве критерия, указывающего на необходимость проведения ТО, используют факт возрастания эксплуатационных затрат, связанных с увеличением числа ремонтов однотипного оборудования после отказов.

Стратегии управления по текущим оценкам параметров объекта и по текущим и прогнозным оценкам этих параметров в соответствии с [3] целесообразно использовать при эксплуатации ТЛО, не относящегося к опасным производственным объектам и в то же время оказывающего существенное влияние на качество выполняемых задач. Ключевым условием, позволяющим использовать для обслуживания такого ТЛО указанные стратегии, является достаточная контролепригодность эксплуатируемых систем, то есть возможность определения его предотказного состояния и прогнозирование сроков его наступления.

Обеспечение приемлемых для принятия решения о проведении обслуживаний точности и достоверности информации о показателях надежности ТЛО возможно за счет исследования закономерностей изменения внутренних параметров оборудования, характеризующих динамику изменения его технического состояния в конкретных условиях эксплуатации. Выход значений таких параметров за установленные границы будет свидетельствовать о возникновении отказа оборудования, а прогнозная оценка моментов превышения граничных значений показателем может быть использована для расчета периодичности ТО. В данном случае речь идет о принципиально ином подходе, связанном с отказом от представления объекта в виде «черного ящика», характерного для статистического подхода. Такой подход получил название физико-статистического или вероятностно-физического.

Следовательно, необходимым условием использования физико-статистического подхода является возможность определения закономерностей изменения внутренних свойств материалов элементов эксплуатируемой системы в процессе эксплуатации, выделения определяющих параметров, характеризующих эти изменения и доступных для инструментального (приборного) контроля. На основании установленных закономерностей разрабатываются формализованные модели взаимосвязи данных параметров с показателями надежности оборудования, прогнозные значения которых затем рассчитываются с учетом результатов периодического контроля.

Преимущество физико-статистического подхода перед статистическим заключается, во-первых, в принципиальной возможности индивидуального прогнозирования наступления момента отказа оборудования; во-вторых, в существенном снижении степени неопределенности информации о показателях долговечности оборудования [2]. Однако неопределенность знаний, даже в случае использования физико-статистического подхода, полностью неустраняема. Так, например, существенная неопределенность сохраняется для большинства процес-



сов изменения свойств материалов элементов ТЛО в конкретных условиях эксплуатации и механизмов взаимодействия различных деградиционных процессов. Режимы работы ТЛО, связанные с нерегулярностью его функционирования, существенно ограничивают интервал наблюдения за определяющими параметрами, что в совокупности с ошибками измерений параметров оказывает негативное влияние на качество получаемых оценок.

На практике частичное восстановление эксплуатируемого ТЛО посредством проведения регулировок и замен некоторых элементов является существенным препятствием для использования физико-статистического подхода, так как это в ряде случаев может изменить характер деградиционных процессов и привести к несоответствию реальных процессов функционирования оборудования их описанию с помощью известных математических моделей. В этих случаях для прогнозирования технического состояния применяют специальный метод статистического исследования результатов периодических измерений параметров, называемый методом стохастической экстраполяции динамических рядов. Этот метод основан на использовании полученной статистически тенденции изменения определяющего параметра во времени и экстраполяции ее на заданный интервал. Функция плотности распределения наработок до перехода в состояние отказа  $f(t)$ , полученная расчетным способом, в последующем используется для определения значений показателей надежности. При этом для оценки времени перехода в неработоспособное состояние применяется момент времени, когда измеряемый параметр достигает предельных значений, задаваемых заранее наложенными ограничениями.

Метод стохастической экстраполяции, в отличие от физико-статистического метода, не требует изучения физики процессов, приводящих к изменениям определяющих параметров во времени. Экстраполяция производится на основе статистических методов исследования структуры случайного процесса, реализация которого представлена в виде рассматриваемого временного ряда (рис. 2). Период, для которого рассчитывается прогноз, называется интервалом упреждения.

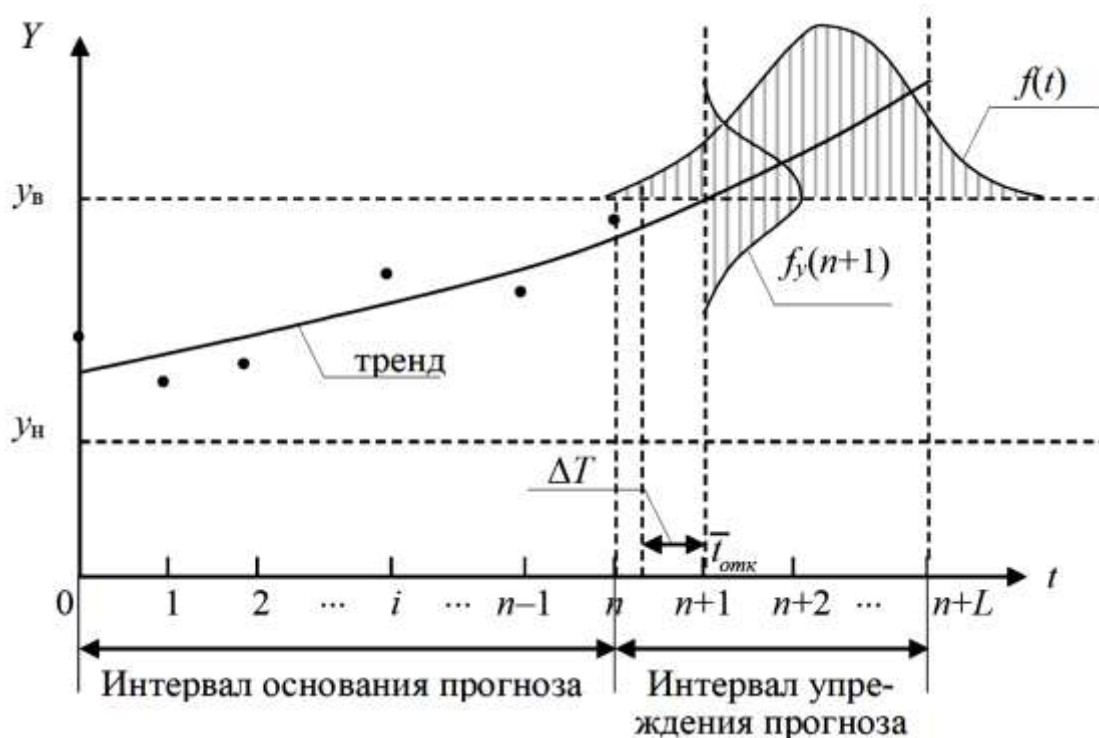


Рис. 2. Определение времени проведения ТО с помощью метода стохастической экстраполяции

Определение прогнозной оценки момента наступления отказа  $\hat{t}_{\text{отк}}$  позволяет предотвратить его, своевременно выполнив комплекс профилактических мероприятий. Формирование управляющих воздействий на техническое состояние на основе текущих и прогнозных оценок параметров производится на основе оценки реального состояния и особенностей эксплуатации конкретного агрегата (системы), что позволяет считать такую стратегию индивидуальной. Использование указанной стратегии нацелено на обеспечение возможности наиболее полного использования ресурса каждого отдельного агрегата за счет снижения числа преждевременных вмешательств в его работу и снижения расходов на ремонты вследствие своевременного предупреждения отказов в процессе применения оборудования по назначению.

Однако нерешенным остается вопрос о выборе величины интервала времени  $\Delta T$ , на который целесообразно отнести начало проведения ТО относительно полученного прогнозного значения  $\hat{t}_{\text{отк}}$ . Обозначим планируемый момент времени проведения ТО через  $t_{\text{упр}}$ , тогда

$$t_{\text{упр}} = \hat{t}_{\text{отк}} - \Delta T. \quad (2)$$

Для определения величины  $\Delta T$  введем в рассмотрение случайную величину  $z$ :

$$z = \frac{(\hat{t}_{\text{отк}} - \Delta T) - t_{\text{отк}}}{\sigma_t}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{отк}}$  – истинное время безотказной работы оборудования, нам неизвестное.

Если бы нам было известно точное значение времени безотказной работы оборудования, то именно перед этим моментом и нужно было бы проводить профилактические мероприятия. Момент упреждения определялся бы лишь текущими условиями применения оборудования: необходимо, чтобы этот момент не принадлежал интервалу применения. В этом случае  $z = 0$ , и можно было бы считать проведение ТО своевременным, а потери – равными нулю. При  $z < 0$  ( $t_{\text{упр}} < t_{\text{отк}}$ ) возникают потери, связанные с увеличением эксплуатационных расходов на более частое проведение РПП, закупку и содержание большего комплекта ЗИП (рис. 3,а). С увеличением  $z$  ( $z > 0$ ), когда за истинное значение  $t_{\text{отк}}$  принимаем большее значение ( $t_{\text{упр}} > t_{\text{отк}}$ ), возникают потери, связанные с ущербом, который влечет за собой отказ (рис. 3,б) [5].

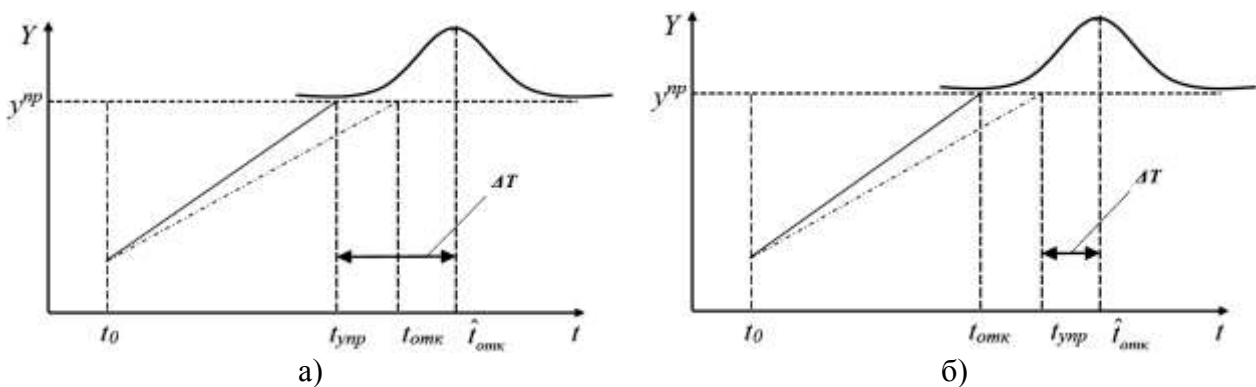


Рис. 3. Характеристика варианта выбора времени проведения ТО (времени упреждения) при  $z < 0$  (а); характеристика варианта выбора времени проведения ТО (времени упреждения) при  $z > 0$  (б)

В общем виде функция потерь от несвоевременного проведения РПП может быть задана следующим образом:

$$w(z) = \begin{cases} w_1(z) & \text{при } z < 0; \\ w_2(z) & \text{при } z \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Наиболее простые функции потерь описываются линейными, квадратичными или показательными функциями. Вид конкретной функции потерь определяется видом эксплуатируемого оборудования и затратами на его обслуживание и восстановление в случае отказа [5].

Обозначим:  $C_1$  – средние затраты на проведение профилактических мероприятий на исправном оборудовании;  $C_2$  – средние затраты на восстановление работоспособности оборудования и устранение последствий этого отказа.

Допустим, что потери, связанные с заниженной оценкой времени отказа, описываются показательной функцией, а потери, ставшие следствием отказа, имеют фиксированный и не зависящий от переменной  $z$  размер  $C_2$ . Тогда выражение для функции потерь будет иметь следующий вид:

$$wI(z) = \begin{cases} C_1 \cdot (1 - e^z), & \text{если } z < 0; \\ C_2, & \text{если } z \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

График этой функции потерь при значениях  $C_1 = 70$  у.е. и  $C_2 = 340$  у.е. приведен ниже (рис. 4). Примеры графиков функций потерь, имеющих линейную и квадратичную зависимости, на рис. 4 обозначены  $w2(z)$  и  $w3(z)$  соответственно.

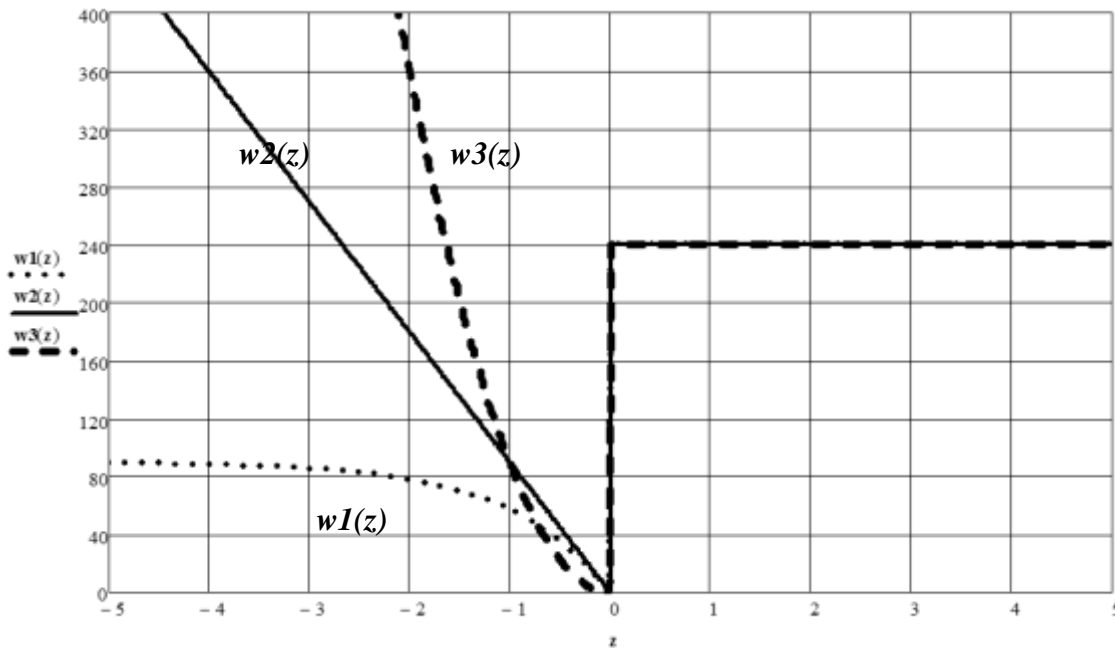


Рис. 4. Функции потерь для показательной  $w1(z)$ , линейной  $w2(z)$  и квадратичной  $w3(z)$  зависимостей

Если известен закон распределения оценки  $\hat{t}_{отк}$  с плотностью  $f_{\hat{t}_{отк}}(\hat{t}_{отк})$ , метод нахождения которого не накладывает ограничений на решаемую задачу, то возможно найти плотность случайной величины  $f_z(z)$ . Так как  $z$  является линейной функцией от  $\hat{t}_{отк}$ , а следовательно, монотонной, то в соответствии с правилами нахождения закона распределения монотонной функции от случайного аргумента, приведенными в [6], имеем:

$$\hat{t}_{\text{отк}} = t_{\text{отк}} + \Delta T + \sigma_t \cdot z;$$

$$\left| \frac{d\hat{t}_{\text{отк}}}{dz} \right| = \sigma_t;$$

$$f_z(z) = |\sigma_t| f_z(t_{\text{отк}} + \Delta T + \sigma_t \cdot z).$$

Наиболее подходящим для описания закона распределения оценки времени наступления отказа элемента вентиляционного оборудования оказалось распределение вероятностей, принадлежащее к классу нормальных и имеющее следующий вид:

$$f_t(\hat{t}_{\text{отк}}) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{\text{отк}} - \hat{t}_{\text{отк}})^2}{2\sigma_t^2}}. \quad (7)$$

В этом случае, используя правило (6), получим закон распределения  $f_z(z)$  следующего вида:

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta T + \sigma_t \cdot z)^2}{2\sigma_t^2}},$$

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta T_z + z)^2}{2}}, \quad (8)$$

$$\Delta T_z = \frac{\Delta T}{\sigma_t}.$$

Плотность  $f(z)$  характеризует вероятность появления тех или иных отклонений величины  $z$ , что позволяет найти функцию риска, которая по определению является математическим ожиданием функции потерь [5] и зависит от искомой величины  $\Delta T$ :

$$r(\Delta T_z) = M[w(z)] = \int_{-\infty}^{\infty} w(z) f_z(z) dz. \quad (9)$$

С учетом (8) выражение (9) запишем следующим образом:

$$r(\Delta T_z) = \int_{-\infty}^0 w(z) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta T_z + z)^2}{2}} dz + \int_0^{\infty} w(z) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta T_z + z)^2}{2}} dz. \quad (10)$$

Введем критерий оптимальности принятого решения, за который примем минимум функции риска. То есть оптимальным будем считать такую величину  $\Delta T$ , которое обращает в минимум функцию риска (9).

С учетом выражений (5) и (8) выражение (10) можно записать следующим образом:

$$r(\Delta T_z) = \int_{-\infty}^0 C_1 \cdot (1 - e^z) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta T_z + z)^2}{2}} dz + \int_0^{\infty} C_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta T_z + z)^2}{2}} dz, \quad (11)$$

$$r(\Delta T_z) = \frac{C_2}{\sqrt{2\pi}} \left( H \cdot \int_{-\infty}^0 (1 - e^z) \cdot e^{-\frac{(\Delta T_z + z)^2}{2}} dz + \int_0^{\infty} e^{-\frac{(\Delta T_z + z)^2}{2}} dz \right),$$

$$H = \frac{C_1}{C_2}. \quad (12)$$

Для определения минимума функции (11) достаточно минимизировать выражение в скобках, которое зависит от оптимизируемого параметра  $\Delta T_z$  и величины  $H$ . Таким образом, оптимальное решение полностью определяется только масштабом потерь (масштабным

коэффициентом  $H$ ) слева и справа от точки  $z=0$ . Постоянный множитель  $\frac{C_2}{\sqrt{2\pi}}$  в выражении (11) не меняет положения минимума функции риска, поэтому в дальнейшем будем принимать его равным единице.

Дадим геометрическую интерпретацию решения задачи и построим функции риска для случая, когда функция потерь задана выражением (5), а масштабный коэффициент  $H$ , характеризующий соотношение затрат на проведение ремонтно-профилактических работ  $C_1$  ( $z < 0$ ) и ремонта в случае отказа  $C_2$  ( $z > 0$ ) принимает значения  $H_{r1}=0,75$ ,  $H_{r2}=0,5$  и  $H_{r3}=0,2$  соответственно.

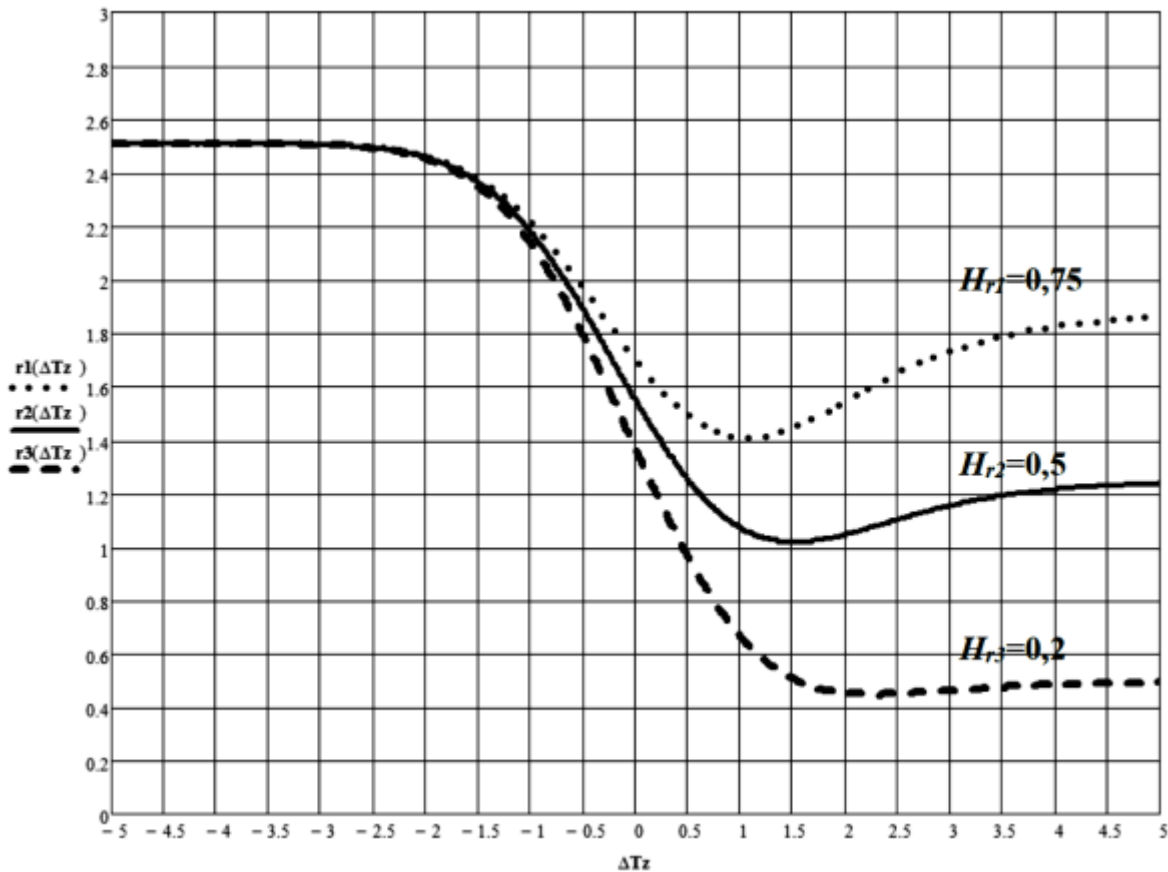


Рис. 5. Функции риска для показательной  $r1(\Delta T_z)$ ,  $r2(\Delta T_z)$  и  $r3(\Delta T_z)$  для различных масштабных коэффициентов  $H$

Как видно из рисунка 5, функции риска при различных значениях масштабного коэффициента достигают минимума при различных значениях  $\Delta T_z$ .

Используя известное значение  $\sigma_t$  рассчитаем величину  $\Delta T^*$  с помощью выражения (8). Далее вычислим значение  $P(t_{упр} < t_{отк})$ , характеризующее достоверность полученного результата, с использованием следующего соотношения:

$$P(t_{упр} < t_{отк}) = 1 - \int_{-\infty}^{\hat{t}_{отк} - \Delta T^*} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-\frac{(t - \hat{t}_{отк})^2}{2\sigma_t^2}} dt \tag{13}$$

При использовании такого подхода к определению времени  $t_{упр}$  для систем, характеризующихся различными величинами отношений  $C_1$  к  $C_2$  (масштабными коэффициентами), времена проведения ремонтно-профилактических работ также будут отличаться, что приводит к определенным сложностям при планировании обслуживания группы систем. Одним из вари-

антов разрешения такой ситуации является определение некоторого среднего значения  $\Delta T_z$  путем нахождения экстремума от суммы функций риска.

### ПРИМЕР РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПРОВЕДЕНИЯ РПР

Требуется найти прогнозное значение срока проведения профилактических работ, обеспечивающее минимум эксплуатационных затрат при эксплуатации блока охлаждающих устройств.

Расчеты проведем для системы вентиляции с полученной по результатам испытаний оценкой времени отказа  $t_{\text{отк}}=5000$  ч и средним квадратическим отклонением  $\sigma_t=30$  ч при соотношении затрат на ремонтно-профилактические работы и ремонт  $H_{r3}=0,2$ . Расчеты проведены в среде *MathCad* с использованием встроенной функции поиска экстремума *Minimize*.

Получены следующие результаты:

- оптимальное значение  $\Delta T_z=1,52$  и соответствующее ему значение интервала времени  $\Delta T=47,5$  ч;
- время проведения профилактических работ, округленное до целых значений, составляет 4952 ч;
- риск в этом случае составит 1,408 у. е. стоимости.

При этом вероятность своевременного проведения ремонтно-профилактических работ, обеспечивающих безотказное функционирование системы, составляет  $P(t_{\text{упр}}^* < t_{\text{отк}}) = 0,95$ , что, как правило, оказывается достаточным для обеспечения требуемого качества работы системы. В случае необходимости увеличения  $P(t_{\text{упр}}^* < t_{\text{отк}})$  целесообразно исследовать функцию риска при различных значениях интервалов времени  $\Delta T_z$  и оценить зависимость ее изменения от выбираемого диапазона  $\Delta T_z$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подходов к обеспечению безотказности ТЛО на стадии эксплуатации позволили обосновать необходимость использования апостериорной информации о параметрах технического состояния и информации о ресурсоемкости ремонтов и ремонтно-профилактических работ для определения оптимального по критерию наименьших затрат времени обслуживания эксплуатируемого вентиляционного оборудования.

В статье предложен алгоритм расчета функции риска, описывающей потери при эксплуатации ТЛО с учетом соотношения средних затрат на проведение профилактических мероприятий на исправном оборудовании  $C_1$  и средних затраты на восстановление работоспособности оборудования и устранение последствий отказа  $C_2$ . Результатом расчета является время упреждения  $t_{\text{упр}}$ , определяющее момент проведения ремонтно-профилактических работ. При этом вероятность своевременного проведения ремонтно-профилактических работ, обеспечивающих безотказное функционирование системы, составляет  $P(t_{\text{упр}}^* < t_{\text{отк}}) = 0,95$ , что, как правило, оказывается достаточным для обеспечения требуемого качества работы системы.

### Список используемых источников

1. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 32 с.

2. *Миронов А.Н.* Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. – МО РФ, 2000. – 429 с.
3. *Перминов А.Н.* Управление наземной космической инфраструктурой на основе мониторинга ее состояния: монография. – СПб., 2005. – 320 с.
4. *Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Решетников Д.В.* Методика выбора стратегии технического обслуживания и ремонта ракетно-космической техники // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – URL: <http://www.science-education.ru/129-21650> (дата обращения: 18.02.2021).
5. *Волков Л.И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов: учеб. пособие для втузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 400 с.
6. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. – М.: КНОРУС, 2010. – 664 с.
7. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / М.Ю. Охтилев [и др.] // Информационные технологии. – 2011. – №10. – С. 14–20.
8. Модель измерительной информации в системах мониторинга космических средств / В.А. Каргин [и др.] // Информационно-управляющие системы. – 2012. – №1. – С. 39–43.

В.П. Башкирцев,  
кандидат педагогических наук, доцент

## **АКТУАЛЬНЫЕ ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБУЧАЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ВЫСШЕЙ ВОЕННОЙ ШКОЛЕ**

В статье рассматриваются психолого-педагогические проблемы высшей военной школы по формированию личности курсанта и слушателя в условиях современных ограничений педагогического взаимодействия в образовательном процессе. Автор предлагает меры по совершенствованию механизмов педагогического взаимодействия профессорско-преподавательского состава с обучающимися в высшей военной школе в условиях ограниченного педагогического взаимодействия.

Ключевые слова: формирование личности, взаимодействие педагога и обучающихся, психолого-педагогические проблемы, высшая военная школа.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Личность как предмет исследования многих отраслей психологической науки и заботы педагогов по формированию у обучающихся качеств, удовлетворяющих потребности развития нашего общества, всегда в центре внимания государства, ученых и практиков [1].

Особое место отводится проблемам развития личностных характеристик обучающихся сегодня, когда объективные и субъективные издержки организации педагогического взаимодействия в образовательном процессе в скором времени неизбежно проявятся недостатками в профессиональной деятельности завтрашних специалистов. Это касается выпускников не только вузов, в которых обучающиеся в период пандемии полностью были переведены на удаленное обучение, но и тех вузов, где формат обучения допускал возможность частичного посещения занятий и ограниченное педагогическое взаимодействие.

Особенности образовательного процесса курсантов и слушателей военных вузов также накладывают ограничение на педагогическое взаимодействие с профессорско-преподавательским составом (ППС) по причине несения службы в нарядах, командировках и т. д.

### **ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ВЫСШЕЙ ВОЕННОЙ ШКОЛЕ**

Личностные качества специалиста любого вида, рода войск Вооруженных сил Российской Федерации являются одной из важнейших основ его профессиональной компетентности. С этой целью в рамках образовательной деятельности в военно-учебном заведении недопустимо снижение уровня воинского воспитания, направленного на развитие боевых, морально-политических и психологических качеств, необходимых офицерам для выполнения воинского долга, управления воинскими коллективами [2]. Именно у военного профессионала наиболее востребованы такие качества, как высокий уровень государственно-патриотического сознания, морально-психологическая устойчивость, готовность выполнить любой ценой профессиональные обязанности, которые воспринимаются долгом перед обществом по гарантированному обеспечению безопасности и защиты Отечества.



Педагогическое взаимодействие, рассматриваемое нами прежде всего как совокупность личностных контактов, взаимовлияний и связей субъектов образовательной деятельности, претерпевает трудности, снижающие эффективность потенциала воспитательных воздействий как со стороны профессорско-преподавательского состава, так и *учебного коллектива*.

Многолетний педагогический опыт автора учит, что никакое учебное и методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся, а также контроль учебных заданий, предусмотренных учебным планом и программой изучения дисциплин, не заменят всех функций педагогически действенного общения.

Образовательный процесс, лишенный полноценного педагогического общения, лишается в первую очередь и эффективной функции воспитания. Потребность личности в общении является базовой потребностью человека, которая обеспечивает его приобщение ко всему богатству культуры и становлению профессионально важных качеств специалиста.

В *коллективе* учебной группы потребность в общении мотивирует процессы самосовершенствования, помогает выработать убеждения и привычки, необходимые курсанту, слушателю как военному профессионалу. При ограниченном взаимодействии педагога и обучающихся снижается главным образом роль перцептивной стороны общения, то есть незаменимое влияние личности преподавателя, воспринимаемого как лидера, словом волнующего, своим примером увлекающего. Важнейшим орудием труда педагога является его личность, профессионально-педагогические убеждения. Также невозможно заменить живого контакта при установлении эффективного взаимопонимания и обмена смысловой информацией в ходе информационно-коммуникативных процессов, управления интерактивными сторонами педагогического взаимодействия. Всё это в целом требует решать проблему эффективности процесса формирования личности и социально-профессиональной компетентности обучающихся на современном уровне.

Высшая военная школа (ВВШ), выполняя государственный заказ по подготовке кадров для Вооруженных сил Российской Федерации, столкнулась сегодня с несвойственными традиционной педагогике ограничениями во взаимодействии профессорско-педагогического состава, курсантов и слушателей. Анализ определенного опыта педагогической деятельности, полученного в условиях ограниченного педагогического взаимодействия, позволяет вскрыть ряд проблем формирования личностных качеств обучающихся в образовательных организациях Министерства обороны РФ.

В обстановке массовой противоэпидемической профилактики заражения коронавирусной инфекцией (COVID-19) высшая школа в целом ушла вперед в организации образовательного процесса по сравнению с высшей военной школой. Это связано с относительной свободой ППС высшей школы по *внедрению всемирного опыта применения дистанционных образовательных технологий*, реализуемых в информационно-телекоммуникационных сетях вузов России.

Следует отметить тот факт, что при опосредованном взаимодействии обучающихся и ППС в образовательном процессе существуют определенные преимущества электронного дистанционного обучения. Например, возможность реализации индивидуально-психологических особенностей и предпочтений обучающихся в работе с теоретическим материалом (темп, доступность, удобное время работы); проведение семинаров за пределами учебной аудитории в режиме реального времени (online); контроль знаний обучающихся путем автоматизированного тестирования в online-режиме и многое другое. Однако применение таких наработанных платформ как Skype, Zoom, Google Forms, Google Класс, Moodle и других интернет-ресурсов, расширяющих возможности педагогического взаимодействия, нашедших эффективное применение в образовательном процессе студентов, неприемлемо в образовательном процессе курсантов и слушателей ввиду наличия в преподаваемых учебных дисциплинах сведений, составляющих государственную тайну.

*Проблема обеспеченности информационно-коммуникационными ресурсами, доступными высшей военной школе*, могла бы решаться в ближайшей перспективе благоприятным обра-

зом в части, касающейся в первую очередь дисциплин гуманитарного и социально-экономического цикла. Эти дисциплины, не являясь режимными по своему содержанию, оказывают доминирующее влияние в образовательном процессе по формированию личностных качеств военных кадров в ВВШ. Дифференцированный подход к решению данной проблемы со стороны соответствующих структур, на наш взгляд, давно назрел и требует определенной мотивации. Тем более, что развитие информационно-коммуникационных ресурсов в ВВШ является сегодня не только объективным процессом, но и *основным средством дальнейшего развития научной организации труда* основных категорий сотрудников военного вуза.

Анализ имеющегося опыта ограниченного педагогического взаимодействия преподавателей с курсантами, слушателями в условиях образовательной деятельности ВВШ в 2020–2021 гг. показывает также актуальность решения ряда *собственных психолого-педагогических проблем*, снижающих уровень формирования и развития личностных качеств военных кадров. На некоторых из них остановимся ниже.

Преимущества компетентностной модели образования в отличие от знаниевой демонстрируются сравнительным анализом компонентов образовательного процесса и результатов образования [3]. При этом сформированность у выпускника профессиональной компетентности подтверждается такими результатами, как:

- освоение опыта решения профессиональных, социальных, личностных проблем, задач высокой степени неопределенности;
- развитость мотивационной, ценностно-смысловой, эмоционально-волевой сфер личности выпускника, его духовно-нравственных и гражданских качеств;
- формирование деятельностно-творческого аспекта образованности.

Недостаток социально-педагогических контактов, отсутствие профессиональных оценок (выработки объективных самооценок), условий и факторов возникновения индивидуальных убеждений в ходе коллективных обсуждений на семинарских занятиях, в референтных группах создает психологическую разобщенность обучающихся и *вовсе не способствует формированию боевой слаженности*.

В отличие от гражданских вузов проблема реализации образовательных программ в военно-учебных заведениях связана с *особой задачей* образовательных организаций Минобороны России – *психологической подготовкой* обучающихся. Ее реализация во многом сводится к развитию прежде всего личностных характеристик специалиста, формированию и поддержанию морально-политической и психологической готовности к защите Родины, чувства войскового товарищества, взаимовыручки и др. [4].

Психологическая подготовка курсантов и слушателей ВВШ в условиях ограниченного педагогического взаимодействия определяется возможностями дистанционных образовательных технологий и электронного обучения. Их *разработка и активное применение* в целях достижения эффективной реализации задач *психологической подготовки*, как самостоятельная проблема образовательной системы военных вузов, заслуживает отдельного рассмотрения.

Приоритетным направлением в условиях ограниченного педагогического взаимодействия является разработка интерактивных технологий, использование тренажерных комплексов подготовки специалистов. Другим эффективным направлением достижения целей психологической подготовки и формирования профессиональных личностных качеств обучающихся служит *использование в образовательном процессе ВВШ практических задач, ситуаций*, типичных для профессиональной деятельности конкретного специалиста. При этом творческое педагогическое взаимодействие обучающихся и ППС с лично- и практико-ориентированной направленностью приобретает всё большую актуальность для ВВШ как оптимальный и проверенный путь.

Опыт, накопленный в период ограниченного педагогического взаимодействия, введения элементов дистанционных образовательных технологий и электронного обучения на кафедре подготовки и повышения квалификации педагогических работников образовательных орга-

низаций МО РФ в ВКА имени А. Ф. Можайского с адъюнктами и слушателями групп профессиональной переподготовки педагогических работников, свидетельствует, что достижению целей развития профессиональных качеств и компетенций способствует внедрение в образовательный процесс вуза контрольных заданий по разработке обучающимися практических ситуаций по каждой теме учебной дисциплины. К примеру, в ходе изучения слушателями темы «Психолого-педагогические основы формирования и развития личности курсанта в ВВШ» по учебной дисциплине «Психология и педагогика высшей военной школы» предусмотрены задания для слушателей, в ходе которых они разрабатывают две ситуации, показывающие курсантам, «к чему приводят неусвоенные темы учебной дисциплины» и «примеры решения нештатных ситуаций выпускниками-отличниками». Данная форма педагогического взаимодействия применима к любой учебной дисциплине и желательна для качественного усвоения каждой темы. Например, выполняя контрольное задание по дисциплине «Основы теории цепей», слушатель Ф. приводит ситуацию, которая возникла в процессе проведения комплексных испытаний космического аппарата (КА). «Инженер отдела телеметрических измерений лейтенант П. осуществил требуемые манипуляции и запустил станцию для обеспечения телеметрических измерений. Через 2 минуты в помещении возникли посторонние звуки, потрескивания, появился посторонний запах. Для принятия решения об объявлении аварийной ситуации инженеру отдела необходимы достаточные основания. В случае объявления им аварийной ситуации произойдет остановка испытаний и деятельность сотни человек. Под угрозой окажется выполнение технологического графика подготовки КА. Последствия же в случае отсутствия его реакции на неисправность, действительно значимую, ведут к пожару и возбуждению уголовного дела.

Лейтенант П. проявил высокую профессиональную компетентность и психологическую готовность. Располагая информацией о проведении работ представителями производства в соседнем помещении и доскональными знаниями своей станции, быстро установил причину неполадок: использование одних и тех же входных трактов параллельно. Лейтенант П. объявил по громкоговорящей связи об аварийной ситуации и дал команду на остановку испытаний. Своевременность действий лейтенанта П. позволила существенно ограничить объем повреждений. Дорогостоящий КА остался исправен, поломку станции быстро устранили путем замены блока. Через два часа испытания были продолжены, лейтенант П. был поощрен командованием». Ситуация, приведенная слушателем Ф., завершается словами «...лейтенант П. во время обучения в академии занимал должность командира отделения и закончил академию с отличием».

Использование в учебных целях ситуаций, показ примеров профессионального поведения, как это показано выше, эффективно способствует формированию такой компетентности специалиста, как «освоение опыта решения профессиональных, социальных, личностных проблем, задач высокой степени неопределенности».

Эффективность контрольных заданий, предусматривающих моделирование слушателями ситуаций, оценивается выше, если нештатные ситуации, примеры слушателей предусматривают в процессе их решения курсантами не только грамотные действия, но и выработку умений предвидеть и минимизировать *негативные последствия* альтернатив их развития.

Использование практических ситуаций педагогом применительно к каждой изучаемой теме дисциплины дает возможность проверить не только теоретические *знания* (что, к сожалению, чаще всего и делается начинающими педагогами на семинарах, зачетах и экзаменах), но и выявить уровень формирования практических *навыков и умений*. В этом проявляется незаменимая роль экстремальных (нештатных) ситуаций для выработки личностных качеств, убеждений и привычек, составляющих компетентность того или иного специалиста, выпускника. Создание банка ситуаций, типичных для деятельности выпускника определенной специальности, требует достаточного опыта и времени от профессорско-преподавательского состава, вместе с тем способствует профессиональному совершенствованию как обучающихся, так и начинающих преподавателей.

Как показывает опыт и апробация частной методики проведения промежуточной аттестации адъюнктов и слушателей с использованием автоматизированных средств тестового контроля по учебной дисциплине «Психология и педагогика ВВШ», созданные базы типичных профессиональных ситуаций могут успешно применяться в виде контрольных форм проверки усвоения знаний, навыков и умений в составе электронных учебно-методических комплексов. При этом электронное тестирование, как наиболее динамичная форма реализации задач диагностики сформированности личностных качеств и компетенций специалиста, позволяет педагогам учесть в дальнейшей своей работе те темы учебной дисциплины, которые не в полной мере усвоены обучающимися и требуют наращивания усилий.

### **РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМ ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ВЫСШЕЙ ВОЕННОЙ ШКОЛЕ**

Ограниченное педагогическое взаимодействие профессорско-педагогического состава с обучающимися, внедрение элементов дистанционных образовательных технологий и электронного обучения по-новому актуализирует проблему *реализации принципов и методов обучения и воспитания* в образовательном процессе высшей военной школы.

Отражая законы и закономерности педагогической деятельности, принципы и методы являются научной основой эффективности психолого-педагогической подготовки преподавателя и осуществления на практике педагогического взаимодействия по достижению целей обучения и воспитания в образовательном процессе. Однако анализ педагогических условий, ограничивающих контакты и возможности соблюдения научных требований, обеспечивающих эффективность применения принципов и методов воспитания, обнаруживает новые противоречия в реализации ППС принципов воспитания в образовательном процессе в период ограниченного педагогического взаимодействия с обучающимися ВВШ.

Например, принцип индивидуального и дифференцированного подхода в воспитании предполагает глубокое и всестороннее знание и учет индивидуально-психологических особенностей обучающихся: определение преподавателем каждому из обучающихся посильных задач в соответствии с их личностными характеристиками; постоянный анализ педагогом итогов воспитательных воздействий на курсанта, слушателя; своевременное внесение преподавателем корректив в процесс воспитания с учетом особенностей каждой личности. Однако выполнить основное условие для обеспечения данных требований и всесторонне изучить обучающихся из-за непродолжительности непосредственного общения с ними не представляется реальным.

Важнейшая роль в развитии личностных качеств обучающихся в ВВШ принадлежит принципу воспитания в коллективе и через коллектив. Реализация этого принципа обеспечивает ценностно-ориентационное единство обучающихся, сплоченность и войсковое товарищество, умение подчинять личные интересы общим, дорожить мнением коллектива, гордиться своей специальностью, принадлежностью к определенному роду, виду Вооруженных сил РФ. Сила группового мнения обеспечивает поддержку лучших традиций курсантами и слушателями, а мнение коллектива учебной группы оказывает незаменимое влияние в борьбе с негативными явлениями, корректирует развитие личности обучающегося в военном вузе. Групповая сплоченность личного состава и боевая слаженность подразделения в целом достигает своего полного выражения в форме подчинения совместной деятельности государственным интересам, социальным нормам и ценностям. Все эти возможности по достижению высоких целей воспитания остаются, в условиях ограниченного взаимодействия и отсутствия постоянного общения преподавателя с курсантами, слушателями, лишь потенциальными. Воспитание в процессе учебной деятельности ориентирует на поощрение разумной инициативы и активности обучающихся, требовательное отношение педагога к недостаткам дея-

тельности курсанта, слушателя и др. Однако включение личности в разнообразные виды учебной деятельности, особенно практические, ограничено в условиях удаленного обучения и частичного посещения занятий.

Учитывая комплексный характер применения принципов воспитания в образовательном процессе, исключающий игнорирование каких-либо из этих принципов педагогом, отсутствие возможности реализовать их эффективно в полном объеме в силу объективно сложившихся ограничений ведет не только к снижению эффективности воспитательного процесса, но и к педагогическим деформациям преподавателя.

В ходе решения педагогических задач преподавателем важная роль отводится методам воспитания. В системе воспитательных воздействий ВВШ методы воспитания позволяют оказывать преподавателю непосредственное воздействие на обучающегося, формировать у курсанта, слушателя профессионально важные качества личности, ценностные установки и убеждения, необходимые привычки, корректировать поведение обучающихся. Педагогика, как наука и практика, дает всестороннюю характеристику методам воспитания, рекомендации ППС по их эффективному применению [5]. Однако *выработка полноценных рекомендаций преподавателю ВВШ по реализации* таких традиционных для педагогики *методов воспитания*, как упражнение, пример, убеждение и других *в условиях ограниченного педагогического взаимодействия* остается проблематичной.

На основании выше изложенных психолого-педагогических проблем наиболее перспективным решением задач по формированию личностных качеств курсантов и слушателей, обучающихся в условиях ограниченного педагогического взаимодействия, на наш взгляд, является *разработка и освоение преподавательским составом электронных учебно-методических комплексов (ЭУМК)*, включающих типичные профессиональные ситуации, автоматизированные средства контроля знаний и формирования заданных компетенций.

Рассматривая проблему создания ЭУМК с позиций психолого-педагогического обеспечения, следует дифференцированно подходить к технической реализации задач ЭУМК: *как к средству педагогического влияния ППС на курсантов и слушателей и как к способу научной организации педагогического труда в ВВШ*. Безусловным требованием качества их разработки является обеспечение *учета научных основ педагогического управления процессами обучения и воспитания, развития и психологической подготовки обучающихся в образовательных организациях Министерства обороны Российской Федерации*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, объективно сложившаяся в условиях пандемии ситуация в стране, породившая ограничения в педагогическом взаимодействии, не могла не сказаться на качестве процесса формирования личностных качеств курсантов и слушателей ВВШ. Рассмотренные выше проблемы формирования личностных характеристик обучающихся являются актуальными для ВВШ в условиях ограничения контактов педагога с курсантами, слушателями и требуют дальнейших целенаправленных исследований.

Предлагаемые меры по совершенствованию механизмов педагогического взаимодействия профессорско-преподавательского состава с курсантами и слушателями способствуют реализации задач формирования личностных характеристик обучающихся в условиях ограниченного педагогического взаимодействия в высшей военной школе.

## Список используемых источников

1. О внесении изменений в Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» по вопросам воспитания обучающихся: федеральный закон от 31.07.2020 №304-ФЗ. –

URL: [http://www.publication.pravo.gov.ru\\_doc\\_LAW\\_001202007310075/](http://www.publication.pravo.gov.ru_doc_LAW_001202007310075/) (дата обращения: 12.04.2021).

2. Об организации военно-политической работы в вооруженных силах Российской Федерации: приказ Министра обороны РФ от 22 июля 2019 г. № 404. – URL:[https://vii.sfu-kras.ru/images/pdf/Prikaz\\_MO\\_RF\\_404.pdf](https://vii.sfu-kras.ru/images/pdf/Prikaz_MO_RF_404.pdf) (дата обращения: 21.02.2021).

3. Жук О.Л., Сиренко С. Н. Педагогика: практикум на основе компетентностного подхода: учебное пособие для преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений / под общ. ред. О.Л. Жук. – Мн.: РИВШ, 2007. – 182 с.

4. О внесении изменений в приказ Министра обороны Российской Федерации от 15 сентября 2014 г. № 670 «О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»: приказ Министра обороны РФ от 24.10.2019 № 626. – URL:[http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_340085/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_340085/) (дата обращения: 21.02.2021).

5. Военная педагогика: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Питер, 2017. – С. 360–367.

Л.А. Иноземцева;  
Н.С. Кужекин,  
*кандидат философских наук, профессор*

## **МОТИВАЦИОННО-ЦЕННОСТНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПОЗНАВАТЕЛЬНОГО ИНТЕРЕСА СЛУШАТЕЛЕЙ И КУРСАНТОВ ВОЕННО-УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ**

В статье рассматриваются актуальные проблемы формирования познавательного интереса слушателей и курсантов посредством развития его мотивационно-ценностного содержания.

Ключевые слова: познавательный интерес, мотив, ценность знания, мотивационно-ценностная направленность обучения.

В настоящее время требования к подготовке специалистов в системе военного образования ставят перед профессорско-преподавательским составом совершенно новую задачу по формированию мотивационно-ценностной сферы слушателей и курсантов, в которой главенствующее место отводится развитию их познавательного интереса. В условиях, когда на лидирующие позиции выдвигаются информация и технологии, сохранение аксиологической роли знания становится актуальной проблемой.

Формирование у слушателей и курсантов познавательного интереса в образовательном процессе – один из сложных и актуальных вопросов педагогики высшей военной школы, решение которого ориентировано на повышение качества учебного процесса в военно-учебных заведениях и, соответственно, на более эффективное решение задачи подготовки слушателей и курсантов к профессиональной деятельности.

В отечественной психолого-педагогической литературе уделяется определенное внимание вопросам формирования познавательного интереса. Исследователи познавательного интереса (Б.Г. Ананьев, Л.С. Выготский, П.Я. Гальперин, В.В. Давыдов, А.В. Петровский, Л.С. Рубинштейн, Г.И. Шукина, Д.Б. Эльконин и др.) раскрывают сущность понятия «познавательный интерес», выявляют его структурные компоненты, обозначают качественные признаки его развития, определяют педагогические условия и этапы формирования познавательного интереса у обучающихся [5]. Тем не менее в профессиональной деятельности преподавателей обнаруживается несоответствие между важностью формирования такого интереса обучающихся и его реальным местом в педагогической деятельности.

Познавательный интерес представляет собой сложное психологическое свойство личности, проявляющееся в осознанной и мотивированной потребности обучающегося в поиске новых знаний, овладении профессиональными компетенциями, которые обеспечиваются его эмоциональной активностью и приложенными волевыми усилиями в процессе познавательной деятельности.

В структуре познавательного интереса как сложного образования личности обучающихся, как правило, выделяют четыре компонента:

– мотивационно-ценностный компонент, отражающий осознание слушателями и курсантами важности формирования познавательного интереса в учебной деятельности и возможность в наибольшем удовлетворении когнитивных и профессиональных потребностей обучающихся;

– эмоционально-волевой компонент, связанный с удовлетворением избранной слушателями и курсантами военной специальностью и определенным отношением обучающихся к своей военно-специальной подготовке как фундаменту профессиональной компетентности, а также с их умением преодолевать препятствия в познавательной деятельности;

– когнитивный компонент, характеризующийся стремлением слушателей и курсантов к совершенствованию теоретической подготовки в конкретной научной и предметной области в процессе обучения в военном образовательном учреждении;

– коммуникативный компонент, выражающийся в стремлении слушателей и курсантов активизировать и укреплять познавательный интерес к освоению учебных дисциплин в процессе коммуникации с субъектами образовательного процесса [4].

По мнению авторов, мотивационно-ценностный компонент является основополагающим в данной структуре. Актуальные потребности и мотивы слушателей и курсантов стимулируют их к постановке учебных целей и задач, на которые будет ориентирована познавательная активность обучающихся, определяют соответствующую область знаний и пути приобретения требующихся знаний.

Под мотивационно-ценностным (аксеологическим) компонентом мы понимаем положительно мотивированное отношение слушателей и курсантов к познавательной деятельности, представляющее ценность знания для личности обучающихся, их профессиональной деятельности.

Мотивационно-ценностный компонент состоит из системы доминирующих мотивов и системы ценностных ориентаций. В условиях военного вуза основной вид деятельности обучающихся – это освоение основных профессиональных образовательных программ по специальности, которая включает учебно-познавательную, служебную, общественную и другие виды деятельности. Эта деятельность требует от слушателей и курсантов устойчивой мотивации с доминированием в ней военно-профессиональных мотивов, а также системы общечеловеческих, профессиональных и духовно-нравственных ценностей, выражающих личностную значимость и ценностное отношение обучающихся к профессиональной деятельности.

Проблема формирования познавательного интереса слушателей и курсантов зависит от многих факторов. Чтобы построить и эффективно реализовать образовательную программу для обучения слушателей и курсантов, преподавателю необходимо правильно понимать специфику аудитории, с которой он взаимодействует. Так, особенностями коллектива слушателей, отличающими его от коллектива курсантов, является и разновозрастность, и наличие разных воинских званий и занимаемых должностей. В таких коллективах познавательные интересы обучающихся определяются не только возрастными, но и индивидуальными особенностями, обусловленными приобретением в процессе их жизнедеятельности многолетнего опыта различной предметной деятельности, социальным взаимодействием и т.д. Слушатели более целенаправленны, чем курсанты, у слушателей имеется прошлый учебный опыт, они имеют привычку связывать новую информацию с имеющимся багажом знаний.

Преподавателю, задействованному в системе дополнительного профессионального образования, необходимо учитывать такие отличительные особенности познавательной деятельности слушателей, как:

- осмысленное отношение к своему учебному процессу;
- наличие стремления самостоятельно добывать и применять полученные в период обучения знания, а также применять их в дальнейшей практической деятельности;
- влияние на познавательный процесс бытовых, социально-экономических и других факторов;
- наличие профессионального и жизненного опыта.

Данная категория обучающихся в полной мере осознает важность образовательной деятельности, прикладное значение полученных знаний и способна точно обозначить цель своего познавательного интереса.

Для того чтобы цели образовательного процесса преобразовались в цели обучающихся, важно обеспечить педагогические условия развития и саморазвития их потребностей и мотивов, проживания ими ценности собственной учебной деятельности, приобретения значимого полезного предметного опыта (совокупности знаний, моделей поведения, отношений и дея-



тельности, способностей преодоления сложных ситуаций), другими словами – требуется целенаправленно развивать познавательный интерес.

Успешность формирования мотивационно-ценностного компонента познавательного интереса обеспечивается соблюдением ряда условий. Важнейшим из них, по нашему мнению, являются: формирование у слушателей и курсантов положительной мотивации к обучению профессии офицера; обеспечение мотивационно-ценностной направленности учебных занятий; совершенствование содержания и методики преподавания учебных дисциплин; реализация профессионально-практической направленности обучения; внедрение информационно-компьютерных технологий в образовательную деятельность; повышение профессиональной компетентности профессорско-преподавательского состава.

Обеспечение мотивационно-ценностной направленности учебных занятий – центральный элемент механизма формирования познавательного интереса у слушателей и курсантов. Максимальная активизация познавательной деятельности обеспечивается использованием активных методов обучения, например посредством моделирования конкретной ситуации на учебных занятиях, ее разбором и поиском оптимальных способов решения. Такой подход, опираясь на выявленные недостатки в знаниях, умениях и навыках, позволяет обучающимся осознавать свои умения, определить траекторию дальнейшего самосовершенствования.

Широкое использование активных методов обучения в образовательном процессе военного вуза, привлечение слушателей и курсантов к участию в семинарах, конференциях, работе военно-научных кружков, к проведению конкурсных творческих работ, учитывающих личностное отношение к учебной информации, способствуют включению в деятельность, накоплению познавательного опыта в решении поставленных задач. Использование проблемной подачи материала побуждает слушателей и курсантов к размышлению, самостоятельному поиску информации, к развитию их познавательного интереса, к самостоятельным выводам и обобщениям [3].

Активное распространение на учебных занятиях практической направленности в академии в качестве способа формирования мотивационно-ценностного отношения приобретает совместная деятельность обучающихся в микрогруппах (расчетах, отделениях и т. п.), которая способствует активному вовлечению слушателей и курсантов в решение познавательных задач, позволяет проявить инициативу, ответственность, самостоятельность.

Формирование мотивационно-ценностного компонента познавательного интереса предполагает организацию требовательно-доброжелательной обстановки на учебных занятиях, создание благоприятного психологического климата, нейтрализацию напряженности в аудитории, использование приемов эмоционального воздействия на обучающихся, а также воздействие на ведущие мотивы слушателей и курсантов [2].

Формирование мотивационно-ценностного компонента познавательного интереса обучающихся находит свое отражение в использовании приемов обучения с применением возможностей мультимедийных средств обучения. Использование современных информационно-компьютерных технологий, разработка электронных учебно-методических комплексов дисциплин на кафедрах и размещение их элементов на портале академии позволяет осуществлять подбор учебного материала с повышенным уровнем проблемности, в котором отражаются реальные проблемы профессиональной деятельности [1]. Демонстрационная визуализация непосредственно привлекающих интерес объектов, схем, фрагментов кинофильмов запускает механизмы восприятия материала, культивирующие потребность в дальнейшем как личностном, так и профессиональном развитии слушателей и курсантов.

Формирование познавательного интереса слушателей и курсантов предусматривает выбор преподавателем различных способов, средств и педагогических приемов развития познавательного интереса слушателей и курсантов. Комплекс педагогических решений преподавателя зависит от его педагогического опыта и мастерства и требует непрерывного повышения профессиональных компетенций профессорско-преподавательского состава академии.

Важной составляющей процесса повышения квалификации является индивидуализация обучения. Факторами, позитивно влияющими на познавательный интерес, являются разработка индивидуальных заданий, направленных на овладение различными формами работы со специальной литературой, выполнение практических заданий, связанных с моделированием ситуаций и поиском наиболее оригинальных решений.

На кафедре повышения квалификации накоплен положительный опыт индивидуализации обучения, который позволяет обеспечить лично-ориентированное обучение и персонализацию подготовки педагогических работников. Так, учебный модуль «Практика. Индивидуальное задание» направлен на самостоятельную разработку слушателями актуальных образовательных задач. Например, слушателям из числа профессорско-преподавательского состава предлагается выполнение индивидуального задания на тему «Развитие познавательного интереса у слушателей и курсантов в ходе изучения учебной дисциплины кафедры (по выбору)». При выполнении индивидуального задания слушатели группы повышения квалификации педагогических работников исследуют характерные проявления познавательного интереса у курсантов при изучении учебной дисциплины, описывают личный опыт формирования познавательного интереса, формулируют рекомендации по его развитию у слушателей и курсантов академии.

Таким образом, формирование познавательного интереса является одной из сложных и актуальных проблем современного образовательного процесса высшей военной школы. Накопленный педагогическими коллективами академии опыт формирования познавательного интереса у слушателей и курсантов, актуализация роли ценности фундаментальных знаний в процессе освоения теоретических основ военной специальности способствуют успешному овладению обучающимися практическими элементами профессиональной деятельности и дальнейшему эффективному решению военно-профессиональных задач.

### Список используемых источников

1. *Иванова Л.Б.* Формирование познавательного интереса курсантов в условиях применения информационно-коммуникационных технологий. – Саранск: МГПИ им. М.Е. Евсевьева, 2009. – 233 с.
2. Педагогическая психология: учебное пособие / Л.А. Иноземцева [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 116 с.
3. Психология и педагогика высшей военной школы: учеб. пособие / Н.А. Репях [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 248 с.
4. *Шевченко О.Н.* Познавательный интерес как ценность университетского образования. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. – 148 с.
5. *Щукина Г.И.* Проблема познавательного интереса в педагогике. – М.: Педагогика, 1971. – 351 с.

Н.С. Кужекин,  
кандидат философских наук, профессор;  
В.В. Мышко,  
кандидат техн. наук, доцент;  
В.А. Чикуров,  
кандидат техн. наук, доцент

## ПЛАНИРОВАНИЕ ОБЪЕМА УЧЕБНОЙ РАБОТЫ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Проанализирован опыт планирования объема учебной работы профессорско-преподавательского состава на примере кафедры вуза, представлена модель обоснования расчета объема годовой учебной нагрузки педагогических работников.

Ключевые слова: объем учебной работы, профессорско-преподавательский состав, весовой коэффициент.

Учебная работа профессорско-преподавательского состава образовательной организации (далее в тексте для краткости педагогические работники или ППС) включается в годовой бюджет их служебного (рабочего) времени.

Ежегодное планирование служебной деятельности и труда педагогических работников производится в соответствии с действующими нормами [1], рекомендациями [2], а также в зависимости от установленного верхнего предела учебной нагрузки [3].

Организация деятельности военных учебных заведений (далее – вузов) предполагает обязательную разработку и издание документов в пределах компетенции организации, определяющих нормы времени по видам деятельности, включаемым в учебную нагрузку ППС.

Существует определенная сложность в планировании расчетных значений объема учебной работы на учебный год. Главная проблема состоит в том, что расчет объема учебной работы производится дифференцировано по должностям ППС для каждого структурного подразделения образовательной организации (кафедры) [1].

Учебная нагрузка может перераспределяться как между различными структурными подразделениями, так и между преподавательским составом внутри них. Однако при этом должно соблюдаться следующее правило: суммарно показатели временных затрат должны укладываться в общий объем годовой учебной нагрузки по дисциплинам, преподаваемым кафедрой. В связи с этим задача выработки единого подхода планирования объема учебной работы для различных категорий преподавательского состава, к числу которых относятся как офицеры, так и лица гражданского персонала Вооруженных сил, является актуальной и практически значимой.

Авторы предлагают модель обоснования планирования объема учебной работы ППС.

В самом общем виде математическая модель может быть представлена выражением

$$\mathbf{M} = \langle \mathbf{P}, \mathbf{O}, \mathbf{D}, \mathbf{U}, \mathbf{Z}, \varphi, \psi \rangle, \quad (1)$$

где  $\mathbf{P}$  – множество преподавателей,  $\mathbf{P} = \{\Pi_k \mid k = \overline{1, r}\}$ ;

$\mathbf{O}$  – множество образовательных программ,  $\mathbf{O} = \{O_u \mid u = \overline{1, g}\}$ , соответствующих одному или нескольким уровням образования и реализуемых вузом;

$\mathbf{D}$  – множество возможных учебных дисциплин,  $\mathbf{D} = \{D_i \mid i = \overline{1, m}\}$ ;

- U** – множество данных по лимиту времени,  $U = \{U_{ij} \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$ , соответствующих учебным планам и учебным программам для проведения  $j$ -го типа занятий по  $i$ -й дисциплине;
- Z** – множество видов учебных занятий,  $Z = \{Z^k \mid k = \overline{1, r}\}$ , характеризующих  $Z_{ik}$  учебную нагрузку  $k$ -го преподавателя в проведении занятий  $j$ -го вида по  $i$ -й учебной дисциплине с учетом весовых коэффициентов,  $Z^k = \{Z_{ij}^k \mid k = \overline{1, r}; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$ ;
- φ** – оператор, устанавливающий связь между множествами **D**, **U**, **Π** и **Z**, т.е.  

$$\varphi: D \times U \times \Pi \rightarrow Z;$$
- ψ** – оператор обратного отображения, устанавливающий связь между множеством учебных дисциплин, множеством видов учебных занятий, множеством преподавателей, с одной стороны, и видами учебной деятельности дифференцировано по должностям преподавательского состава – с другой,  

$$\psi: D \times Z \times \Pi \rightarrow U.$$

В каждом вузе формируется соответствующий штат педагогических работников **Π** из числа военнослужащих и лиц гражданского персонала, учитывающий потребность в реализации комплекса образовательных программ **O**, соответствующих одному или нескольким уровням образования.

В настоящее время в бюджете служебного (рабочего) времени на учебный год количество времени, необходимого для выполнения учебной работы, рассчитывается исходя из примерного соотношения видов деятельности для различных категорий преподавательского состава и составляет, например, для гражданского персонала по программам высшего и дополнительного профессионального образования 20–61% (для офицеров – 20–56%) [1].

В соответствии с Примерными нормами ... расчет производится по лимиту времени, отводимому учебными планами и учебными программами. Для решения задачи распределения учебной нагрузки предлагается введение весовых коэффициентов.

Весовые коэффициенты могут быть сформированы по трем классам, в зависимости от следующих параметров:

- занимаемой должности;
- типа кафедры образовательной организации;
- участия в преподавании дисциплины в соответствии с расписанием занятий.

При определении объема учебной работы на учебный год, выполняемой ППС, предполагается расчет:

- 1) дифференцировано по должностям преподавательского состава для каждого структурного подразделения образовательной организации (в зависимости от верхних пределов);
- 2) дифференцировано для каждого структурного подразделения образовательной организации (в зависимости от типа кафедры);
- 3) исходя из среднего объема учебной нагрузки и учета коэффициента участия преподавателя в учебном процессе по расписанию занятий.

**Расчет объема учебной работы, выполняемой ППС, соответственно занимаемой должности.** Бюджет служебного (рабочего) времени ППС на учебный год ( $ГБ_{C(P)B}$ ) в часах определяется по формуле

$$ГБ_{C(P)B} = \Pi_{H_{BC(TH)}} \cdot \frac{D_{Г} - D_{ВП} - D_{ОП} - Ч_{ПП}}{D_{P}}, \quad (2)$$

где  $\Pi_{H_{BC(TH)}}$  – продолжительность рабочей недели (для военнослужащих – 40 часов, для гражданского персонала – 36 часов);

- $D_{\Gamma}$  – дней в году (календарных);  
 $D_{ВП}$  – выходные и праздничные дни за год;  
 $D_{ОТП}$  – дни отпуска (без выходных);  
 $D_{Р}$  – количество дней в рабочей неделе;  
 $Ч_{ППС}$  – количество часов в году, обусловленное сокращением продолжительности рабочего дня на один час в предпраздничные дни.

Дифференцировано по должностям преподавательского состава устанавливается нагрузка по чтению лекций или проведению занятий практической направленности согласно оператору обратного отображения  $\psi$ . Определяются ответственные за проведение занятий с учетом охвата всего множества учебных дисциплин (практик), а также лимит времени, отводимый на выполнение множества задач профессиональной деятельности  $Z^k = \{Z_{ij}^k \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$ .

Средний объем учебной нагрузки  $УН_{ср}$  определяется по формуле

$$УН_{ср} = \frac{\sum УР_{год}}{K_{ППС}},$$

- где  $\sum УР_{год}$  – суммарный объем годовой учебной работы, закрепленной за конкретной кафедрой;  
 $K_{ППС}$  – количество педагогических работников, выполняющих учебную работу на конкретной кафедре.

Как отмечалось выше, примерное соотношение видов деятельности устанавливается для различных категорий преподавательского состава [1], однако методические рекомендации по расчету учебной нагрузки и других видов служебной деятельности не дают четких указаний о том, сколько занятий с различными категориями обучаемых обязан проводить преподаватель в течение учебного года в зависимости от занимаемой должности. Это можно сделать, если при расчете нормы годовой учебной нагрузки учесть пропорциональное уменьшение (увеличение) благодаря введению соответствующих значений коэффициентов, которые могут устанавливаться каждому сотруднику вуза.

При этом, устанавливая коэффициент работникам по совместительству или работникам, работающим на неполную ставку, необходимо учитывать ставку, на которой они находятся.

Например, пусть в целях распределения учебной нагрузки и планирования других видов работ профессорско-преподавательскому составу и научным работникам приказом начальника вуза установлено среднее значение  $УН_{ср} = 630$  часов.

В зависимости от занимаемой должности учебная нагрузка ППС ограничивается верхним пределом [3].

Учитывая средний объем учебной нагрузки, можно рассчитать верхние пределы учебной работы  $УН_{пред}$  каждого преподавателя, которые определяются по формуле

$$УН_{пред} = УН_{ср} \times K_{д},$$

- где  $K_{д}$  – коэффициент по должности ППС, допущенного к проведению учебных занятий.

Так, например, коэффициент по должности ППС, допущенного к проведению учебных занятий, может быть уменьшающим и увеличивающим объем учебной нагрузки.

Проведенные авторами расчеты показали возможность установления следующих значений коэффициентов должностным лицам кафедры: начальник (НК) – 0,80; заместитель (ЗНК) – 0,90; профессор (ПРФ) – 1,00; доцент (Д) – 1,05; старший преподаватель (СП) – 1,10; преподаватель или ассистент (П) – 1,15.

Тогда с учетом установленного среднего значения  $УН_{СР}$ , верхние пределы  $УН_{ПРЕД}$  могут принять значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

**Верхние пределы учебной нагрузки по должностям с учетом установленного среднего объема учебной нагрузки на учебный год в объеме 630 часов**

Должность ППС	Коэффициент по должности	Верхние пределы учебной нагрузки
НК	0,80	504
ЗНК	0,90	568
ПРФ	1,00	630
Д	1,05	662
СП	1,10	694
П	1,15	726

Локальными нормативными актами могут быть установлены дополнительные коэффициенты оценки объема, результативности и качества деятельности профессорско-преподавательского состава  $K_d$ .

**Расчет объема учебной работы, выполняемой ППС, с учетом коэффициента, устанавливаемого для каждого структурного подразделения образовательной организации.** Проведенные авторами расчеты показали, что в вузе могут быть установлены коэффициенты для подразделений по типу кафедры (табл. 2), например:

1,10 – для общеакадемических кафедр (таких как кафедра начертательной геометрии и черчения, кафедра физической подготовки и других кафедр гуманитарного, математического и естественнонаучного направлений);

1,00 – для всех выпускающих кафедр, а также кафедр социально-экономического направления (кафедра истории и философии, кафедра социально-экономических дисциплин);

0,85 – для специализированных кафедр [таких как кафедра радиационной, химической и биологической защиты, кафедра управления войсками и службы штабов и других общеакадемических кафедр тактического (оперативно-тактического), военно-технического (военно-специального) и общевойскового направлений].

Таблица 2

**Коэффициенты по должностям с учетом типа структурного подразделения**

Должность ППС	Коэффициент по должности с учетом типа кафедры		
	общеакадемическая	выпускающая	специализированная
НК	0,88	0,80	0,68
ЗНК	0,99	0,90	0,77
ПРФ	1,10	1,00	0,85
Д	1,16	1,05	0,89
СП	1,21	1,10	0,94
П	1,27	1,15	0,98

Тогда верхний предел учебной нагрузки  $ВП_{УН}$  каждого преподавателя (табл. 3) можно рассчитать с учетом установленного по образовательным программам высшего образования верхнего предела учебной нагрузки по должностям ППС в объеме, не превышающем 900 ча-

сов в учебном году [2], и принятого в образовательной организации среднего объема учебной нагрузки  $УН_{CP}$  630 часов по формуле

$$ВП_{УН} = УН_{CP} \times K_D \times K_{II},$$

где  $K_D$  – коэффициент по должности ППС;

$K_{II}$  – коэффициент подразделения (кафедры), установленный.

Таблица 3

**Верхние пределы учебной нагрузки по должностям с учетом типа структурного подразделения при установленном среднем объеме учебной нагрузки на учебный год в объеме 630 часов**

Должность ППС	Верхние пределы учебной нагрузки по должностям		
	общеакадемическая	выпускающая	специализированная
НК	610	504	364
ЗНК	686	568	410
ПРФ	762	630	456
Д	800	662	478
СП	839	693	502
П	878	726	524

По решению ученого совета вуза учебная нагрузка между ППС может перераспределяться. Это решение закрепляется приказом начальника вуза «Об установлении годовой учебной нагрузки ... на учебный год», который закрепляет «входные данные» по объему нагрузки за каждой конкретной кафедрой и непосредственно за каждым педагогическим работником.

**Расчет объема учебной работы, выполняемой ППС, с учетом коэффициента участия преподавателя в учебном процессе по расписанию занятий.** На основе введенных обозначений производится формирование исходных данных и ограничений.

Полагаем, что с учетом предложенной модели известны: множество  $D = \{D_i | i = \overline{1, m}\}$  возможных учебных дисциплин, множество  $\Pi = \{\Pi_k | k = \overline{1, r}\}$  преподавателей, множество  $U = \{U_{ij} | i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$  данных по лимиту времени, отводимому учебными планами и учебными программами для проведения  $j$ -го типа занятий по  $i$ -й дисциплине.

Необходимо получить  $k$  подмножеств  $Z^k = \{Z_{ij}^k | i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$  множества  $Z$  видов учебных занятий, где  $Z_{ik}$  – нагрузка  $k$ -го преподавателя в проведении занятий по расписанию  $j$ -го типа по  $i$ -й учебной дисциплине, и реализовать оператор отображения  $\varphi$ :

$$\varphi: D \times U \times \Pi \rightarrow Z.$$

Расчет времени по расписанию занятий  $Z_{ik}$  производится по формуле

$$Z^k = V_{ik} * U_{ij},$$

где  $V_{ik}$  – весовой коэффициент;

$U_{ij}$  – лимит времени, отводимый для проведения  $j$ -го типа занятий по  $i$ -й учебной дисциплине.

Исходя из расчетов верхних пределов учебной нагрузки по должностям с учетом типа структурного подразделения количество занятий по расписанию распределяется между пре-

подавательским составом кафедры при планировании учебной нагрузки, как отдельно на семестры, так и на весь учебный год (табл. 4).

Таблица 4

### Распределение учебной работы по дисциплинам между ППС

Задействование ППС на период обучения (осень/весна)		Данные по лимиту времени, U			Иные виды учебной работы
Преподаватель, П	Дисциплина, D	Лекции	Занятия практической направленности		
Преподаватель 1	Дисциплина П1-1	$V_{л\_п1-1}$	$V_{п\_п1-1}$	***	$V_{ив1-1}$
	Дисциплина П1-2	$V_{л\_п1-2}$	$V_{п\_п1-2}$	***	$V_{ив1-2}$
	***	***	***	***	***
	Дисциплина П1-N <sub>1</sub>	$V_{л\_п1-N1}$	$V_{п\_п1-N1}$	***	$V_{ив1-N1}$
***	***	***	***	***	***
Преподаватель K	Дисциплина П <sub>K</sub> -1	$V_{л\_пK-1}$	$V_{п\_пK-1}$	***	$V_{ивK-1}$
	Дисциплина П <sub>K</sub> -2	$V_{л\_пK-2}$	$V_{п\_пK-2}$	***	$V_{ивK-2}$
	***	***	***	***	***
	Дисциплина П <sub>K</sub> -K <sub>K</sub>	$V_{л\_пK-KK}$	$V_{п\_пK-KK}$	***	$V_{ивK-KK}$

Для применения единого подхода к расчету параметров объема учебной работы по расписанию занятий авторы предлагают воспользоваться следующим принципом. Определение верхних пределов учебной нагрузки по должностям рассмотрено выше. Рассмотрим минимальные требования, предъявляемые к преподавательскому составу военно-учебных заведений при планировании учебной нагрузки.

Проведенные авторами расчеты показали, что возможно использовать следующие значения коэффициента для расчета объема аудиторных занятий по расписанию учебных занятий должностным лицам кафедры: НК – 0,25; ЗНК, ПРФ, Д – 0,30; СП – 0,40; П – 0,6.

Окончательно результаты расчета объема годовой учебной нагрузки педагогических работников можно представить в виде фрагмента таблицы (табл. 5), которая ежегодно формируется на каждой кафедре вуза.

Таблица 5

### Планирование годовой учебной нагрузки преподавательскому составу кафедры

Кафедра	Занимаемая должность	Ученая степень	Воинское звание	Фамилия и инициалы	Всего часов	По расписанию	В том числе лекции
***	НК	***	полковник	***	504	126	94
***	ЗНК	***	полковник	***	568	198	96
***	Д	***	подполковник	***	662	298	60
***	СП	***	подполковник	***	693	246	96
***	ПРФ (0,5 ставки)	***	гражданский персонал	***	314	126	86
***	***	***	***	***	***	***	***
***	П	***	гражданский персонал	***	726	436	122
***	П (0,5 ставки)	***	гражданский персонал	***	368	218	50

Авторы считают, что использование представленной модели путем введения соответствующих коэффициентов по должности ППС и коэффициентов подразделения (кафедры), которые устанавливаются по решению ученого совета вуза, может устранить образовавшийся-



ся, в некотором смысле, вакуум в обосновании методики расчета объема учебной работы путем издания локальных нормативных актов.

Представленная модель дает возможность, используя соответствующие операторы, описывающие учебный процесс, проводить расчеты (как вручную, так и автоматически), которые учитывают совместное оценивание суммарных показателей временных затрат при общем расчете объема годовой учебной нагрузки по дисциплинам, преподаваемым кафедрой, и может быть использована для автоматизированного формирования расчетных параметров объема учебной работы преподавательского состава кафедры, допущенного к проведению учебных занятий.

### Список используемых источников

1. Примерные нормы времени по видам учебной деятельности, включаемым в учебную нагрузку педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации, и иным выполняемым ими видам деятельности: указания статсекретаря – заместителя Министра обороны Российской Федерации от 4 ноября 2017 г. № 205/2/513; приложение к указаниям статсекретаря – заместителя Министра обороны Российской Федерации от 4 ноября 2017 г. № 205/2/513. – М., 2017. – 25 с.

2. Методические рекомендации по расчету учебной нагрузки, планированию служебной деятельности и труда педагогических работников. Утверждены Начальником Главного управления кадров Министерства обороны Российской Федерации 15 ноября 2017 г. – М., 2017. – 50 с.

3. О продолжительности рабочего времени (нормах часов педагогической работы за ставку заработной платы) педагогических работников и о порядке определения учебной нагрузки педагогических работников, оговариваемой в трудовом договоре (с изменениями и дополнениями от 29 июня 2016 г., 13 мая 2019 г.): приказ Министерства образования и науки РФ от 22 декабря 2014 г. № 1601. – URL: <http://ivo.garant.ru/document/redirect/70878632/0> (дата обращения: 12.01.2021).

В.П. Огородников,  
*доктор философских наук, профессор*

## **ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: МОДЕЛЬ МЫШЛЕНИЯ И ТЕХНИКА**

В статье производится логико-гносеологический и онтологический анализ искусственного интеллекта. В этом контексте выявляется различие между естественным и искусственным интеллектом, а также между естественным и искусственным сознанием. Прослеживаются основные исторические этапы развития и использования искусственного интеллекта. Уточняется место искусственного интеллекта в системе «человек – техника». Выясняется роль применения систем искусственного интеллекта в решении основных глобальных проблем современности.

Ключевые слова: естественный и искусственный интеллект, искусственный интеллект как модель мышления, искусственный интеллект как техника, система «человек – техника», современные глобальные проблемы.

Космические комплексы гражданского и военного предназначения, обеспечение кибербезопасности и возможности кибератаки на информационные системы, управление трафиком на основе искусственного интеллекта, техническое обслуживание интеллектуальных сетей, гражданский и военный транспорт с автоматическим управлением, высококачественная робототехника, навигационные системы, мобильная связь, музыка и потоковое видео, наблюдение за любыми объектами, всевозможные банковские операции, служба знакомств и проведение совещаний и конференций, удаленная работа – нет сегодня ни одной сферы деятельности человека, где бы не могли применяться системы искусственного интеллекта.

Весьма актуальным становится изучение сущности искусственного интеллекта в его соотношении с человеческим сознанием, выяснение того, какие современные глобальные проблемы могут быть решены с помощью систем с искусственным интеллектом, а какие (и почему) усугубляются его внедрением в человеческую деятельность.

Идея возможности искусственно копировать *homo sapiens* имеет большую историю, начиная с древних народных сказок и мифов.

В Новое время философские основания воспроизведения мыслительного процесса были заложены рационализмом Р. Декарта (1596–1650), В. Лейбница (1646–1716) и Б. Спинозы (1632–1677). Эти мыслители предполагали, что всякое конкретное знание является результатом дедуцирования из некоторых общих понятий (идей) при помощи законов мышления. Практическим воплощением этой идеи было создание механических счетных машин В. Шиккардом (1623), Б. Паскалем (1643) и В. Лейбницем (1671). Русский исследователь С.Н. Корсаков сконструировал и пытался внедрить в работу разного рода канцелярий «умную машину», работающую на перфокартах (1832).

Но по-настоящему широкий интерес к искусственному интеллекту появляется не только у читающей публики, но и у ученых в связи с работами английского математика и логика А.М. Тьюринга (1912–1954). В разработанной им в 1936 году абстрактной вычислительной машине было использовано формализованное понятие «алгоритм» как система инструкций по совершению последовательных операций – дискретных шагов, ведущих от исходных данных к искомому результату. Работающая на основе данного вычислительного алгоритма «машина Тьюринга» – виртуальный автомат – была способна на выборку нужного символа (буквы) из ячеек, расположенных на ленте, вдоль которой она дискретно передвигалась в прямом и обратном направлениях, а также на впечатывание нового символа в ячейку. На основе этой разработки Тьюринг в 1948 году создал компьютер, разработал теорию информатики и концепцию искусственного интеллекта.

Во второй половине XX века происходит компьютерная революция, характеризующаяся активным внедрением компьютеров в материальное и духовное производство. Компьютерная ре-

волюция выступает, по мнению многих философов, основанием вступления мировой цивилизации в эпоху «постиндустриального», или «информационного», общества. Данная эпоха порождает множество надежд и одновременно проблем, связанных с применением систем с искусственным интеллектом.

Попробуем дать дефиницию основным понятиям, отражающим существенные моменты этих надежд и проблем. Прежде чем говорить об искусственном интеллекте, определим коренное понятие «интеллект».

В «Толковом словаре живого великорусского языка» В. Даля есть термин «интеллектуальный», означающий «духовный», «умственный», «разумный». Для дальнейшего анализа важно, что Даль указывает здесь же противоположные термины: «вещественный», «плотский», «телесный», «чувственный» [1]. В большинстве современных словарей интеллект отождествляется с рассудком – способностью логически мыслить, рассуждать. В «Новой философской энциклопедии» интеллект определяется как способность мыслить. При этом указывается, что гносеологически интеллект обозначает способность к абстрактному познанию и противостоит чувственному и интуитивному познанию [3].

Таким образом, интеллект относится к логике сознания – к мышлению и, следовательно, связан с понятием, суждением и умозаключением как логическими формами познания. Поэтому и искусственный интеллект не может претендовать на моделирование всего сознания, а более или менее адекватно воспроизводит только мыслительные процессы. Мышление – это отражение в абстрактно-субъективном – понятиях, суждениях, умозаключениях – сущности конкретно-объективных отношений в окружающем человека мире, в связи человека и мира, во взаимодействии людей [7]. Отсюда становится ясным принципиальное различие между искусственным интеллектом и искусственным сознанием. Не случайно программы для компьютеров написаны на языке математической (символической) логики – предельной степени формализации аристотелевской формальной логики.

Мышление – высший «этаж» сознания. Сознание раскрывается как единство чувственного и рационального и в истории своей эволюции, и для современного человека. Познание мира начинается с отражения непосредственной объективной реальности в ощущениях, восприятиях и представлениях. Ощущение – отражение отдельных свойств объективной реальности при помощи органов отражения. Обоняние несет нам запахи, осязание – пространственные характеристики, слух – звуки, зрение – отражение световых волн разной частоты колебания, внутренние ощущения – состояние отдельных органов нашего организма. Все эти образы абстрактны, ибо не дают нам системного многообразия окружающих предметов.

Восприятие – синтез нескольких ощущений одного или нескольких свойств – приближает нас к отражаемому объекту, оно конкретнее ощущения. Так, простое ощупывание стола дает представление о текстуре его поверхности, высоте, длине и ширине. Еще ближе к отражаемому находится представление – сохраненный в механизме памяти наглядно-чувственный образ некоторых предметов. Однако даже определенное множество представлений не являет сознания. Представлениями обладают почти все животные. Именно представления позволяют распознавать врага или потенциальную жертву, полезные или вредные растения, лежат в основе некоторого целесообразного поведения. Представление – еще не мысль, но последняя ступень в подъеме к исходной форме мысли – понятию. Понятие – мысль, отражающая существенно общие характеристики объективной или субъективной реальности. Образование понятия – сложный и долговременный процесс обобщения целого множества представлений. Он совершается не в голове одного человека, а в определенном социуме, в результате совместной долговременной деятельности, в которой понятие формируется и проверяется на истинность. Советский приматолог, этолог, доктор медицинских наук Л.А. Фирсов (1920–2006) доказал, что образование понятий и довербальное мышление доступно и высшим приматам [8, 9].

В процессе возникновения человеческого мышления участвуют два связанных фактора – физиологический и социальный. Физиологический нельзя сводить к функционированию мозга, иначе возникнет желание отождествить мышление с нейрофизиологическими процессами, а ис-

кусственный интеллект – с воспроизведением этих процессов в абиотическом субстрате. Попытки такого воспроизведения предпринимаются со времени внедрения в производство первых ЭВМ.

Неразрывная связь физиологического и социального в становлении сознания была раскрыта в трудах Ф. Энгельса [10], Э.В. Ильенкова [2], А.И. Мещерякова [5], Л.А. Фирсова [8, 9] и других отечественных и зарубежных исследователей.

В них доказаны следующие положения:

1. Вне развитого чувственного отражения мира человеческий мозг не может обеспечить появление сознания (случаи с педагогически запущенными слепоглухонемыми детьми, последствиями множественных тяжелых травм органов ощущения).

2. Сознание в целом и его высший уровень – мышление является результатом совместной трудовой деятельности людей (социальный фактор). У настоящих «маугли» сознание не возникает, а у подлинных «робинзонов» – утрачивается.

3. Эмоциональная сфера человека не может быть отождествлена с чувственным отражением, а является единством чувственного и рационального. Ощущение как форма познания (в отличие от ощущения как формы отражения) всегда связана с пониманием того, ЧТО ощущается. В переживании горя или радости, стыда или гордости, ненависти или любви человек не только что-то чувствует, но и рационально оценивает свои ощущения, или эмоционально реагирует на какое-то суждение, слово.

Непосредственной действительностью мысли является язык. Критерием лучшего знания языка является развитая «внутренняя речь» – мышление на соответствующем языке. Язык человека – знаковая система любой физической природы, которая ничего не отражает, а лишь фиксирует условную связь понятий и элементов языка – слов-символов. В различных языках одно и то же понятие обозначается разными символами. Сказанное относится и к используемому искусственным интеллект машинному языку символической логики, который фиксирует связь не между понятием и знаком, а между знаком-словом естественного языка и кодирующим его в двоичном коде знаком искусственного языка. Элемент искусственного языка представляет собой символ символа – метасимвол. В этом ярко проявляется принципиальное различие естественного и искусственного интеллектов. Первый оперирует понятиями, второй – символами символов понятий. Если язык человека по И.П. Павлову – вторая сигнальная система, то искусственный язык – третья сигнальная система.

Те рациональные формы отражения и познания, которые для человека являются результатом его социальной эволюции, для искусственного интеллекта выступают в качестве элементов искусственного языка – частью программы, алгоритма, разработанного изначально человеком. Искусственному интеллекту в «чистом виде» не присущи и не должны быть присущи эмоции, хотя он может и должен рационально оценивать данные сенсорных датчиков.

Следовательно, искусственный интеллект, используя создаваемые человеком символы символов, не создает собственных целей, но выполняет задачи, поставленные перед ним человеком.

Моделирование мышления осуществляется на разных уровнях в любом компьютере. Сущностью этого моделирования является воспроизведение процесса оперирования понятиями. Но при этом понятия фиксируются в знаках искусственного языка, и оперирование понятиями становится оперированием знаками. Целью мышления является постижение истины, то есть нахождение суждения, адекватно отражающего объективную или субъективную реальность. Логика как орган мышления является методологией познания. Но если исходные суждения не истинны, построенное вполне логично умозаключение также не может быть истинным. Кроме того, логичность обеспечивает истинность заключения только в категорических умозаключениях. Вероятностные умозаключения не могут быть основанием для дальнейшего рассуждения, ибо требуют принять один из возможных вариантов заключения как единственно истинный, как категорическое суждение, и использовать его как посылку для нового умозаключения. Так, например, при игре в шахматы расчет ходов учитывает не все связи между своими и ответными ходами противника. В противном случае даже просчет только пяти последовательных ходов

выльется в необходимость учета 100 миллионов вариантов всех возможных ходов [6]. Шахматисты не могут себе позволить анализ всех возможных вариантов и интуитивно, опираясь на свой опыт, редуцируют их к нескольким наиболее вероятным. Вместе с тем такой просчет доступен современным системам с искусственным интеллектом, которые научились обыгрывать даже гроссмейстеров.

Проведенный анализ показывает, что искусственный интеллект не выступает даже адекватной моделью естественного. Искусственный интеллект моделирует только логику связи понятий в логике связи знаков. Но даже самая адекватная модель никогда не тождественна оригиналу. Отсюда следует, что непозволительно отождествлять естественный и искусственный интеллект ни по их сущности, ни по существованию (функционированию). В данном контексте сам термин «искусственный интеллект» может быть охарактеризован как метафора. Поэтому система с искусственным интеллектом не может отделить себя от человека и вступить с ним в конфронтацию, как создание Франкенштейна из романа «Франкенштейн, или Современный Прометей», опубликованного английской писательницей М. Шелли еще в 1818 году.

В своей сущности искусственный интеллект представляет собой на сегодняшний день высший уровень развития техники и технологии, но сохраняет основные характеристики техники.

Аристотель, определяя сущность раба, назвал его говорящим орудием. Раб, как и любое орудие, выполняет не свою волю, а волю хозяина, воплощает мысли последнего, отличаясь от простого орудия умением говорить. Наделенные искусственным интеллектом современные робототехнические системы также имеют возможность вести диалог с человеком. Однако если раб начинает в основной своей жизнедеятельности руководствоваться своим сознанием, своей волей, то он перестает быть рабом. Одна из проблем искусственного интеллекта – не устроят ли нам интеллектуальные машины «восстание рабов»? Как это возможно и как можно это предотвратить? По существу эти вопросы можно свести к одному, более сложному – возможно ли искусственное сознание, то есть сознание, развивающееся и осуществляющееся на абиотическом материале?

Если встать на позиции тех, кто отрицает такую возможность, необходимо будет признать абсолютную исключительность и уникальность *Homo sapiens*, отказаться от эволюционной теории, синтетической теории эволюции и вернуться в объятия теологии. Такому ретроградству сейчас очень способствует глубочайший системный кризис человечества. Приметы этого экономического, политического и социокультурного кризиса видны сегодня уже невооруженному никакой социальной доктриной человеку.

С другой стороны, именно этот кризис подпитывает концепции, объявляющие искусственный интеллект чуть ли не спасителем человечества.

Что, кроме интеллектуальных машин, позволит поднять производительность труда, разрешить все глобальные проблемы? Надежды на совершенную технику, которая заменит рабский труд, приведет к изобилию производимых вещей, продуктов питания и услуг вспыхивают с каждым новым научным открытием, каждой новой ступенью в техническом прогрессе.

Решение вопроса о том, является ли искусственный интеллект губителем человечества или его спасителем неотделимо от вопроса о сопряженной эволюции человеческого производства и техники.

Развитие производительных сил общества всю историю человечества напрямую определяется развитием техники и местом человека в системе «человек – техника». В первобытную эпоху примитивная техника была представлена лишь рабочим органом (заостренный камень, палка и т.п.), превращающим предмет труда в продукт труда. Человеку в этой системе тогда принадлежали и управляющий элемент – человеческий интеллект, и двигатель – мускульная система человека, и передаточное звено, передающее движение от двигателя к рабочему органу (рука, нога, всё тело). В эпоху разложения родового строя и становления классового общества к технике постепенно переходило увеличивающее производительность труда передаточное устройство (топор, вилы, лук и стрелы, ручная прялка и т.п.). Европейский феодализм возникает на основе постепенной передачи функций двигательного устройства от человека к машине (водя-

ные и ветряные мельницы). Развитие капиталистического производства предполагает изобретение и использование искусственно созданного двигателя – паровой машины. Паровой двигатель обеспечил развертывание промышленной революции (XVIII–XIX века), то есть массового перехода от ручного труда к машинному. Теперь к технике принадлежали и рабочий орган, и передававшее движение от двигателя к рабочему органу передаточное устройство, и двигатель. К человеку относился лишь управляющий элемент, связывающий все три названных в единую систему и определяющий цели и задачи человеческой деятельности. Индустриальная революция сопровождалась буржуазными революциями – переходом от феодального аграрного производства к капиталистическому индустриальному. Те страны, которые задержались в развитии техники, задерживаются и в становлении нового способа производства и общественной жизни.

Переход к так называемому «постиндустриальному» или «информационному» обществу был связан с процессом ухода человека из непосредственного производства сначала вещей, а потом и услуг. Функции управления переходят к технике, которая становится цифровой, то есть связанной с искусственным интеллектом. Теоретиками этот процесс называется третьей промышленной революцией или «цифровой» революцией.

Предсказали и описали основные черты информационного общества Дж. Гэлбрейт, Д. Белл и О. Тоффлер во второй половине XX века, хотя массовые публикации о цифровой революции появились в начале XXI века.

«Постиндустриальное» и тем более «информационное» общество требуют передачи машине функций управления производственным процессом. Это становится возможным благодаря открытию микромира, изобретению полупроводников и развитию электронной индустрии. Переход к «информационному» обществу определяется компьютеризацией всех производственных и непроизводственных социальных процессов. Человек из организатора производства становится наблюдателем, контролером и ученым, изобретающим новые парадигмы и программы. Искусственный интеллект позволяет отдать машине часть и этих функций. Возникает автоматизированное программирование и конструирование.

Первой страной, совершившей прорыв в применении технологий с искусственным интеллектом, была Япония, электронная и компьютерная техника которой достигла своего расцвета уже к середине 1960-х годов. Эффект широкого использования систем с искусственным интеллектом в производстве особенно заметен в развитии экономики Китая в последние десятилетия. Из отсталой аграрной страны Китай превратился в мощную по уровню промышленного, военного и социального развития державу мира.

По существу возможность создания технологий искусственного интеллекта возникла благодаря появлению сначала ламповой, а потом и полупроводниковой радиоэлектроники. Вычислительные машины обладают быстродействием, превосходящим человека в разы, а сегодня – уже в миллионы раз.

Что же несет нам новая, вооруженная искусственным интеллектом информационная техника? С точки зрения О. Тоффлера информационная техника вызовет «захватывающие дух социальные изменения» не только во всех структурах общественных отношений, в политике, но и в семье, в каждом отдельном человеке, который будет производить не вещи или услуги, а информацию. Полностью компьютеризированное и автоматизированное производство разрешит все экономические, политические и социокультурные проблемы, позволит перейти к распределению материальных и духовных благ по потребности. Иначе говоря, техника произведет «тихую» социалистическую революцию [4].

Сторонники такого подхода к будущему общества не учитывают то несомненное обстоятельство, что всякий научно-технический прогресс двулик – он, несомненно, является основанием повышения производительности и эффективности производства. Но этот же прогресс может привести (и уже приводит) к усилению имеющихся глобальных проблем и возникновению новых, например проблемы взаимодействия новейшей информационной техники и общества.

В заключение данной статьи рассмотрим противоположные следствия применения систем с искусственным интеллектом в жизнедеятельности человека в контексте глобальных проблем современности.

1. Среди современных глобальных проблем первое место по актуальности на протяжении уже нескольких десятков лет занимает угроза мирового термоядерного конфликта. С одной стороны, применение систем с искусственным интеллектом позволяет четко отслеживать угрозы применения термоядерного оружия и своевременно их блокировать. Но с другой – именно интеллектуализированные и роботизированные устройства дают возможность нанесения многозвенного и точного удара «под прикрытием» и блокирования систем перехвата носителей ядерного оружия.

2. Следующей по значимости глобальной проблемой выступает для человечества нарушение энергетического баланса планеты, истощение минеральных, сырьевых и биологических ресурсов Земли. Казалось бы, применение искусственного интеллекта позволяет создать альтернативные источники энергии, организовать восполнение утрачиваемых ресурсов. Однако известно, что экологическая проблематика возникла именно в связи с мощнейшим воздействием на экосистему Земли вооруженного новейшей техникой и технологией Человека. С искусственным интеллектом связана и расширяющаяся разработка не утилизируемых природой синтетических материалов.

3. Еще одной из острейших глобальных проблем является всё возрастающий разрыв между процветающими и бедствующими регионами, между богатством немногих и нищетой большинства. Может быть здесь оправданы надежды на новую экономику интеллектуального производства, которая несоизмеримо поднимет производительность труда и позволит решить названную проблему? Да, надежды на интенсивное увеличение производительности труда, качественное изменение самого характера труда, безусловно, оправдываются. Но научно-технический прогресс ведет вместе с тем к появлению всё возрастающей армии «лишних людей» – безработных, а следовательно, нищих. Системы с искусственным интеллектом вытесняют с производства не столько людей, занимающихся примитивным физическим трудом, но учителей, преподавателей, врачей, инженеров, менеджеров разного уровня – представителей умственного труда.

4. Серьезнейшей глобальной проблемой является сегодня международный терроризм. Системы с искусственным интеллектом, с одной стороны, позволяют отслеживать и предупреждать террористические атаки, но с другой – способствуют технической оснащенности террористов, обеспечивают кибератаки, покушения на систему информационной безопасности.

5. Расширяющееся применение искусственного интеллекта имеет самую непосредственную связь с одной из новейших глобальных проблем – проблемой «информационного перегрева». Суть проблемы в том, что количество информации, которую необходимо усвоить и переработать специалисту при переходе через определенную границу меры, становится неодолимой для этого специалиста. Отсюда информация перестает быть таковой, становится «информационным шумом». Далее количество информации перерастает еще одну количественную границу, за которой с ней не могут справиться и компьютерные системы. Такие информационные потоки невозможно отфильтровать, редуцировать и вообще обработать любым имеющимся способом. При этом возникает проблема информационного обеспечения всех сфер деятельности человека.

Итак, искусственный интеллект принципиально отличается от естественного тем, что оперирует не понятиями, а символами понятий, моделируя формально-логические связи и отношения между понятиями.

Как и любая техника, искусственный интеллект не выступает причиной или источником негативных социальных последствий его применения в человеческой деятельности. Напротив, использование искусственного интеллекта позволяет решить многие глобальные проблемы современности, кроме тех, которые требуют изменения фундаментальных экономических отношений между людьми.

**Список используемых источников**

1. *Даль В.* Толковый словарь живого великорусского языка: в 4 т. – М.: Русский язык, 1989. – Т. 2. – С. 46.
2. *Ильенков Э.В.* Диалектика идеального // *Логос.* – 2009. – № 1.
3. *Интеллект: новая философская энциклопедия.* – М.: Мысль, 2010. – Т. 2. – С. 127.
4. *Огородников В.П., Кужескин Н.С., Репях Н.А.* История и философия науки / под ред. В.П. Огородникова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2020. – 316 с.
5. *Мещеряков А.И.* Слепоглухонемые дети. Развитие психики в процессе формирования поведения. – М.: Педагогика, 1974. – 326 с.
6. *Ньюэлл А., Шоу Дж. С., Саймон Г.* Моделирование мышления человека с помощью электронно-вычислительной машины // *Психология мышления* / под ред. Ю.Б. Гиппенрейтер [и др.]. – М.: Астрель, 2008. – С. 115–139.
7. *Огородников В.П.* Логика. Законы и принципы правильного мышления. – СПб.: Питер, 2004. – 275 с.
8. *Фирсов Л.А., Чиженков А.М.* Эволюция интеллекта (Присущ ли разум животным?). – СПб.: Астер-Х, 2004, – 124 с.
9. *Фирсов Л.А.* Память у антропоидов. – Л.: Наука, 1972. – 230 с.
10. *Маркс К., Энгельс Ф.* Роль труда в процессе превращения обезьяны в человека: соч. – 2-е изд. – М., 1961. – Т. 20.



Н.А. Репях,  
кандидат философских наук, доцент;  
А.Н. Хрустова

## ВОЗЗРЕНИЯ А.Л. ЧИЖЕВСКОГО В ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ ФИЛОСОФИИ РУССКОГО КОСМИЗМА

В статье рассматриваются космофилософские идеи основоположника отечественной космобиологии и гелиобиологии Александра Леонидовича Чижевского, оказавшие существенное влияние на формирование естественнонаучного направления философии русского космизма.

Ключевые слова: космизм, наука, дифференциация и интеграция наук, космическое пространство, среда, живой организм, космическая энергия, солнцедательность.

Ценным методологическим ориентиром необходимости обращения к истокам философии русского космизма выступает позиция выдающегося отечественного ученого В.И. Вернадского. Он писал, что наука, двигаясь вперед, не только создает новое, а неизбежно переоценивает пережитое. Знание прошлого необходимо для понимания настоящего и вечного, «непреходящего». Эти слова актуальны в решении задач переосмысления содержания идей философии русского космизма, являющихся живыми и плодотворными и сегодня. Еще более важной в этом плане выступает необходимость именно объективной оценки, а порой и переоценки многих представителей отечественной космофилософской концепции. Новизна и значимость их идей несомненна для своего времени, созвучна она и современной, полной динамизма и противоречивости эпохе. Особое место среди мыслителей-космистов прошлого по праву занимает Александр Леонидович Чижевский – ученый-энциклопедист, глубокий философ, талантливый поэт, музыкант, художник, основоположник отечественной космической биологии, гелиобиологии и аэроионификации [1].

Как известно, в философии русского космизма сформировалось несколько относительно самостоятельных направлений (разновидностей), которые развивались профессиональными философами, учеными-естествоиспытателями, писателями, поэтами, художниками и т. д. [2]. А.Л. Чижевского исследователи его творчества относят к естественнонаучному направлению, в рамках которого он развивал так называемый «энергетический космизм».

Научная деятельность Чижевского представляет нам наглядный пример непростой, а порой и полной трагизма судьбы творца. Александр Леонидович в предисловии к книге «Земное эхо солнечных бурь» пишет, что новые идеи как «капли мысли» в океане недоброжелательства и противодействия с невероятным трудом проникают в сознание даже наиболее передовых ученых. Нужны десятилетия и даже столетия, как отмечает мыслитель, чтобы убедить человечество и преодолеть безразличие.

Жизнь ученого богата трагическими событиями, переполнена конфликтами, имеющими как внутренние, так и внешние проявления. Как и любой другой человек, Чижевский искренне желал обычного человеческого счастья и благополучия. Однако у него это всегда находилось в острой борьбе с беспощадной творческой страстью, побеждающей личные стремления к спокойной жизни.

Ему было чрезвычайно трудно, а порой и невыносимо переживать не просто отсутствие достойной оценки результатов своего труда, а их огульную критику. К тому же, когда в адрес ученого звучали грубые обвинения в фальсификации научных исследований, доходящие до признания некомпетентности, а то и вовсе научной безграмотности, наступали периоды отчаяния и безысходности.

Детство и юность Александра Леонидовича Чижевского прошли в обстановке увлеченности естественными науками, живописью, классической литературой и историей. Отец принадлежал к поколению высокообразованных офицеров русского общества XIX века. Он приобрел известность изобретением командирского угломера с закрытых позиций и прибора для разрушения проволочных заграждений. Несмотря на раннюю смерть мамы (мальчик был еще в младенческом возрасте), детство Александра Леонидовича прошло в атмосфере семейного благополучия и любви – воспитанием занимались бабушка и тетя.

Интеллектуальная одаренность А.Л. Чижевского обнаружилась уже во время учебы в гимназии, в Коммерческом и Археологическом институтах в Москве. Сфера его интересов и исследований в это время весьма разносторонняя – от солнечной активности до русской лирики и исторических событий.

В Первую мировую войну А.Л. Чижевский ушел на фронт добровольцем. Участие во многих боях, проявленные при этом храбрость и отвага были отмечены Георгиевским крестом. Александр Леонидович, защитив диссертацию в 21 год, получил звание ученого-археолога. Чтение им курсов лекций сопровождалось учебой у выдающихся физиков, химиков и биологов Московского университета.

Постепенно биология заполняет всё пространство интересов Чижевского, и ученый, обладая энциклопедическими знаниями, становится главным экспертом по вопросам медицины и биологии в Институте биологической физики Наркомздрава РСФСР, возглавляет Центральную лабораторию ионизации.

По ложному обвинению Чижевского осудили. Однако эти сложные критические обстоятельства жизни не сломили ученого. В лагере и ссылке он продолжал заниматься научными исследованиями, даже создал кабинет аэроионизации.

После реабилитации А.Л. Чижевский, являясь чрезвычайно разносторонним человеком, продолжал свои изыскания и вплоть до самой смерти консультировал по вопросам аэроионотерапии. О незаурядности этого замечательного русского ученого свидетельствуют такие факты: международный конгресс биофизиков в Нью-Йорке в 1939 году выдвинул Чижевского кандидатом на Нобелевскую премию и назвал его Леонардо де Винчи XX века; 1997 год был объявлен ЮНЕСКО «Годом Чижевского», а в Сорбонне среди барельефов великих ученых помещен барельеф Чижевского; имя Александра Леонидовича Чижевского внесено в энциклопедию «Великие люди мира».

Ядром космической философии Чижевского выступает признание единства человека и космоса, космической природы человека и его безграничных возможностей.

«Не Земля, а космические просторы, – заявляет философ, – становятся нашей Родиной...». Этот основополагающий тезис теоретических изысканий выводит его на уровень космофилософских обобщений. Ученый конкретизирует, что в науках о природе идея связанности всех явлений в мире, их единство, чувство мира как неделимого целого достигли определенной ясности и глубины. Чижевский делает вывод, что мы наконец-то научились понимать «связность и общность разрозненных явлений и представлять их в единой синтетической картине жизни солнечно-земного мира».

Идея о существовании единства мироздания находит, по Чижевскому, свое подтверждение уже на уровне элементарных частиц и во всей Вселенной, для всех их форм действует единый закон. А.Л. Чижевский отмечает, что один и тот же принцип, создающий мир, с той же последовательностью проявляется в самых удаленных участках Вселенной. Таким образом, утверждается «единство образующего физического закона во всей вселенной» [4].

Каковы аргументы Чижевского? Чем доказывается единство? Словами ученого, мира астрономических и мира биологических явлений?

Прежде всего, по мнению Чижевского, к «первоначальным порывам грандиозных обобщений будущего» человечество пришло через веру, а также накопление наблюдений «огромной важности», продолжавшееся много тысячелетий.

Чижевский убежден, что ученые-естествоиспытатели изучали жизнь биологических объектов до недавнего времени автономно, независимо от «внешних сил мира». Эта особенность отражалась на их суждениях и выводах. Однако наука, призывает Александр Леонидович, должна быть независимой от предвзятых представлений, идти новым путем исследования и борьбы с косными традициями, чтобы приблизиться к истине «во имя свободного изучения природы» [4].

Существующее предположение о независимости органического мира, всего живого от природы рушится, пишет Чижевский, когда какие-либо стихийные и мировые катаклизмы «разражаются над живым». И тогда человек начинает осознавать свою физическую организацию, ее ничтожество перед силами природы.

Неуловимые и невидимые связи связывают живое со всей окружающей природой, убежден ученый. Наиболее явно они уже выявляются на клеточном уровне. Чижевский отмечает, что живая клетка в себе регистрирует «все явления мира», отвечая соответствующими реакциями, тем самым выступая наиболее чувствительным аппаратом.

Живой организм необходимо изучать в связи с окружающей средой, называемой Чижевским «космотеллурической». Большинство физических и химических процессов, которые происходят в окружающей среде, как считает ученый, отражаются на физико-химических и физиологических изменениях живого организма, влияют определенным образом не только на его сердечно-сосудистую и нервную деятельность, но и на психику и поведение [4].

Ученый указывает на основные взаимодействующие силы, которые «исходят из космического пространства» – силы тяготения, планеты в Солнечной системе, их положение, влияющие на распределение и напряженность электрических и магнитных сил Земли, и особенно ионизирующее излучение, связывающие поверхность Земли с космической средой.

Помимо электрических колебаний потоки электронов и ионов несут огромные запасы космической энергии, эти мельчайшие частицы диссоциированной материи устремляются к Земле.

Выдвинутые доказательства позволяют А.Л. Чижевскому сделать вывод, что физико-химические процессы, происходящие на Земле, являются результатом воздействия космических сил. Они, в свою очередь, обуславливают жизненные процессы в биосфере, которую следует рассматривать «местом трансформации космической энергии».

Таким образом, Чижевский расширяет и само понятие «среда», наполняет более глубоким содержанием, раздвигает его рамки. Среда, по мнению ученого, включает не только биосферу и околоземное пространство как область ее существования, но и весь космос со всем богатством составляющих его явлений и процессов.

Особую роль, по мнению Чижевского, играет в жизни человечества, да и всего живого, Солнце. Оно оказывает свое воздействие не только посредством фотосинтеза или термических явлений, но и выступает главнейшим источником энергии, непосредственно влияя на всё живое своими энергетическими излучениями [3].

Изучение явлений, происходящих одновременно в больших масштабах, помогли А.Л. Чижевскому выявить определенные закономерности, что, в свою очередь, поставило, по его мнению, задачу выяснения причин, их вызывающих. Так, статистические исследования корреляционной зависимости разных феноменов «в больших массах» и космических факторов позволили Чижевскому сделать вывод, что в те временные периоды, когда повышается электромагнитная и радиоактивная деятельность Солнца, число массовых феноменов (заболевания, смертность от разных причин и др.) на Земле также увеличивается, причем это происходит в различных странах и на разных материках.

Указывая на детерминированность земных «феноменов» солнечными, Чижевский отмечает, что сама Солнечная система является частью Вселенной, у которой есть своя жизнь, «свой пульс, свои периоды и ритмы». И в будущем наука призвана, считает ученый, «решить вопрос, где зарождаются и откуда исходят эти ритмы».

Чижевский называет землян «детьми Солнца», которые со всех сторон окружены космической энергией, а ее потоки «притекают к нам от далеких туманностей, звезд, метеорных потоков и Солнца».

Ученый считает происхождение жизни на нашей планете в большей степени явлением не земным, а космическим. Кроме того, как оценивает Чижевский, взгляды на жизнь не могут быть исключительно результатом только земных сил и полагать иначе – это «грубый и узкий антифилософский взгляд». Жизнь, как пишет ученый, создана воздействием на инертный материал Земли творческой динамики космоса, и «биение органического пульса согласовано с биением космического сердца – этой грандиозной совокупности туманностей, звезд, Солнца, планет» [4].

Следует отметить, что признание причинной обусловленности жизни человека жизнедеятельностью Вселенной утверждается Чижевским с исключительной жесткостью и без всяких модификаций. Признание такой последовательности и причинной обусловленности приводит ученого в конечном итоге к пандетерминизму.

Всё живое на Земле – человек, животные, микроорганизмы и растения – ощущает на себе воздействие Солнца. Это следует понимать и учитывать при возникновении эпидемических заболеваний, человеческой патологии, смертности, убежден Чижевский. Ученый проводит исследование большого массива статистических данных и делает важные выводы о соотношении между ходом солнцедательности и эпидемиями гриппа, холеры, тифа, дифтерии, чумы, менингита, полиомиелита и др. Он обнаруживает связь между периодичностью эпидемий, амплитудой их колебаний и одиннадцатилетним циклом деятельности Солнца. Исследовать ход и развитие эпидемических заболеваний, считает он, необходимо не только в области социума, но и рассматривать комплекс всех возможных факторов в целом, в том числе влияние и физико-химической среды. При этом следует иметь в виду, что Чижевский никогда не называл активность Солнца в качестве причины эпидемий. Более того, ученый отмечал, что заключение такого рода абсолютно неверно и ошибочно, а солнечная активность лишь содействует интенсивности различных эпидемий. Другими словами, Солнце регулирует в определенной степени распространение, интенсивность и временные рамки эпидемии [5].

Гипотеза о влиянии солнцедательности на массовые заболевания людей распространяется Чижевским и на жизнь социума. Он считает, что периоды «социального беспокойства» и даже глубоких исторических потрясений также связаны с деятельностью Солнца.

В трудах А.Л. Чижевского значительное место занимают гносеологические проблемы, особенно процессы дифференциации и интеграции наук. Уже сама научная деятельность Чижевского, стремление к углублению познания, освоению новых областей реальности является демонстрацией процессов дифференциации наук. В его научных исследованиях тесно связаны, с одной стороны, общая биология, физиология и медицина, а с другой – геофизика, метеорология и астрономия. Александр Леонидович – создатель теории и практики аэроионификации, основ гелио- и космобиологии. И, как известно, дальнейшее развитие последней привело к появлению космомикробиологии, космоэпидемиологии, биоорганоритмологии, динамической биоэлектростатики.

Наряду с дифференциацией наук А.Л. Чижевский отмечает интенсивное проявление интегративной тенденции в области наук о природе – синтетическое объединение ряда различных наук и использование методов одних наук к другим. В этом, на первый взгляд, лаконичном тезисе следует вычленить два аспекта. Первый – указывает на взаимодействие, взаимопроникновение методов научного познания. Второй – выражает синтез знаний, обусловленных потребностью развития научного знания.

Сформулированная Чижевским тенденция на современном этапе развития науки проявилась в формировании в научных исследованиях комплексного метода, который выступил результатом не просто объединения методов различных наук, а их синтеза, формирования своеобразной целостности в процессе познания окружающего мира. При этом нельзя не от-

метить и тот факт, что синтез результатов различных способов освоения мира – научного, философского, эстетического – всегда выступал характерной особенностью мировоззрения Чижевского.

Особое место в научных исследованиях А.Л. Чижевского занимает эксперимент. Он делает вывод, что именно экспериментальные доказательства в значительной степени привели к новым взглядам на мир и место в нем человека, а также позволили предпринять новые исследования о непосредственном влиянии энергетических космических излучений на человеческий организм.

В трудах Чижевского существенная роль отводится творческой интуиции, он по праву считается одним из создателей теории образа как способа познания.

Многие идеи А.Л. Чижевского нашли воплощение в повседневной жизни людей. Широкое использование получила «лампа Чижевского». С разрешения Всемирной организации здравоохранения более чем в 60 странах мира в соответствии с технологиями Чижевского проводится обработка продуктов питания ионизирующим излучением. Такая обработка эффективна и безопасна.

В условиях очередного вызова, с которым столкнулось всё человечество, с возникновением пандемии актуализировался интерес к идеям А.Л. Чижевского о связи жизнедеятельности людей и окружающей среды и прежде всего с его взглядом на осуществление гелиобиологических прогнозов и определение соответствующих профилактических мер.

Но особую значимость имеют мировоззренческие идеи Чижевского, опередившие на многие десятилетия свое время. Они требуют от человечества с неизбежностью научиться думать по-новому, жить по-новому, творить по-новому в «колыбели жизни», как назвал нашу планету выдающийся отечественный мыслитель.

#### Список используемых источников

1. История космофилософских идей // Философские проблемы освоения космоса: материалы историко-философских чтений / сост. Ю.Н. Антонов, Н.В. Ершов. – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 1995. – С. 205–214.
2. Кужекин Н.С., Репях Н.А., Хрустова А.Н. Идеи русского космизма в сочинениях А.В. Сухова-Кобылина // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – Вып. 668. – С. 407–411.
3. Русский космизм: Антология философской мысли / сост. С.Г. Семенов, А.Г. Гачевой. – М: Педагогика-Пресс, 1993. – 368 с.
4. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. – М.: Мысль, 1973. – 350 с.
5. Чижевский А.Л. Эпидемические катастрофы и периодическая деятельность Солнца. – М., 1930. – 189 с.

А.И. Авсеенко,  
кандидат техн. наук, доцент;  
С.А. Дорофеев,  
кандидат техн. наук, доцент  
Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Калининград;  
Р.И. Ковалевский,  
Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Калининград

## ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Рассматривается подход к определению показателя эффективности, характеризующего реализацию управленческих решений, и показателя, характеризующего качественный состав основного оборудования объекта для планирования организационных и технологических решений, обеспечивающих снижение электропотребления и реализацию рассчитанного в рамках процедуры потенцирования потенциала энергосбережения.

Ключевые слова: техноценоз, потенциал энергосбережения, динамические свойства потенциала энергосбережения, доверительный интервал, показатель эффективности объекта, искусственная нейронная сеть, метод обратного распространения ошибки, ассоциативный элемент, весовой коэффициент.

В современном мире экономия энергоресурсов является актуальной проблемой. В экономически развитых странах проводятся научные конференции, международные форумы, разрабатываются и реализуются целевые программы по снижению количества энергопотребления.

Одним из методов оценки возможной величины снижения электропотребления является техноценологический подход, основанный на понятии техноценоза, теории делимых устойчивых безгранично делимых гиперболических распределений и ранговом анализе [1]. В развитии вышеуказанного подхода коллективом ученых под руководством профессора В.И. Гнатюка создана методика оптимального управления электропотреблением, включающая процедуру оценки потенциала энергосбережения – потенцирование [1–3]. Под потенциалом энергосбережения понимается величина возможного на данном временном интервале уровня уменьшения электропотребления техноценоза без ущерба нормальному функционированию его объектов (рис. 1).

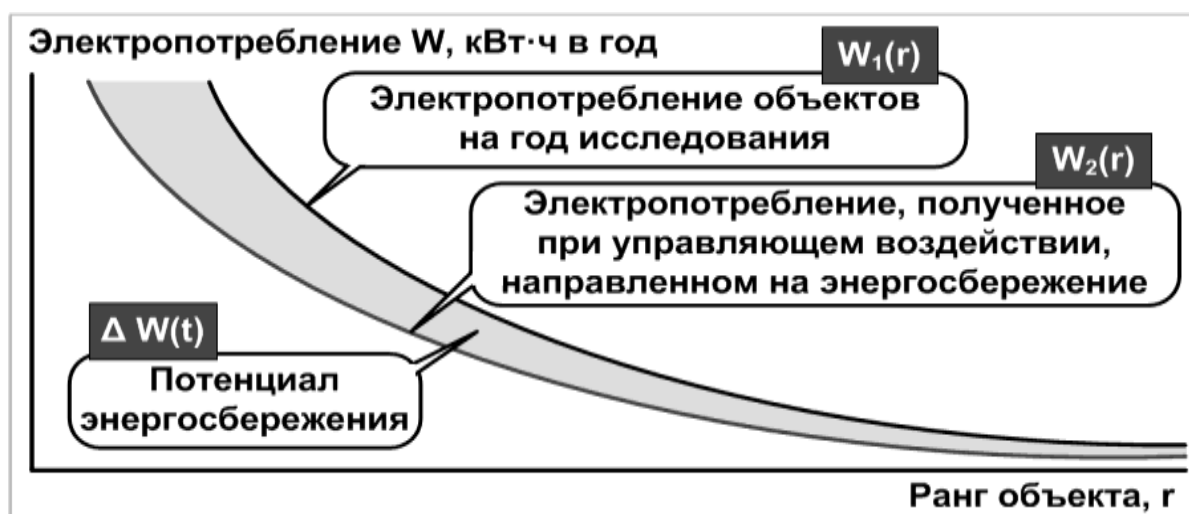


Рис 1. Потенциал энергосбережения техноценоза

В общем виде потенциал энергосбережения рассчитывается по выражению [1]

$$\Delta W_t = \int_0^{\infty} W_1(r) dr - \int_0^{\infty} W_2(r) dr. \quad (1)$$

Процедура потенцирования предусматривает выполнение трехэтапной оценки потенциала энергосбережения [1–3]:

первый этап – формирование оценки Z1 (системный потенциал) – отражает системные ограничения по электропотреблению;

второй этап – формирование оценки Z2 (объектный потенциал) – отражает характеристики лучших организационных и технологических решений, доступных для техноценоза;

третий этап – формирование оценки Z3 (нормированный потенциал) – отражает применение технологических решений по повышению энергоэффективности уровня лучших мировых технологий (рис. 2).

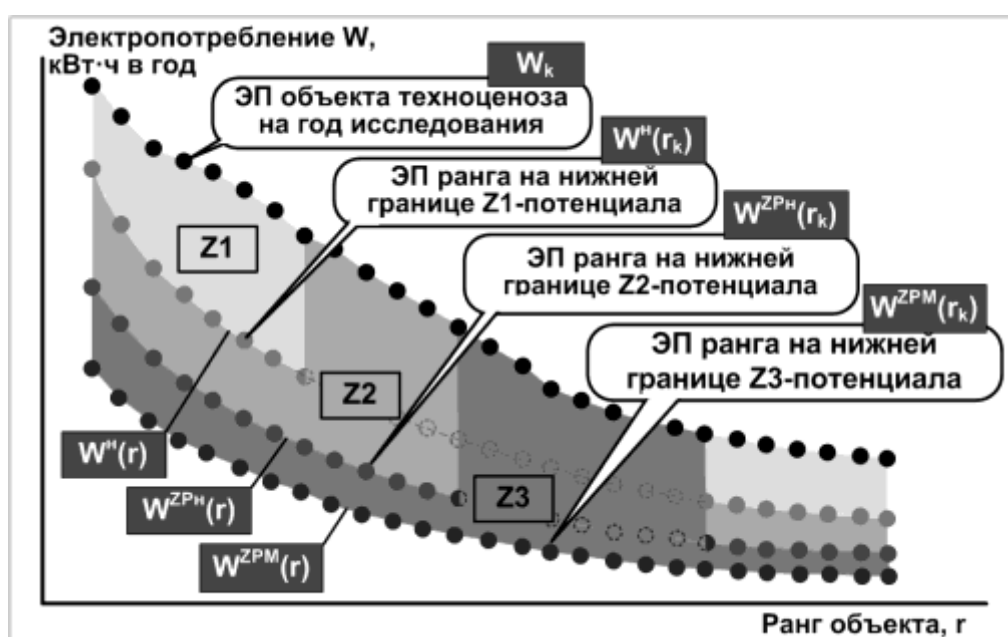


Рис. 2. Уровни потенциала энергосбережения техноценоза

На рис. 2 введены следующие обозначения:  $W^H(r)$  – нижняя граница переменного доверительного интервала;  $W^{ZPH}(r)$  – нижняя граница интервала ZP;  $W^{ZPM}(r)$  – нижняя граница интервала ZPM.

Для рассматриваемого техноценоза Z1-потенциал (первый уровень) соответствует нижней границе доверительного интервала (переменного), полученного при выполнении процедуры интервального оценивания. Z2-потенциал (второй уровень) соответствует нижней границе переменного доверительного интервала, полученного при выполнении процедуры интервального оценивания с учетом результатов выполнения ZP-нормирования, которое предусматривает учет изменения уровня электропотребления объектов внутри функциональных групп на основе лучших графиков нагрузок и значений электропотребления [1]. Z3-потенциал (третий уровень), получаемый, как и Z2-потенциал, при выполнении процедуры ZP-нормирования, но в этом случае возможность снижения электропотребления учитывается внутри функциональных групп по методикам энергосбережения лучших мировых технологий [4].

На уровень электропотребления и, соответственно, потенциал энергосбережения оказывают влияние эффективность управленческих решений, качественный состав основного оборудования, климатические условия. Таким образом, величина электропотребления объекта будет зависеть от следующих показателей:

$$W_k(t) = f(C_k(t), AL_k(t), T(t)), \quad (2)$$

- где  $W_k(t)$  – текущая величина электропотребления для  $k$ -го объекта за временной интервал  $t$ ;
- $C_k(t)$  – характеристика эффективности применения управленческих решений по энергосбережению для  $k$ -го объекта за временной интервал  $t$ ;
- $AL_k(t)$  – перечень основного энергопотребляющего оборудования на  $k$ -м объекте за временной интервал  $t$ ;
- $T(t)$  – климатические условия, в которых функционирует объект исследования.

Очевидно, что климатические условия можно отнести к категории нерегулируемых, но их влияние отражается на электропотреблении объекта, поэтому величина потенциального энергосбережения в конечном итоге будет зависеть от уровня электропотребления, характеристик эффективности реализации управленческих решений и энергосберегающих характеристик основного оборудования:

$$\Delta W_k(t) = f(W_k(t), C_k(t), AL_k(t)), \quad (3)$$

где  $\Delta W_k(t)$  – возможная величина энергосбережения на  $k$ -м объекте за временной интервал  $t$ .

Характеристика эффективности реализации управленческих решений, направленных на повышение уровня энергосбережения на объекте за оцениваемый временной интервал, в свою очередь, является комплексной величиной и зависит от следующих параметров:

$$C_k(t) = f(X_{C_{k1}}, X_{C_{k2}}, X_{C_{k3}}), \quad (4)$$

- где  $X_{C_{k1}}$  – актуальность разработанных руководящих документов, регламентирующих экономию электроэнергии (приказы, методические указания, инструкции и т.д.), и эффективность их внедрения;
- $X_{C_{k2}}$  – уровень квалификации и подготовки персонала, эксплуатирующего электрооборудование;
- $X_{C_{k3}}$  – степень автоматизации технологических процессов на объекте.

Показатель, характеризующий качественный состав основного оборудования на объекте также является комплексной величиной и зависит от следующих параметров:

$$AL_k(t) = f(X_{AL_{k1}}, X_{AL_{k2}}, X_{AL_{k3}}), \quad (5)$$

- где  $X_{AL_{k1}}$  – оптимальность номенклатурного состава используемого электрооборудования;
- $X_{AL_{k2}}$  – оптимальность выбора режима эксплуатации электрооборудования;
- $X_{AL_{k3}}$  – критерий, характеризующий оптимальный удельный расход электроэнергии на единицу произведенной продукции (выполнение задачи согласно предназначению).

Необходимо учитывать, что степень влияния вышеперечисленных параметров с учетом взаимовлияния друг на друга, на соответствующий показатель для каждого объекта разная. В соответствии с этим при анализе характеристик реализации эффективности внедрения



управленческих решений и качественного состава основного применяемого оборудования необходимо вычислить весовые коэффициенты параметров формируемых функций.

Одним из подходов к определению весовых коэффициентов является использование искусственной нейронной сети методом обратного распространения ошибки. Использование данного метода позволит взвешенно подобрать весовые коэффициенты для входных параметров, которым будет соответствовать требуемое значение выходного значения – показателя эффективности. При этом в процессе подбора нейронная сеть будет учитывать вес каждого параметра и производить на каждом этапе работы вычисление ошибки независимо от различных систем измерения величин этих параметров.

Структура нейронной сети для определения весовых коэффициентов характеристик реализации эффективности внедрения управленческих решений показана на рис. 3.

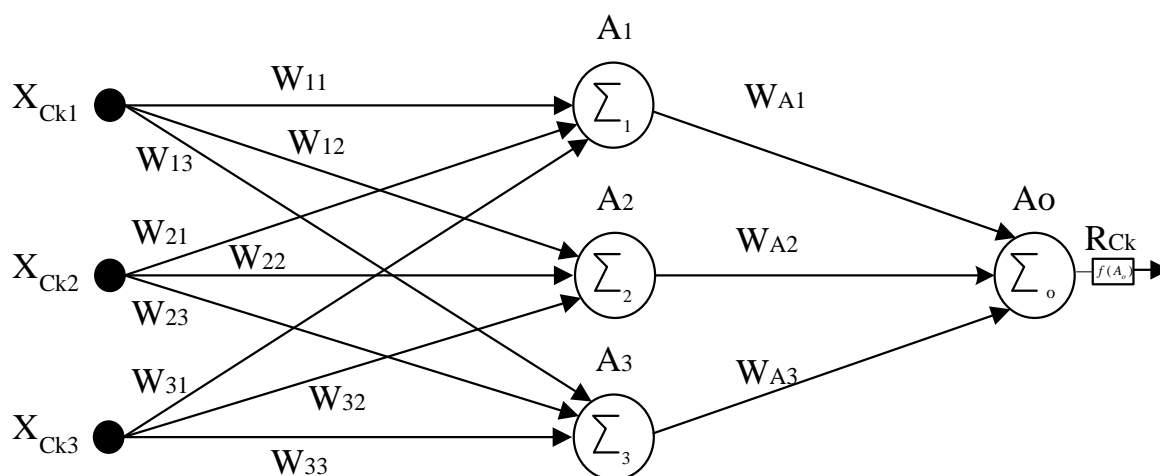


Рис. 3 Схема нейронной сети для оценки характеристик реализации эффективности внедрения на объекте управленческих решений

На рисунке введены следующие обозначения:  $W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{21}, W_{22}, W_{23}, W_{31}, W_{32}, W_{33}$  – весовые коэффициенты параметров;  $A_1, A_2, A_3, A_0$  – ассоциативные А-элементы;  $W_{A1}, W_{A2}, W_{A3}$  – весовые коэффициенты, полученные в результате обработки информации ассоциативными элементами;  $R_{C_k}$  – R-элемент, формирующий сигнал реакции сети на входные значения параметров.

Рассматриваемая нейронная сеть (рис. 3) включает: параметры показателя эффективности (входные параметры), ассоциативные или А-элементы, выполняющие нелинейную обработку информации, и R-элемент, формирующий значение весовых коэффициентов характеристик эффективности реализации на объекте за необходимый временной интервал анализируемых управленческих решений.

Этапы определения весовых коэффициентов характеристик эффективности внедрения на объекте управленческих решений, которые характеризуют качественный состав основного оборудования при помощи искусственной нейронной сети методом обратного распространения ошибки, представлены на рис. 4.

На предварительном этапе на основе предположительной степени влияния каждого входного параметра на электропотребление рассматриваемого объекта задаются начальные весовые коэффициенты, варианты входных параметров и ожидаемый результат реакции сети на них, которые являются тренировочным сетом нейронной сети.



Рис. 4. Этапы определения показателей эффективности при помощи искусственной нейронной сети для реализации потенциала энергосбережения

Процедура вычислений (рис. 4) начинается с настройки нейронной сети (см. рис. 3) и будет осуществляться по всем вариантам тренировочного сета:

- при всех входных параметрах, равных единице, выходное значение равно единице;
- при двух входных параметрах из трех, равных единице, выходное значение будет стремиться к единице;
- при одном входном параметре из трех, равном единице, выходное значение стремится к нулю;
- при всех входных параметрах, равных нулю, выходное значение равно нулю.

Выполнение одного полного тренировочного сета осуществляется пошагово и называется эпохой настройки нейронной сети.

Для настройки нейронной сети на каждом шаге определяется значение ассоциативного A-элемента [5–7]:

$$A_i = \sum X_{C_{ki}} \cdot W_{ij}, \quad (6)$$

- где
- $A_i$  – ассоциативные A-элементы искусственной нейронной сети, где  $i$  – номер A-элемента;
  - $X_{C_{ki}}$  – входной параметр весовых коэффициентов характеристик эффективности внедрения на объекте управленческих решений, где  $i$  – номер параметра;
  - $W_{ij}$  – весовой коэффициент входного параметра, где  $i$  – номер параметра,  $j$  – номер весового коэффициента параметра.

Далее рассчитываем значение суммирующего ассоциативного  $A_o$  – элемента искусственной нейронной сети по выражению

$$A_o = A_1 W_{A1} + A_2 W_{A2} + A_3 W_{A3}. \quad (7)$$

Зависимость сигнала реакции искусственной нейронной сети от суммирующего ассоциативного элемента описывается сигмоидальной функцией (рис. 5) и определяется по выражению [7]

$$R_{C_k} = f(A_o) = \frac{1}{1 + e^{-A_o}}. \quad (8)$$

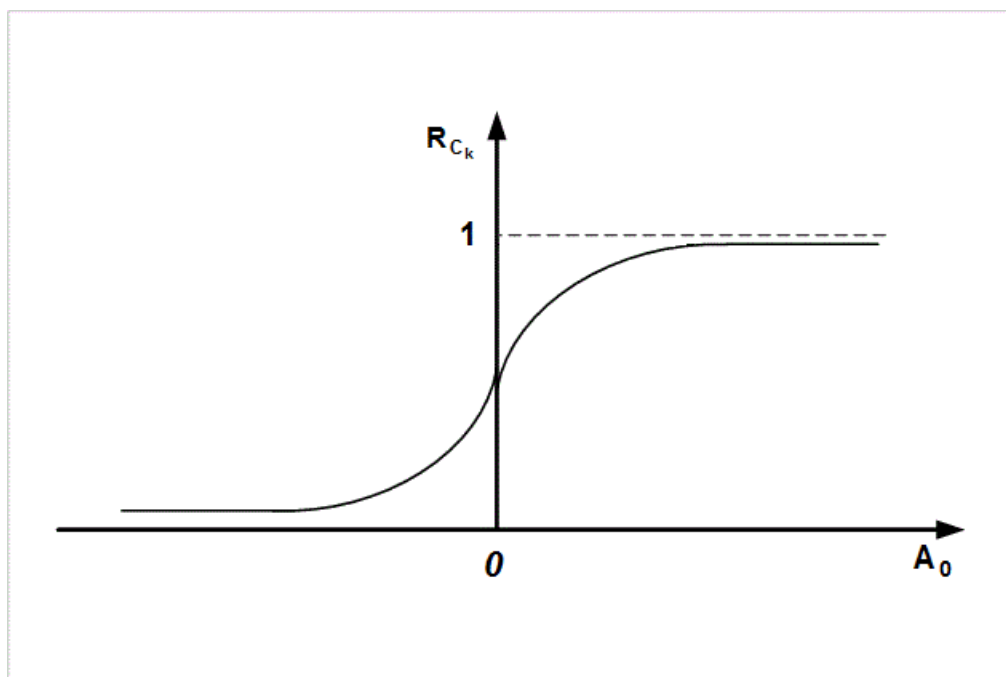


Рис. 5. Зависимость формируемого сигнала реакции искусственной нейронной сети от полученного значения суммирующего ассоциативного элемента

Полученное значение  $R$ -элемента сравниваем с заданным ожидаемым результатом показателя эффективности по выражению

$$e_{R_{C_k}} = R_{C_k^o} - R_{C_k}, \quad (9)$$

где  $e_{R_{C_k}}$  – значения общей ошибки расчета нейронной сети;

$R_{C_k^o}$  – ожидаемое значение весовых коэффициентов характеристик эффективности внедрения на объекте управленческих решений.

С учетом того, что ожидаемое значение показателя эффективности при первой итерации должно стремиться к единице ( $R_{C_{k0}} \rightarrow 1$ ) при  $A_o \rightarrow \infty$ , что соответствует входным параметрам нейронной сети, при которых значение потенциала энергосбережения будет стремиться к рассчитанному по выражению (1), значение общей ошибки первого этапа расчета нейронной сети определяется по формуле

$$e_{R_{C_k}} = 1 - R_{C_k}. \quad (10)$$

Ошибка каждого ассоциативного  $A$ -элемента определяется по выражению

$$e_{A_i} = e_{R_{C_k}} \times W_{A_j}, \quad (11)$$

где  $e_{A_i}$  – ошибка измерений для каждого ассоциативного  $A_i$ -элемента;  
 $W_{A_j}$  – весовые коэффициенты, полученные в результате обработки информации ассоциативными  $A_i$ -элементами, где  $j$  – номер весового коэффициента.

Далее пересчитываем значения весовых коэффициентов для входных параметров с учетом ошибок, полученных при первой итерации, по выражению [8]

$$W_{ij}^{n+1} = W_{ij} + l_{rate} \cdot e_{A_i} \cdot \frac{dR_{C_k}}{dA_i} \cdot X_{C_{ki}}, \quad (12)$$

где  $W_{ij}^{n+1}$  – значение весового коэффициента с учетом ошибки предыдущего ( $n$ -го) цикла вычислений, где  $i$  – номер параметра,  $j$  – номер весового коэффициента;  
 $l_{rate}$  – коэффициент, характеризующий скорость обучения нейронной сети, для определения оптимального количества циклов вычислений;  
 $dR_{C_k}/dA_i$  – производная от функции каждого  $A$ -элемента (скорость изменения функции).

Значения весовых коэффициентов, полученных в результате обработки информации ассоциативными  $A_i$ -элементами, определяются по выражению [8]

$$W_{A_j}^{n+1} = W_{A_j} + l_{rate} \cdot e_{R_{C_k}} \cdot \frac{dR_{C_k}}{dA_o} \cdot X_{C_{ki}}; \quad (13)$$

где  $W_{A_j}^{n+1}$  – значение весового коэффициента, с учетом ошибки предыдущего ( $n$ -го) цикла вычислений,  $j$  – номер весового коэффициента;  
 $dR_{C_k}/dA_o$  – производная от функции  $A_o$ -элемента (скорость изменения функции).

Производная для каждого  $A$ -элемента рассчитывается по выражению [7]

$$\frac{dR_{C_k}}{dA_i} = \frac{1}{1 + e^{-A_i}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-A_i}}\right). \quad (14)$$

Этап настройки искусственной нейронной сети будет продолжаться до получения значений  $R$ -элемента, близкого к 1, при котором фиксируются значения полученных весовых коэффициентов для дальнейшей работы нейронной сети на последующих этапах расчета.

На втором этапе рассчитывается значение фактического показателя эффективности. Для этого в настроенную нейронную сеть подставляются предварительно полученные при оценке объекта входные параметры. На основании рассчитанного показателя эффективности определяется возможная величина улучшений входных параметров для получения показателя эффективности, при котором будет реализован потенциал энергосбережения объекта.

На третьем этапе в настроенную нейронную сеть подставляются возможные значения входных параметров, т. е. требуемые параметры для определения максимально возможного значения показателя эффективности, доступного для объекта с учетом его организационных и технологических решений, направленных на реализацию потенциала энергосбережения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для планирования реализации рассчитанного в рамках процедуры потенцирования потенциала энергосбережения использование искусственной нейронной сети методом обратного распространения ошибки позволит выполнить следующее:

– определить для каждого объекта весовые коэффициенты параметров, влияющих на показатели характеристик эффективности внедрения управленческих решений и качественного состава основного оборудования;

– рассчитать значения входных параметров для требуемых характеристик эффективности внедрения управленческих решений и качественного состава основного оборудования;

– создать базу данных характеристик эффективности внедрения управленческих решений и качественного состава основного оборудования объектов, что позволит повысить точность прогнозирования их электропотребления.

## Список используемых источников

1. *Гнатюк В.И.* Закон оптимального построения техноценозов: монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Калининград: КИЦ «Техноценоз», 2014. – URL: <http://gnatukvi.ru/ind.html>, (дата обращения: 13.08.2020).

2. *Авсеенко А.И., С.А. Дорофеев, О.Р. Кивчун* Концептуальная модель управления электропотреблением на основе оценки потенциала энергосбережения с учетом динамики факторов, влияющих на электропотребление // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 98–104.

3. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. – 2 изд. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.

4. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

5. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника. – М.: Мир, 1992. – 184 с.

6. Нейронная сеть – обучение ИНС с помощью алгоритма обратного распространения. – URL: <http://robocraft.ru/blog/algorithm/560.html> (дата обращения: 04.11.2020).

7. Прогнозирование электропотребления промышленных предприятий с помощью искусственных нейронных сетей: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Воронова И.В. – URL: <https://dlib.rsl.ru/viewer/01004609495#?page=1> (дата обращения: 09.11.2020).

8. *Головачев С.С.* Прогнозирование доходности на фондовом и валютном рынках на основе моделей искусственных нейронных сетей: дисс. ... канд. эконом. наук. – URL: <https://www.hse.ru/data/2014/06/05/1323456130/Golovachev-Thesis%23Revised.pdf> (дата обращения: 09.11.2020).

И.В. Гончаров,  
*кандидат техн. наук;*  
А.В. Новиков,  
*кандидат техн. наук;*  
А.С. Тимощук,  
*кандидат техн. наук*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ВОДООТВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ЛАГЕРЕЙ СОЕДИНЕНИЙ И ВОИНСКИХ ЧАСТЕЙ**

В статье рассматриваются экологические решения по организации водоотведения на примере современного автономного полевого лагеря АПЛ-500, принятого на снабжение в Министерстве обороны Российской Федерации. Выполнен анализ нормативно-правовых актов в области обеспечения экологической безопасности войск в полевых условиях и, в частности, по вопросам водоотведения.

Ключевые слова: экологическая безопасность войск, полевые условия, инженерно-техническое обеспечение экологической безопасности, нормативно-правовое обеспечение экологической безопасности.

В настоящее время в Российской Федерации осуществляется масштабная работа по внедрению наилучших доступных технологий (НТД) в области охраны окружающей среды, утвержден комплекс мер по отказу от использования устаревших и неэффективных технологий [1]. Ведется такая работа и в Министерстве обороны Российской Федерации. Основную сложность в этой работе представляют передвижные военные объекты и, в частности, работы по обеспечению экологической безопасности войск в полевых условиях, когда требуется организовать удовлетворительные санитарно-гигиенические условия размещения военнослужащих, вооружения и военной техники и обеспечить соблюдение природоохранного законодательства. Это достаточно серьезная проблема, особенно при организации полевых лагерей на базе лагерей старого образца, ориентированных в основном только на выполнение норм приказа Министра обороны Российской Федерации от 1996 года № 39 «Об утверждении Правил организации размещения и быта войск при расположении в полевых условиях (лагерях)» [2], где применение этих технологий не предусмотрено. Одной из основных проблем использования устаревших образцов полевых лагерей является проблема водоотведения, связанная с тем, что сброс неочищенных хозяйственно-бытовых и ливневых сточных вод предусмотрен на рельеф, что запрещено современным законодательством. Выходом из данной ситуации является закупка и переход на полевые лагеря нового образца, где реализованы принципы НТД, или дооснащение лагерей старого образца современными системами жизнеобеспечения. На сегодняшний день в Вооруженных силах наилучшими доступными технологиями в области обеспечения экологической безопасности при организации водоотведения среди отечественных полевых лагерей обладает автономный полевой лагерь АПЛ-500, разработанный по заказу Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ) [3].

Опыт эксплуатации АПЛ-500 в войсках показал, что заложенные в нем технические решения позволяют организовать в полевых условиях комфортный быт личного состава с максимально возможным соблюдением санитарно-гигиенических норм российского законодательства.

Данный полевой лагерь представляет собой городок закрытого цикла жизнеобеспечения, оборудованный зоной санитарно-гигиенического обеспечения, объектами инженерно-технического обеспечения с автономными системами электроснабжения, водоподготовки, отвода сточных вод и жидких отходов, утилизации твердых коммунальных отходов (рис. 1).



Рис. 1. Автономный полевой лагерь АПЛ-500 [3]

Преимуществом АПЛ-500 является наличие системы очистки канализационных стоков, предназначенной для накопления и очистки сточных вод в условиях отсутствия вблизи от размещения лагеря местных стационарных систем канализации. Система состоит из приемного модуля, в котором происходит прием канализационных стоков, усреднительная очистка и подготовка к переработке (рис. 2), и модуля заключительной биоочистки, в котором происходит сепарация твердых фракций для последующего сжигания (рис. 3). Очистка осуществляется до норм сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения. Модули выполнены в контейнерном исполнении, тип контейнера 1С.



Рис. 2. Модуль приемный усреднительной очистки АПЛ-500

Несмотря на поступление в войска таких новых образцов автономных полевых лагерей, в настоящее время большинство полевых лагерей являются лагерями старых образцов, а кроме того, и ряд стационарных воинских частей или не имеет систем водоотведения, или имеет системы водоотведения, не обеспечивающие в полной мере требуемое качество очистки сточных вод. Поэтому еще предстоит большая и продолжительная работа по дооснащению

войск требуемым количеством комплектов современных полевых лагерей, а также по устройству (замене, ремонту) систем водоотведения и на других военных объектах войск (сил). Одним из решений данной проблемы может быть смешанное оснащение устаревших образцов полевых лагерей отдельно модулями систем жизнеобеспечения из комплекта АПЛ-500, что позволило бы в сжатые сроки обеспечить более комфортные условия быта личного состава в полевых условиях и значительно снизить при этом нагрузку на окружающую среду.



*Рис. 3. Модуль биоочистки и сепарации твердых фракций АПЛ-500*

Еще одним немаловажным экологическим аспектом размещения войск в полевых условиях является создание комплектов автономных полевых автопарков, ремонтных баз, полевых аэродромов, оснащенных по типу АПЛ-500 инженерно-техническими системами полного жизненного цикла, обеспечивающими в том числе и выполнение экологических требований в области водоотведения. В настоящее время для оснащения такими комплектами необходимо проведение дополнительных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в ходе которых будут разработаны технические решения с требуемыми характеристиками и мощностями инженерно-технических систем, специфика и мощности которых будут существенно отличаться от инженерно-технических систем, обеспечивающих жизнедеятельность жилого городка типа АПЛ-500 (например, системы оборотного водоснабжения автомобильной мойки в полевых условиях).

Отдельно стоит остановиться на нормативно-правовом обеспечении экологической безопасности при организации водоотведения в полевых условиях. Важным экологическим аспектом организации водоотведения в полевых условиях является ведомственное нормативно-правовое обеспечение экологической безопасности в данной области. В настоящее время основным регламентирующим нормативно-правовым документом Министерства обороны РФ в области обеспечения экологической безопасности войск в полевых условиях является приказ Министра обороны Российской Федерации 1996 года № 39 «Об утверждении Правил организации размещения и быта войск при расположении в полевых условиях (лагерях)» [2]. Безусловно, за 24 года с момента своего издания данный документ устарел и не отвечает современным реалиям и подходам к обеспечению экологической безопасности современных образцов ВВСТ, в том числе и к современному полевому лагерю АПЛ-500. Для решения данной проблемной ситуации также необходимо проведение дополнительных научно-исследовательских работ в области нормативно-методического обеспечения экологической безопасности войск в полевых условиях и издание по их результатам соответствующего приказа Министра обороны Российской Федерации.



При разработке нормативно-правовых и методических документов в области экологической безопасности размещения войск в полевых условиях и организации водоотведения, в частности, особого внимания и регламентирования требуют следующие положения:

- о порядке проведения инженерно-экологических изысканий при выборе места будущего полевого лагеря с максимальным учетом всех аспектов его строительства и эксплуатации;
- об организации разработки проекта нормативов вредных воздействий на окружающую среду при организации полевого лагеря (выбор исполнителя, оплата, сроки, порядок предоставления исходной информации и т.д.);
- о порядке оформления разрешительной природоохранной документации (например, по организации водозабора и водоотведения);
- о порядке расчета платы за негативное воздействие на окружающую среду на период строительства и эксплуатации полевого лагеря;
- по организации обеспечения экологической безопасности при строительстве полевого лагеря (подготовка подъездных путей к интенсивному трафику большегрузных автомобилей, аспекты обращения с отходами на период строительства, пути снижения неблагоприятных воздействий на рельеф);
- по организации обеспечения экологической безопасности на период эксплуатации полевого лагеря и расчету основных показателей воздействий на окружающую среду (перечень и нормы накопления отходов в полевых условиях; виды отходов, подлежащих сжиганию в специальных модулях АПЛ-500, способы обращения с остальными отходами; классы опасности отходов, образующихся при сжигании мусора и способы их утилизации; выбросы от мусоросжигательного модуля и мероприятия по их снижению; порядок размещения мусоросжигательного модуля и дизель-генераторов с учетом розы ветров для снижения воздействия их выбросов на личный состав и окружающую среду; порядок расчета необходимого количества блоков водоочистки АПЛ-500 для выполнения требований по качеству сбросов от полевого лагеря и т.д.);
- по организации обеспечения экологической безопасности при ликвидации полевого лагеря и проведении культивационных работ (перечень возможных негативных последствий эксплуатации полевого лагеря, порядок проведения обследования территории бывшего полевого лагеря, перечень мероприятий по ликвидации оставшихся загрязнений, банк технологий по очистке компонентов окружающей среды).

Разработка соответствующих нормативно-правовых и методических документов является важным шагом в области экологической безопасности размещения войск в полевых условиях.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Интенсивность боевой подготовки, масштабы и количество проводимых учений, полевых выходов, мероприятий, связанных с размещением войск в полевых условиях, имеют тенденцию к ежегодному увеличению, что приводит к росту нагрузки на окружающую среду в местах дислокации войск (сил). Наиболее серьезный вред для поверхностных и подземных вод, здоровья человека могут приносить военные объекты, на которых отсутствуют или недостаточно эффективно работают системы водоотведения. Данные обстоятельства делают особенно актуальными работы в области переоснащения и дооснащения войск (сил) современными системами водоотведения (типа систем АПЛ-500), работы в области разработки и внедрения НДТ в ВС РФ при строительстве и организации автономных полевых автопарков, ремонтно-восстановительных баз, полевых аэродромов, оснащении военных объектов экологичными инженерно-техническими системами всестороннего обеспечения замкнутого цикла. Проведенные исследования подчеркивают необходимость разрешения проблемной ситуации от-

ставания в области разработки и внедрения нормативно-методической базы экологической безопасности войск (сил) в полевых условиях от темпов развития и внедрения в эксплуатацию новых образцов ВВСТ. Для разрешения этой проблемной ситуации рекомендуется продолжить и расширить работы, проводимые по заказу МО РФ, с привлечением ведущих специализированных научных организаций Министерства обороны и народного хозяйства. Применяемые решения должны быть современными, эффективными и обоснованными, ориентиром для них могут служить информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям, например справочник НТД «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» [5], основные положения которого были реализованы при организации систем водоотведения АПЛ-500.

### Список используемых источников

1. Комплекс мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий, переход на принципы наилучших доступных технологий и внедрение современных технологий: распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2014 г. № 398-р. – URL: <https://government.ru/media/files/41d4cc19757c1099b2b3.pdf> (дата обращения: 12.01.2020).
2. Об утверждении Правил организации размещения и быта войск при расположении в полевых условиях (лагерях): приказ Министра обороны Российской Федерации от 1996 года № 39. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901850120?section=text> (дата обращения: 13.04.2021).
3. Автономный полевой лагерь АПЛ-500. – URL: <http://www.apl500.ru/index.php/sostav/canal> (дата обращения: 12.01.2020).
4. Вооруженные силы России. Итоги 2019 года. – URL: <https://topwar.ru/106290-vooruzhennye-sily-rossii-itogi-2019-goda.html> (дата обращения: 12.01.2020).
5. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – М.: Бюро НТД, 2015. – 377 с.

А.Н. Атарщиков,

*кандидат военных наук;*

А.П. Данелян,

*кандидат военных наук;*

В.А. Новиков,

*доктор военных наук, профессор, действительный член Академии военных наук*

## **СПОСОБ РАЗВЕРТЫВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОБСТАНОВКИ В АРКТИКЕ**

В статье рассматривается методический подход к организации применения системы оперативного развертывания низкоорбитальной многоспутниковой группировки малых космических аппаратов (МКА) для обеспечения развертывания орбитального сегмента национальной системы мониторинга обстановки в Арктике. Представлена классификация и проведен анализ систем мониторинга обстановки в Арктике. Обозначены возможные пути развития национальной системы мониторинга обстановки в Арктике.

Ключевые слова: космическая система мониторинга обстановки, малый космический аппарат, система оперативного развертывания орбитальной группировки МКА, нештатные средства выведения МКА.

### **ВВЕДЕНИЕ**

С началом активной фазы участия РФ в работах по добыче углеводородного сырья на арктическом шельфе к северным территориям начали проявлять свой интерес не только страны Арктического совета, но и государства, не имеющие законных притязаний на Арктику. Этот интерес в первую очередь продиктован стремлением каждой из претендующих стран установить свой контроль над регионом, желанием нивелировать усилия РФ по освоению богатств арктической территории и осуществить противодействие возможности проводки судов Северным морским путем (СМП), оставшимся единственным морским сообщением, соединяющим Восток и Запад, который неподконтролен США.

Защита национальных интересов РФ в Арктике, и прежде всего в отношении СМП, является приоритетной задачей. Согласно ФЗ РФ № 132-ФЗ от 28.07.2012 г. «О внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути» любому судну, которое имеет порт приписки, наша страна обеспечит безопасность прохода, в том числе прокладки канала в тяжелом льду, помощь в различных ситуациях и возможность захода в порт по пути следования.

Важным фактором функционирования СМП является резкий характер изменения климатообразующего процесса в пределах арктической зоны, особенно в части ледообразования.

Выбор технических средств для обеспечения безопасного судоходства по СМП является устоявшимся: стационарные РЛС берегового базирования, космические системы и комплексы, гидроакустические комплексы, гидролокаторы и шумопеленгаторы. Сегодня в Арктике существует три подсистемы освещения обстановки: на базе РЛС, космических систем и комплексов и гидроакустических средств.

Жесткие условия Арктики и характер климатического воздействия Северного полюса оказывают значительное влияние как на технические, так и на организационные принципы формирования и применения каждой из подсистем освещения обстановки в данном регионе, в результате чего эффективность работы гидроакустических средств, береговых и корабельных РЛС в условиях Арктического региона значительно снижается [1].

Перспективным направлением решения задачи освещения обстановки в Арктике будет создание низкоорбитальной группировки МКА на примере ОГ МКА «СТАРЛИНК». Масса таких МКА не превышает 1000 кг.

В условиях Арктики для оценки ледовой обстановки необходимо использовать всепогодную оперативную радиолокационную космическую съемку.

Финская компания ICEYE создала МКА (масса МКА – 100 кг) для получения снимков с высокой разрешающей способностью (до 0,55 м) земной поверхности бортовым радиолокатором с синтезированной апертурой антенны [2].

Разработки по созданию МКА с аналогичными возможностями ведутся и отечественной ракетно-космической промышленностью [3]. Достигнутые успехи в снижении массогабаритных характеристик и стоимости МКА при сохранении высокого качества изображения позволяют применять для развертывания (запуска МКА) ОГ МКА средства выведения с пониженными характеристиками тяговооруженности ракет-носителей.

На настоящий момент в нашей стране существует большой научно-технический задел по разработке и созданию перспективных средств выведения МКА. Разработки ведутся с возможностью осуществления запуска в различных средах (воздушной, морской и наземной) [4].

Отличительной особенностью применения перспективных средств выведения, которые в совокупности могут применяться как система оперативного развертывания ОГ МКА, является использование уже существующей инфраструктуры (для авиационно-космических комплексов – это аэродромная сеть с самолетами-носителями РКН, для ракетно-космических комплексов (РКК) на базе подвижных грунтовых ракетных комплексов «Старт-1» – технические базы и позиционные районы снимаемых с боевого дежурства ракетных частей, для морского космического комплекса (МКК) на базе подводных лодок – полигон «Ненокса» с наземными стартовыми сооружениями подготовки и хранения космических средств) и конверсионных баллистических ракет (РКК «Старт-1» и МКК), снимаемых с боевого дежурства.

## **МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО СПОСОБА РАЗВЕРТЫВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОБСТАНОВКИ В АРКТИКЕ**

В настоящее время формирование космического сегмента проводится последовательными одиночными, групповыми (блок МКА) запусками или их сочетанием. Подготовка и пуск РКН осуществляется силами 1 ГИК МО РФ. Процесс имеет длительный временной характер и может составлять до нескольких недель.

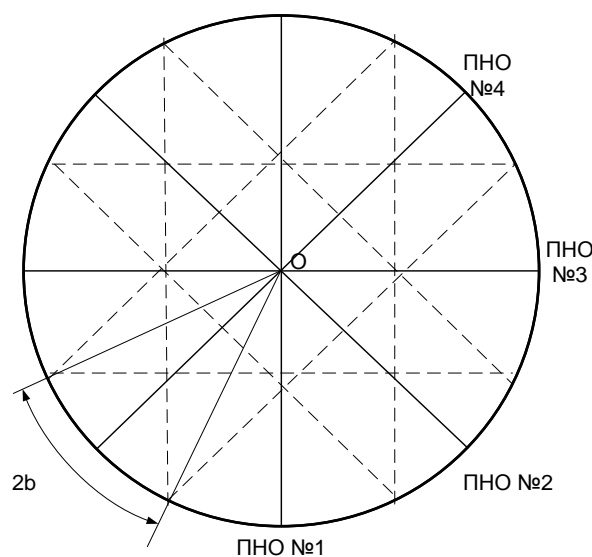
Альтернативным способом является создание космического сегмента посредством применения системы оперативного развертывания низкоорбитальной группировки МКА. Ввиду отсутствия такой системы сегодня не прорабатываются вопросы методического обеспечения реализации альтернативного способа развертывания космического сегмента национальной системы мониторинга обстановки в Арктике. В целях решения этой задачи разработан методический подход, алгоритм которого представлен на рис. 1.

При определении баллистической структуры ОГ МКА обеспечения мониторинга обстановки в Арктике целесообразно ее построение по принципу систем-цепочек (все МКА распределены в плоскости орбиты одинаково, при этом на земной поверхности создаются полосы непрерывного обслуживания (ПНО), которые накладываются встык на широте Северного полярного круга), а наклонение орбит МКА целесообразно выбрать околополярными. Совокупность нескольких МКА, расположенных равномерно в одной плоскости, образуют ПНО (рис. 2).

Баллистическую структуру ОГ МКА освещения обстановки в Арктике можно определить как  $(N, n, m)$ , где  $N$  – общее количество МКА в орбитальной группировке;  $n$  – количество МКА в плоскости;  $m$  – количество плоскостей (полос непрерывного обслуживания).



Исходными данными для формирования баллистической структуры ОГ МКА должны быть указаны: широтный пояс (район обнаружения объекта), ограниченный нижней и верхней геоцентрическими широтами  $\{\Psi_n, \Psi_b\}$ ; функциональные характеристики типового МКА системы.



*Рис. 2. Характеристики полос непрерывного обслуживания ОГ МКА, построенных по принципу систем-цепочек*

Задается диапазон высот базовой околокруговой орбиты (с учетом тяговооруженности средств выведения и массогабаритных характеристик МКА значение этого показателя будет находиться в пределах до 350 км), на которой предполагается функционирование специальной бортовой аппаратуры МКА ( $H$  – высота круговой орбиты,  $\gamma$  – угол полураствора бортовой аппаратуры,  $\delta$  – угол минимального возвышения над плоскостью местного горизонта,  $\varphi_3$  – геоцентрический угол мгновенной зоны обслуживания).

Так как известна величина  $\varphi_3$ , то при решении задачи определения минимального количества МКА космического сегмента необходимо определить оптимальную структуру системы МКА [5], при которой

$$= \min N(m), m \geq \frac{\pi}{2\varphi_3}.$$

Определение оптимальной баллистической структуры ОГ МКА производится следующим образом. На этапе 1 и 2 определяем минимально возможные значения числа плоскостей ( $m_{\min}$ ), и числа МКА в плоскости ( $n_{\min}$ ), при которых можно построить орбитальный сегмент при заданном значении  $\varphi_3$ :

$$m_{\min} = \left\lceil \frac{\pi}{2b_{\Psi}^{(0)}} \right\rceil + 1,$$

где  $b_{\Psi}^{(0)} = \arcsin \frac{\sin \varphi_3}{\cos \Psi_H}$  [5].

На этапе 3 будем последовательно перебирать все значения  $m$ , начиная с  $m_{\min}$ , т.е.  $m = m_{\min}, m_{\min} + 1, \dots$  до тех пор, пока число МКА в плоскости  $n$  не станет равно  $n_{\min}$  и с учетом синхронизации взаимного положения МКА в соседних плоскостях для каждого значения  $m$  получаем [5]:

$$1) b_{\Psi}^{(m)} = \frac{\pi}{2m}, b^{(m)} = \arcsin \left( \sin b_{\Psi}^{(m)} \cos \Psi_H \right),$$

$$2) a^{(m)} = \arccos \left( \frac{\cos \varphi_3}{\cos b^{(m)}} \right), \text{ где } a - \text{ угол между МКА в одной плоскости.}$$

Учитывая, что рассматриваются приполярные орбиты и для нижней геоцентрической широты площади обзора выполняется условие

$$\Psi_H \leq i - b,$$

то ПНО необходимо укладывать встык на широте ( $\Psi_H$ ) Северного полярного круга. Тогда [5]

$$n^{(m)} = \begin{cases} \left\lceil \frac{\pi}{a^m} \right\rceil + 1, & \text{если } \frac{\pi}{a^m} - \text{дробное;} \\ \frac{\pi}{a^m}, & \text{если } \frac{\pi}{a^m} - \text{целое.} \end{cases}$$

На этапе 4 рассчитывается общее количество МКА в ОГ:

$$N^{(m)} = m \cdot n^{(m)}.$$

После получения всех чисел  $N^{(m)}$  находим из них минимальное.

На этапе 5 определяются координаты точек пуска РКН на основе следующих рассуждений. При формировании с помощью системы оперативного развертывания низкоорбитальной группировки МКА независимо от ее состава и структуры трасса каждого МКА из-за вращения Земли в течение суток дважды пройдет через интервал по долготе, который совпадает с межвитковым расстоянием. Рассматривая трассу каждого МКА на суточном интервале времени, можно заключить, что в пределах Северного и Южного полушарий образуется  $n$  полос, ограниченных трассами двух последовательных витков МКА (рис. 3), при пересече-

нии которых (нисходящими частями витков восходящих частей витков и наоборот) образуются  $m$  районов уникальной формы, число которых определяется выражением [5]

$$m = H(\pi / \Delta\Omega - 1),$$

где  $H(x)$  – ближайшее целое число к аргументу;

$\Delta\Omega$  – долготный интервал смежных витков.

В результате на всей поверхности земного шара рассчитывается такое количество  $m$ - $n$  районов пуска РКН (в обоих полушариях), при расположении в каждом из которых определенного количества средств выведения МКА (пусковых установок) возможно обеспечить развертывание низкоорбитальной группировки МКА в кратчайшие сроки.

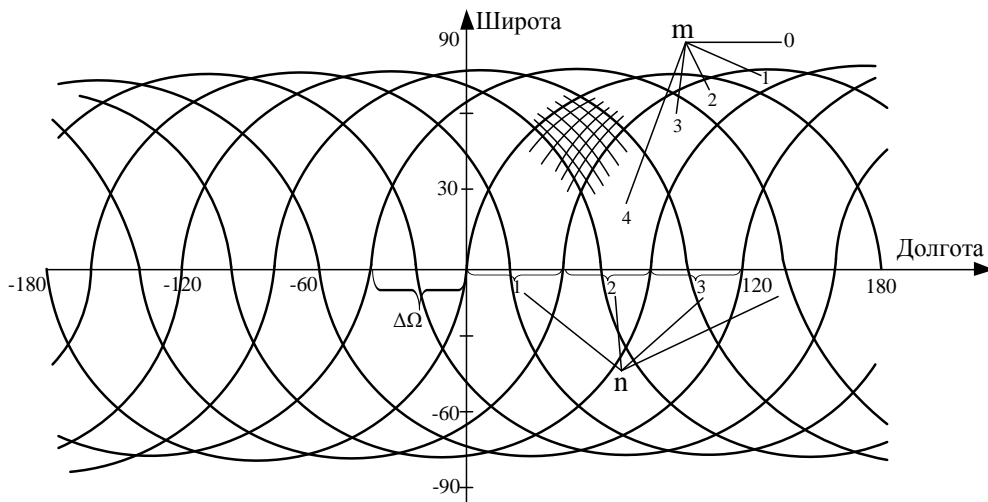


Рис. 3. Трасса МКА на суточном интервале времени

Географические координаты ( $L$  – долгота,  $B$  – широта) вершин произвольного  $m$ -района (рис. 4) определяются как точки пересечения трасс МКА, отстоящие друг от друга по долготе восходящего узла на величину  $\Delta L^k = k * \Delta\Omega$ , где  $k$  меняется от 1 до  $m$ .

Переходя к рассмотрению выбранного района запуска [например, для  $n = 1, m = 3$  (рис. 3)], можно видеть, что из-за многочисленных пересечений трасс МКА ОГ на суточном интервале времени выбранный район запуска покрывается сетчатой структурой, параметры которой полностью определяются составом и построением развертываемой низкоорбитальной группировки МКА.

Следовательно, рассчитав определенный район сетчатой структуры которая в точности совпадает с долготным интервалом трассы полета МКА и разместив в нем определенным образом пусковые устройства средств выведения МКА (рис. 3 и 4), возможно развертывание низкоорбитальной группировки МКА в кратчайшие сроки, осуществляя пуски РКН на восходящих и нисходящих участках трассы полета МКА.

Таким образом, для обеспечения развертывания низкоорбитальной группировки МКА с заданной баллистической структурой необходимо иметь некоторое количество ( $A$ ) точек старта, которое можно рассчитать выражением:

$$A \leq K / 2,$$

где  $K$  – общее количество МКА.

Результаты моделирования [6] процесса применения системы оперативного развертывания показывают, что временной интервал, за который происходит развертывание низкоорбитальной группировки с возрастанием числа  $m$  рассчитанного района пуска РКН (при приближении его к экватору), уменьшается. Необходимо отметить, что длина отрезка, со-

единяющего точки пуска РКН внутри района сетчатой структуры в этом случае увеличивается. В то же время, если перемещать рассчитанный район пуска РКН по долготе, то величина времени развертывания ОГ МКА изменяется незначительно, а расстояния между точками старта останутся неизменными. Кроме того, необходимо учитывать и то обстоятельство, что в пределах выбранного района запуска местоположение точек старта может изменяться в пределах элемента сетчатой структуры в зависимости от конкретных значений долготы восходящего узла первого МКА в ОГ и времени на принятие решения на развертывание (восполнение) ОГ МКА.

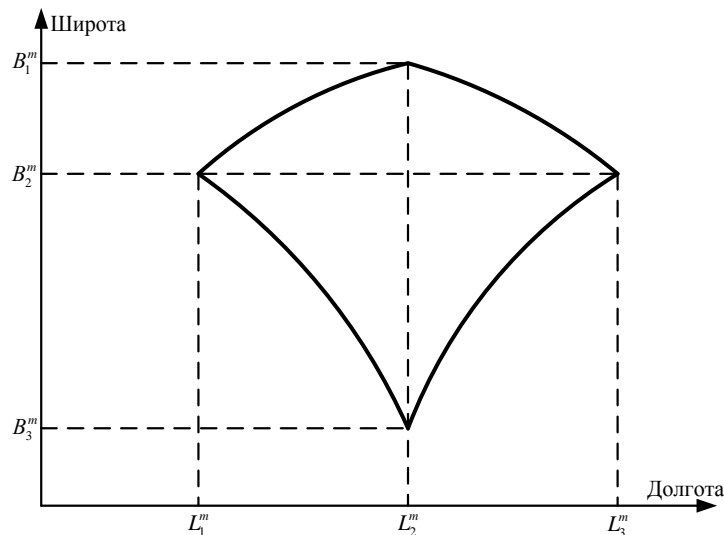


Рис. 4. Произвольный  $t$  район сетчатой структуры пуска РКН

Для совокупности рассчитанных районов пуска РКН, обеспечивающих при размещении в них элементов системы оперативного развертывания в течение одних суток, существует район, время развертывания ОГ МКА для которого является минимальным. Этот район в зависимости от долготы восходящего узла первого МКА ОГ с увеличением времени принятия решения на ее развертывание смещается по земной поверхности вдоль определенной траектории, которая определяется баллистической структурой, развертываемой ОГ МКА.

С помощью сетчатой структуры рассчитывается определенное количество районов пуска РКН, которые равноудалены на земной поверхности (несколько  $m-n$  районов) по долготе на значительные расстояния (сотни километров). Количество этих районов зависит от требуемого временного интервала развертывания низкоорбитальной группировки МКА, состава и расположения элементов системы оперативного развертывания, возможности применения средств выведения МКА в режиме дублирования проведения пусков РКН. В зависимости от расположения точки запуска и предпочтений лица, принимающего решение на развертывание ОГ МКА, определяется тип средства выведения из состава системы оперативного развертывания по характеру размещения пусковой установки в среде (воздушной, морской или наземной).

Кроме того, получив точки пуска РКН с учетом циклограммы запуска МКА, определяют время старта для каждой пусковой установки.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из определяющих факторов обеспечения развертывания космического сегмента национальной системы мониторинга обстановки в Арктике является гарантированный доступ в космическое пространство в любых складывающихся условиях обстановки на основе системы средств выведения, которая обладает повышенными характеристиками оперативности и устойчивости.

Предложенный в работе методический подход организации применения системы оперативного развертывания низкоорбитальной многоспутниковой группировки МКА базируется на усовершенствованной методике реализации альтернативного способа развертывания космического сегмента национальной системы мониторинга обстановки в Арктике, которая позволяет определить рациональный состав ОГ МКА, определить состав и расположение элементов системы оперативного развертывания, порядок и последовательность ее применения, смоделировать процесс развертывания низкоорбитальной группировки МКА для обеспечения мониторинга обстановки в Арктике.

Разработанные предложения по реализации альтернативного способа развертывания космического сегмента национальной системы мониторинга обстановки в Арктике предполагают использование уже существующей инфраструктуры и средств выведения. Предложения направлены на сокращение времени развертывания (восполнения) ОГ МКА.

Результаты моделирования процесса функционирования системы оперативного развертывания с помощью представленного методического подхода позволили провести оценку времени создания космического сегмента национальной системы мониторинга обстановки в Арктике. Предложенный способ формирования низкоорбитальной группировки МКА с однотипной баллистической структурой позволяет сократить время ее формирования по сравнению с существующими способами в зависимости от условий обстановки до трех раз.

## Список используемых источников

1. Михайлов Ю.М., Попович В.В., Ведешин Л.А. Создание системы мониторинга окружающей обстановки в Арктике // Редкие земли. – 2017. – № 2 (9).
2. Шолкова Е.А. Небольшие спутники начинают получать радиолокационные изображения поверхности Земли с высоким качеством // Ракетная и космическая техника. – 2019. – № 33 (3113). – С. 7–8.
3. В России создается космический радиолокатор нового поколения. – URL: [www.arms-ex.ru](http://www.arms-ex.ru) (дата обращения: 21.04.2020).
4. Кузьмин В.Н., Данелян А.П. Обоснование способа создания орбитального сегмента системы освещения обстановки в Арктике // Вестник Академии военных наук. – 2018. – № 4 (65).
5. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н.Ф. Аверкиев [и др.] – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 302 с.
6. Горбулин В.И., Басыров А.Г., Михеев О.В. Моделирование применения многоспутниковых орбитальных группировок в интересах информационного обеспечения действий войск // Труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. – 2019. – Т. 1. – С. 243–246.

О.В. Иконников,  
*кандидат военных наук, доцент;*  
Б.Д. Казахов,  
*доктор военных наук, профессор;*  
Д.А. Колягин,  
*кандидат военных наук*

## **О СУЩНОСТИ И СОДЕРЖАНИИ АДАПТИВНЫХ ДЕЙСТВИЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ВОЙНАХ И ВООРУЖЕННЫХ КОНФЛИКТАХ**

В статье представлен методологический подход к классификации типов адаптивных действий организационно-технических систем военного назначения в современных войнах и вооруженных конфликтах.

Ключевые слова: адаптивные боевые действия, параметрическая адаптация организационно-технических систем военного назначения, типы адаптации организационно-технических систем военного назначения.

Функциональная интеграция сил и средств, способных вести боевые действия в воздушно-космическом пространстве, на суше и море, комплексность их применения по единому замыслу и плану, под единым руководством и в едином контуре боевого управления, обусловили появление и практическую реализацию концепции ведения войн нового поколения. При этом анализ совершенствования средств вооружения и способов их применения в XXI веке позволяет сделать вывод о коренном изменении характера применения сил и средств, обеспечивающих завоевание превосходства в воздушно-космической сфере, с явным смещением центра тяжести в данную область.

Основной перспективной концепцией вооруженной борьбы в воздушно-космической сфере, наиболее обсуждаемой военными специалистами передовых держав мира, является концепция применения ВС в форме «Мгновенный глобальный удар» (Prompt Global Strike, МГУ), подразумевающая возможность нанесения противостоящей стороне внезапного, предельно мощного массированного удара с целью снижения ее ответного потенциала до неприемлемого уровня.

При реализации концепции МГУ силам, выполняющим задачи прикрытия войск и объектов от ударов, необходимо оперативно приспосабливаться к быстро меняющейся обстановке в воздухе и космосе, т. е. вести адаптивные боевые действия.

Особо отметим, что применительно к организационно-техническим системам военного назначения (ОТС ВН), решающим задачи воздушно-космической обороны (ВКО), адаптация будет осуществляться не только (и не столько) для сохранения своей целостности, но и для обеспечения требуемых параметров эффективности выполнения задач по предназначению в течение всего времени (периода) военного конфликта.

Рассмотрение сути адаптивных боевых действий предлагается осуществить с применением базового аналитического метода познания – метода аналогий. Согласно этому методу отправным пунктом суждений служит предположение, что поведение изучаемой системы подобно поведению системы, выступающей в качестве аналога.

В роли «системы-аналога» ОТС ВН предлагается использовать большие (глобальные) системы, реализующие взаимосвязанные (взаимозависимые) процедуры (частные функции) в рамках единого процесса для достижения целей своего функционирования, несмотря на пространственный размах расположения составных элементов и проблем в синхронизации их действий [2].

При описании применения глобальных систем надлежит оперировать основополагающими категориями: «пространство», «время» и «материя».

Материя в нашем случае выступает в качестве строительного фундамента для элементов системы. Сочетание, взаимное расположение элементов и каналов, их связывающих (их топология и пространственная структура), а также информация, передаваемая в них, формируют некий «облик» системы. Можно утверждать, что основной целью адаптации в больших (глобальных) системах является реализация их потенциальных, «генетически» детерминированных возможностей для выполнения своих функциональных задач с требуемой эффективностью в условиях воздействия «агрессивной» внешней среды. Причем реализация детерминированных возможностей системы может выражаться в коррекции функционала ее отдельных элементов и в изменении ее структуры (замены отдельных элементов). На данную коррекцию и (или) переконфигурирование системы в целом под новые условия функционирования, спровоцированные изменением внешней среды, будет затрачиваться некоторый промежуток времени. Данное время расходуется на последовательное выполнение следующих мероприятий:

- выявление проблемной ситуации, обуславливающей необходимость адаптации системы;
- определение целевой установки для решения проблемной ситуации и анализ возможных подходов для ее достижения;
- разработку функциональной структуры системы, адаптированной к решению проблемной ситуации;
- создание новых информационных связей между элементами системы;
- перераспределение ресурсов между элементами системы;
- переконфигурирование системы (коррекцию функционала отдельных элементов);
- адаптацию подсистемы управления к новой структуре и режиму функционирования измененной сложной системы.

Очевидно, что изменение структуры системы в целом – это более энергетически затратный процесс, растянутый во времени, чем коррекция функционала ее отдельных элементов.

Основываясь на понимании, что основные идеи и правила теории адаптации больших (глобальных) систем к условиям воздействия на них факторов «агрессивной» внешней среды применимы к ОТС ВН, уточним следующие положения. Во-первых, форма и содержание воздействий внешней «агрессивной» среды на ОТС ВН прежде всего определяются противником. Во-вторых, сущность негативного влияния на ОТС ВН в целом или на ее отдельные элементы определяется типажом средств поражения (подавления), применяемых противоборствующей стороной. В-третьих, в современных военных конфликтах в действиях противоборствующих сторон прослеживается связность, характеризуемая как стохастическая зависимость со множеством случайных факторов.

Как уже отмечалось ранее, проблема адаптивных действий наиболее остро проявляется применительно к ОТС ВН, предназначенных для решения задач ВКО. Поэтому в дальнейшем сущность и содержание адаптивных действий рассмотрим на примере функционирования подсистемы разведки и предупреждения о действиях противника в воздушно-космической сфере, являющейся важнейшим элементом системы ВКО.

Структурно подсистема разведки и предупреждения состоит из пунктов управления, каналов связи, радиолокационных станций (РЛС), разнесенных в пространстве, реализующих частные функции в рамках единого процесса – добывание информации о действиях противника в условиях противодействия (функционального подавления) элементов данной подсистемы.

Существующая структура и технические особенности элементов подсистемы разведки и предупреждения не позволяют оперативно изменять режимы функционирования РЛС и, как следствие, параметры подсистемы в соответствии с динамично изменяющимися условиями воздушно-космической обстановки и возникающими задачами, свойственными применению ВС в форме «Мгновенный глобальный удар».

Функционал данной подсистемы реализуется формированием радиолокационного поля (РЛП). Параметры РЛП могут изменяться, как правило, за счет включения (выключения) РЛС, изменения режимов их работы и передвижения этих средств для восстановления (наращивания) радиолокационного поля. Исходя из этого интегрированное свойство формируемого РЛП представляет собой просто сумму свойств (параметров и характеристик), для которых единственной возможностью «приспособления» к воздействию внешней среды является изменение (переконфигурирование) структуры системы (замена отдельных элементов).

В такой системе разведки и предупреждения реализуется в основном структурная адаптация, заключающаяся во включении в ее структуру и (или) изъятии из нее дополнительных элементов – РЛС. Метод аналогий позволяет подойти к формированию РЛП как к процессу увязки отдельных РЛС временными, пространственными и количественными связями, предусматривающими учет категорий «пространство» и «материя» в отношении РЛП. Под категорией «пространство» РЛП понимается совокупностью зон обнаружения РЛС, время – дискретно, «материей» в нашем случае выступает энергия, излучаемая в пространство станциями (энергия РЛП). Изменение количества «материи» в «пространстве» обуславливается возможностью коррекции функционала отдельных элементов системы во времени. Реализация коррекции функционала отдельных элементов – однопозиционных РЛС кругового обзора – при реализации структурной адаптации в многопозиционную радиолокационную систему была рассмотрена в статье [1].

Данное изменение позволяет значительно сократить время реакции сил и средств разведки и предупреждения на изменения обстановки за счет оперативного маневра информационными средствами. Такой маневр ориентирован на оперативное сосредоточение усилий по разведке во времени и пространстве, обеспечивающее формирование наиболее благоприятных условий при отражении ударов различного масштаба (по пространственным параметрам, функциональной структуре, интенсивности и длительности). Организационно-технические аспекты маневра предусматривают целенаправленные изменения состава средств радиолокационной разведки (РЛР), режимов их функционирования и порядка управления ими, а также трансформацию структуры системы разведки.

В многопозиционной радиолокационной системе, описанной в статье [1], уже говорилось о маневре энергией РЛП, представленного в форме согласованного вращения станций, позволяющем создавать области повышенной энергии в РЛП и управлять их положением в пространстве (за пределами системы). Напомним, что под маневром энергией радиолокационного поля понимается перенос области повышенной энергии по фронту и глубине без смены позиций РЛС, осуществляемый в целях гарантированного обнаружения и сопровождения воздушных объектов. То есть мы можем говорить об осуществлении маневра «материей», созданной системой.

В данном случае процесс «приспособления» ОТС ВН заключается в изменении функций отдельных элементов и параметров создаваемого РЛП, такую адаптацию предлагается назвать параметрической. Функционал сил и средств разведки в зависимости от уровня иерархии и адаптации представлен в табл. 1.

Как следует из таблицы, параметрическая адаптация в условия ведения боевых действий непосредственно связана с коррекцией функций органов управления войсками (силами), выполняющим задачи ВКО.

Для выявления коррекции функций управления требуется конкретное представление о вариантах содержания боевых действий объединений, оперативно-тактических соединений, тактических частей, характеризующихся пространственными, временными и количественными показателями.

Проведенные исследования на предмет выявления управленческих функций, целесообразных при различных типах параметрической адаптации (пространственной, количественной и временной), показали следующее:

– сущность управленческих функций в ходе боевых действий при пространственной параметрической адаптации должна состоять в назначении и непрерывном уточнении элементам ОТС ВН замкнутых объемов пространств для действий в воздушно космической сфере;

Таблица 1

### Функционал сил и средств разведки в зависимости от уровня иерархии и адаптации

Уровень формирования ОТС ВН	Функционал элементов	
	Структурная адаптация	Параметрическая адаптация
Первичное тактическое подразделение	<ul style="list-style-type: none"> <li>• включение (выключение) РЛС;</li> <li>• выбор режимов работы РЛС</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• маневр РЛС, не задействованных в создании областей повышенной энергии РЛП;</li> <li>• включение назначенных режимов работы РЛС для обзора воздушного пространства (согласованный равномерный, согласованный неравномерный)</li> </ul>
Основное тактическое подразделение	<ul style="list-style-type: none"> <li>• маневр РЛС;</li> <li>• включение (выключение) РЛС;</li> <li>• выбор режимов работы РЛС</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• включение (выключение) РЛС первичных тактических подразделений;</li> <li>• маневр РЛС, не задействованных в создании областей повышенной энергии РЛП;</li> <li>• выбор режимов работы своих РЛС и РЛС первичных тактических подразделений для обзора воздушного пространства (согласованный равномерный, согласованный неравномерный);</li> <li>• создание областей повышенной энергии РЛП;</li> <li>• маневр областью повышенной энергии РЛП по обстановке</li> </ul>
Тактическая часть	<ul style="list-style-type: none"> <li>• задействование РЛС резерва;</li> <li>• маневр РЛС;</li> <li>• включение (выключение) РЛС;</li> <li>• выбор режимов работы РЛС</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• включение (выключение) РЛС первичных тактических подразделений и основных тактических подразделений;</li> <li>• маневр РЛС, не задействованных в создании областей повышенной энергии РЛП;</li> <li>• выбор режимов работы своих РЛС, РЛС первичных и основных тактических подразделений для обзора воздушного пространства (согласованный равномерный, согласованный неравномерный);</li> <li>• создание областей повышенной энергии РЛП;</li> <li>• упреждающий маневр областью повышенной энергии РЛП;</li> <li>• маневр областью повышенной энергии РЛП по обстановке</li> </ul>

– сущность управленческих функций в ходе боевых действий при количественной параметрической адаптации должна состоять в создании соотношения сил сторон при решении каждой оперативно-тактической (тактической) задачи ОТС ВН и в распределении элементов ОТС ВН между оперативно-тактическими (тактическими) задачами. При этом при распределении элементов ОТС ВН между оперативно-тактическими (тактическими) задачами должен быть четко оговорен порядок делегирования управленческих полномочий между оперативно-тактическими соединениями (тактическими частями), чьи интересы затрагивает данный вариант композиции ресурса;

– сущность управленческих функций в ходе боевых действий при временной параметрической адаптации состоит в определении начала выполнения оперативно-тактических (тактических) приемов, а также в выполнении потребных временных согласований в действиях элементов ОТС ВН, выполняющих задачи воздушно-космической обороны (ВКО).

Предлагаемый подход к классификации типов адаптации ОТС ВН в современных войнах и вооруженных конфликтах представлен на рис. 1.



Рис. 1. Классификации типов адаптации ОТС ВН

Стоит отметить, что структурную адаптацию удобно подразделить на альтернативную и эволюционную. Под альтернативной адаптацией предлагается понимать изменение в функциональной структуре ОТС ВН с тем же набором сил и средств, то есть наращиванием качества управления. Эволюционная адаптация по сути отражает процесс биологической эволюции и связана с введением в ОТС ВН новых образцов вооружения, военной и специальной техники, наращиванием «материального» адаптационного ресурса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, задача адаптации ОТС ВН в условиях боевой обстановки представляется востребованной с точки зрения обеспечения устойчивости воинских формирований к негативным факторам. По мнению авторов, адаптивные боевые действия должны сводиться не только к структурной адаптации сил и средств, участвующих в воздушно-космической обороне, но и к параметрической адаптации, которая позволяет ОТС ВН оперативно реагировать на динамично изменяющиеся условия воздушно-космической обстановки, являющиеся неотъемлемой характеристикой современных и будущих военных конфликтов.

### Список используемых источников

1. *Казахов Б.Д.; Иконников О.В.* О структуре и сущности функционирования многопозиционной радиолокационной системы обнаружения воздушных объектов // Вестник Академии военных наук. – 2015. – №4 (53).
2. *Резников Б.А.* Теория систем и оптимального управления. – МО СССР, 1988. – Ч. 3: Принятие решений в условиях неопределенности и адаптация. – 140 с.
3. *Растрингин Л.А.* Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.

*Borovskoy E.P., Kokhanovsky A.G., Kusnetsov A.B.* Three-dimensional model of the premises and placed in the ground technological equipment of the launch complex based on the use of voxel primitives // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 7–13.

It is proposed to use robotic systems for monitoring the technical condition of ground-based technological equipment of launch complexes. The choice of a frame-production approach for creating a model of ground-based technological equipment for launch complexes is justified. The method of forming a model of premises and elements of ground-based technological equipment of launch complexes based on the use of voxel primitives is given.

*Key words: ground processing equipment, frame, voxel, model.*

*Kalinin V.N.* About one Generalization Game-theoretic Problems of Bellman-Shiffman's // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 14–19.

In paper the antagonistic game-theoretic problem with a bilinear target functional is considered at isoperimetric integral restrictions on admissible operations of operating and revolting legs. The problem is generalization of a known problem of Bellman-Shiffman's. As criterion of an optimality of control the requirement of a maximum of the bilinear terminal functional characterizing quality of managerial process serves. The revolting medium has antagonistic character and its purpose - minimization of the specified functional that leads to reviewing of corresponding infinite antagonistic game on product of convex weak compact sets in a Hilbert space. For this game the equilibrium point existence which parameter's start as required optimum control is proved. The problem is shown to reviewing of differential game of the second order, the corresponding solution is discovered on the basis of ideas of a maximum principle of Pontrjagin's by determination of a saddle point of a corresponding Hamiltonian. The received outcomes can be used at a solution of practical problems of optimum scheduling of onboard equipment of the active mobile plants intended for informational interaction with the enclosing physical medium in the conditions of purposeful perturbations, in particular, in corresponding problems of modern space cybernetics and computer science.

*Key words: active mobile object, information interaction, space cybernetics, the space vehicle, the information active mobile object, operating and purposeful revolting influences, infinite antagonistic game, a balance point, a Hilbert space, compactness, a principle of a maximum of Pontrjagin's.*

*Lupashko M.N., Stepanov I.V., Timofeev V.V.* A model of energy-saving information processes in a spacecraft using the bayesian approach // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 20–25.

The concept of choosing a strategy for organizing information processes is considered - preliminary onboard processing and delivery of target information by a military spacecraft. Expressions for calculating energy consumption for the implementation of strategies and for estimating the error of preprocessing are obtained. The use of the Bayesian approach to assessing the suitability of target information is proposed. Examples and recommendations on the organization of preliminary onboard processing of target information by a military spacecraft are given.

*Key words: onboard information processing, energy intensity, Bayesian approach.*

*Borodiuk A.A., Sakulin A.N., Yakimov V.L.* Algorithm of dynamic clustering and its application for the formation of polygaus models of changes in telemetry parameters of spacecraft in phase space // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 26–36.



An approach to identifying the essential features of changes in the time series of telemetry parameters of onboard systems of spacecraft, the creation of poly-Gaussian models of telemetry parameters and models of their change based on directed graphs using the clustering procedure is considered. An algorithm for dynamic clustering of time series is proposed, the difference of which is taking into account the peculiarities of clustering objects - phase portraits of the analyzed telemetry parameters. The results of application of the developed dynamic clustering algorithm for the formation of poly-Gaussian models of time series of real telemetry parameters of objects of rocket and space technology are presented.

*Key words: spacecraft, telemetry parameter, phase space, dynamic clustering.*

*Dyakov A.N., Kokarev A.S., Levchuk A.A. Method of selection system maintenance and repair parameters for the transmitting electronic complex // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 37–49.*

The publication provides a justification for the relevance of improving the system of maintenance and repair of the transmitting electronic complex (TEC). Operational practice shows that the requirements for the availability coefficient of the TEC are not always met. The analysis made it possible to identify the reason for the significant excess of the estimated duration of the periods when devices are inoperable, due to the search for the rendered elements and their replacement, organizational measures to restore their operability. It is possible to eliminate this discrepancy by justifying the parameters of the TEC maintenance and repair system (MRO), which is currently not implemented due to the lack of appropriate scientific and methodological support. So, the methodology should be based on models that are sensitive to the parameters of maintenance of devices with regulated MRO and maintenance by state. The article offers a formal statement of the problem of the methodology for justifying the system of maintenance and repair of TEC, as well as a brief description of the model that establishes the dependence of the availability coefficient and the amount of costs on the parameters of maintenance and repair.

The novelty of the model for maintaining the availability of devices with maintenance by state is due to the consideration of such MRO parameters as completeness and depth of control. The results of testing presented in the article confirm the practical significance of using the model as part of the methodology. The use of the well-known gradient optimization method in the methodology in combination with models for maintaining readiness for regulated MRO and state-of-the-art maintenance will allow us to justify such parameter values at which the required value of the readiness coefficient will be provided with minimal operating costs.

*Key words: maintenance and repair system; justification of service parameters, regulated maintenance; maintenance by condition; transmitting electronic complex.*

*Zvonarev V.V., Pimenov V.F., Popov A.S. Method for calculating the probabilities of character and bit errors for QPSK signals in the presence of frequency-shifted harmonic interference // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 50–60.*

The influence of harmonic interference with a frequency different from the frequency of the carrier oscillation of a four-position phase-modulated radio signal on its noise immunity in a satellite channel of information transmission is investigated on the basis of a technique using a correct mathematical apparatus that takes into account the biorthogonality property of the signal. Formulas for the average probabilities of character and bit errors for a four-position phase-manipulated signal are derived. Graphs of the dependences of these probabilities on the signal level and the magnitude of the deviation of the interference frequency at given levels are constructed. The obtained results allow us to reliably determine the quality of the radio channel in various conditions of the signal-interference situation.

*Key words: probability of character and bit error, harmonic interference, frequency shift, four-position phase manipulation, noise immunity.*

*Chunin D.N.* Experimental confirmation of the need to control the accuracy characteristics of the integrated navigation equipment of the GLONASS consumer // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 61–69.

The problematic issues of the operation of the navigation equipment of the consumer of the GLONASS system integrated into the consumer management system, associated with the lack of control of the accuracy characteristics during the operation of the NAP, are considered. It has been experimentally confirmed that unobservable hardware errors of navigation equipment under real operating conditions can significantly increase and affect the quality of the coordinate-time support of consumers. The necessity of changing the normative and technical documents governing the control and production of the integrated navigation equipment of the consumer has been substantiated. In addition, it is necessary to use remote methods for monitoring the accuracy and technical states of the consumer's navigation equipment, built into the control system of objects that are in a high degree of readiness for use.

*Key words: navigation equipment of the user of the GLONASS system, hardware errors of navigation measurements.*

*Alekhin S.G., Ivanov R.D., Shemelov V.A.* Quantitative characteristics of natural climatic seasons of the arctic region // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 70–74.

On the basis of the Methodology for determining the natural climatic seasons of the year for specified areas, developed by the authors, the structure of such seasons for the Arctic region was studied. The practical applicability of the method has been demonstrated for the tasks of rational organization of activities and the most efficient use of natural resources, as well as planning the socio-economic development of the Arctic.

*Key words: arctic region, climatic seasons, average daily air temperature*

A model of the terrain of an inaccessible territory based on the results of combining heterogeneous satellite information / A.V. Astapovich, K.K. Zhbanov, D.O. Medyanikov, A.I. Yakovlev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 75–83.

An approach to the joint processing of altitude information obtained from optical stereomapping and radar interferometry data from space-based remote sensing devices is proposed. The algorithm of its implementation based on the least square method is described. Joint processing of radar and optical data was performed in two territories that differ in the complexity of the terrain. According to the results of the experiment, the requirements for processing of heterogeneous types of data are formulated.

*Key words: remote sensing, digital terrain models, normal height, optical stereomapping, radar interferometry, least square method, joint processing heterogeneous remote sensing data.*

Model of the functioning of onboard special equipment of repeaters on unmanned aerial vehicles of complexes for determining the location of radio emission sources under conditions of restrictions on the throughput of relay channels / I.U. Ereemeev, A.V. Peredry, K.V. Semenov, E.U. Shilovsky // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 84–97.

In article investigates the influence factors of the parameters of the functioning of onboard special equipment of repeaters on unmanned aerial vehicles, which form a spatial base as part of

radio monitoring complexes, on the accuracy of determining the location of radio emission sources in conditions of resource constraints on the throughput of relay channels.

In contrast to the well-known model of direct digital signal retransmission, the proposed model of operation of the on-board equipment of repeaters on unmanned aerial vehicles uses the technology to eliminate the redundancy of the digital data with losses based on clipping the spectral coefficients of the fast Fourier transform in a sliding time window.

Theoretical and experimental studies of the proposed scientific and practical approach to determining the location of radio emission sources, taking into account the effects caused by the implementation of procedures to reduce the redundancy of data presentation with losses, are carried out.

The results of the conducted simulation indicate that the application of the proposed approach to eliminating the redundancy of the digital image of the electronic situation provides an estimate of the mutual delay of relayed signals not worse than  $0.3 \mu\text{s}$  with a signal-to-noise ratio of more than 10 dB. The results obtained can be used both to substantiate the tactical and technical characteristics of onboard special equipment of radio monitoring complexes using an unmanned aerial vehicle, and to further study the issues of matching high-performance sensors with limited bandwidth communication channels of spatially distributed radio monitoring complexes.

*Key words: radio monitoring; digital repeater; determination of the location of radio emission sources; reducing the redundancy of data presentation; unmanned aerial vehicle.*

Model for estimating the speed vector of a satellite-repeater from signals of three reference stations / V.M. Marinin, R.R. Saniev, K.V. Semenov, S.S. Semenyuk // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 98–106.

Model for estimating the speed vector of a satellite-repeater from signals of three reference stations.

An analytical model for determining the velocity vector is presented. A simulation model has been developed for estimating the velocity vector of the relay satellite based on the signals of three reference stations. The results of the root-mean-square error in estimating the modulus of the velocity vector are obtained depending on the direction of movement of the relay satellite relative to the system of reference stations.

*Key words: satellite repeater, reference station, location determination, velocity vector, Doppler frequency shift.*

Oktyabrskiy V.V., Ostrovsky A.S., Salaman R.S. Method of compensation of unevenly distributed smudge of aerial photographs of multi-matrix digital aerial cameras of planned and perspective shooting in conditions of insufficient illumination of the terrain // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 107–117.

The paper presents the results of study of the impact of operating condition and design features of multi-matrix digital aerial cameras of planned-prospective survey (MMDAC PPS) on the decoding properties of recorded aerial images. On the basis of the results obtained, a method for processing aerial images of the MMDAC PPS was developed, which compensates for the blur in its uneven distribution on the image.

*Key words: methods of digital image filtration, aerial image distortion, decoding properties of aerial image.*

Andrushkevich D.V., Biryukov D.N., Timashov P.V. Generation of scenarios for preventing computer attacks based on a logical-ontological approach // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 118–134.

The problem of automated knowledge output is considered by analogy about possible scenarios describing processes that are potentially suitable for preventing computer attacks. The proposed approach is based on a proven technique for transferring knowledge from one problem area to another. The possibility of transferring knowledge about winning strategies of behavior in the biosphere to the cyber sphere has been demonstrated.

*Key words: intelligent system, giromat, inference by analogy, bioinspired approach, ontology, information security, computer attacks.*

Building a software package for auditing network infrastructure objects / D.N. Biryukov, S.L. Lebedev, I.K. Samokhvalov, I.A. Kholinov // Head of the 61st department of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 135–142.

The problem of automated analysis of the security of telecommunication equipment and network software is considered. An approach to the creation of a software package that takes into account the shortcomings of similar products on the information technology market is proposed.

*Key words: telecommunications equipment, network software, security analysis, audit, computer attacks, critical information infrastructure, information security.*

Kiselev A.N. Analysis of the peculiarities of sharing IPv6 and IPv4 protocols from the standpoint of ensuring information security of the protected information // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 143–152.

The article describes an approach to testing the security of the information infrastructure with the joint use of the network protocols Ipv4 and Ipv6. The security testing technique involves the use of tunneling technology for large-scale DDOS attacks. Experimental studies have shown the practical effectiveness of the proposed approach to ensure information security.

*Key words: IPv6 tunneling, DDos-attack, vulnerability of the Ipv6 protocol, IPv6-spoofing.*

Maltsev G.N., Matveev S.A. Research of the protection of a command radio control system of a mobile object using a markov model of overcoming a multi-level information protection system by a violator // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 153–163.

A markov model is presented that describes in the state space the process of an intruder overcoming a multi-level information protection system of a command radio control system for mobile objects. The article considers the security of the command radio control system under the conditions of an intruder's attempts to intercept control as the most dangerous threat to information security. Four levels (frontiers) of protection have been identified, of which two are physical and are typical for a wide class of radio-technical systems for transmitting information, and two levels are logical and are characteristic of command radio control systems for mobile objects. The graph of the implementation of threats is presented, which characterizes the scenario of overcoming the considered levels of protection by the intruder. The nature of the change over time in the probability of an intruder's realization of an information security threat is analyzed. The results obtained for the considered scenario of overcoming the defense lines by the violator are compared with the most favorable (worst for the violator) and unfavorable (best for the violator) scenarios and the most critical levels of information protection are identified.

*Key words: command radio control of mobile objects, information security threats, multi-level information protection system, state graph.*

Morgunov V.M., Stranadkin R.N. Modeling the actions of an internal violator based on the identification and classification of attacks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 164–168.

The urgency of the task of detecting the actions of internal information security violators is caused by a constant increase in the number of carefully thought-out attacks generated by such violators, as well as significant damage caused.

The paper suggests an approach to detecting the actions of internal information security violators based on classification and detection of attacks based on characteristic features.

The developed software package allowed us to test the proposed concept experimentally.

*Key words: internal violator of information security, classification of network attacks, Bayesian type of classifier.*

*Solovyov I.A., Solovyova M.V., Trofimova N.A.* Monitoring the state of information security based on modeling the destructive activity of the violator // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 169–179.

The article presents an approach to build a cognitive activity-attack model that defines a core element as a contextual intrusion event along with core features to support analytic processes and events of malware activity to be dynamically linked into attacker activity threads.

*Key words: information security event, event correlation, process phasing, attacker activity thread, activity-attack graph.*

*Agishev S.V., Golikov I.O., Lebedev E.L.* Use of the degradation model of measuring instruments in evaluating the effectiveness of spacecraft preparation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 180–185.

The process of functioning of the subsystem of spacecraft preparation (technological operation) is analyzed, since the evaluation of the effectiveness of spacecraft preparation as a whole (taking into account a wide variety of factors) can be carried out by having models for evaluating individual technological operations.

Analytical dependences of the estimation of the moment and spectral-correlation characteristics are presented using algorithms for calculating the number of intersections of the trajectory of the telemetry process at specified levels. A method for detecting nonlinear changes in the probabilistic characteristics of the telemetric parameters is proposed, based on the registration of the number of intersections by the implementation of the process of given levels. A feature space is formed for distinguishing between processes with-distributions (Rayleigh, Maxwell) and Gauss.

*Key words: degradation model, measuring instrument, metrological failure, reliability.*

*Modeling and analysis of structural and functional reliability of complex multi-mode objects / E.N. Aleshin, V.N. Vorotyagin, A.N. Pavlov, D.A. Pavlov, A.B. Umarov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 186–194.*

At the stages of design, creation and application of complex objects to develop solutions aimed at increasing their stability, it is necessary to assess the indicators of structural and functional reliability, taking into account the involvement of various modes of operation. This article proposes the concept of a parametric genome of the structure of complex multi-mode objects to calculate the integral indicators of structural and functional reliability. The results of calculating the values of these indicators are given on the example of the attitude control system of a small spacecraft “Aist-2D”.

*Key words: complex multi-mode object; structural and functional reliability; functional integrity diagram; parametric genome.*

*Ananenko V.M., Golyakov A.D., Fominov I.V.* Application of the theory of experimental planning to evaluate the robustness of on-board navigation systems of aircraft // Proceedings of the

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 195–203.

A methodological approach to assessing the robustness of on-board navigation systems of aircraft operating under the influence of disturbing factors of various physical nature is presented. The theoretical aspects of G. Taguchi's methodology and the theory of experiment planning are presented, which allow us to formulate the main stages of the study of the sensitivity of navigation systems to the influence of disturbing factors. As a confirmation of the possibility of applying the theory of experimental planning to the problem of estimating the robustness of onboard navigation systems, an example of the influence of primary errors in determining the reference orbit on the determination of navigation parameters by the autonomous navigation system of the spacecraft implementing the "zenith" navigation method is given.

*Key words: robustness, theory of experiment planning, navigation system, aircraft, disturbing effects.*

*Bublikov M.A., Golikov I.O., Zavyalova G.M.* Experimental and theoretical studies of the heat-accumulating material of thermal accumulators of onboard systems of spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 204–209.

The paper presents a model of heating of thermoaccumulating materials, which allows to take into account the process of accumulation of thermal energy due to phase transformations. The use of this model allows us to obtain thermal heating curves and reasonably conduct a comparative analysis of the properties of various thermoaccumulating materials.

Experimental studies of heating of thermal storage materials based on gallium and paraffins were performed, as a result of which the advantage of gallium-containing thermal storage materials was proved. Good convergence of theoretical and experimental data is shown.

*Key words: heat storage material, gallium, paraffin, phase transformation, thermal curve.*

*Golovchinsky V.O., Golovchinskaya N.V., Fedorov A.V.* Forecasting the resource indicators of cyclically loaded elements in the units of the launch complex in the absence of defects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 210–217.

The results of a study on the evaluation and forecasting of the technical condition indicators of cyclically loaded elements in the units of the starting complex are presented. Approaches to the estimation of the residual resource of cyclically loaded elements are determined, taking into account the process of gradual accumulation of damage in their materials. A method for estimating the residual resource of cyclically loaded elements of SC aggregates in the absence of defects is proposed.

*Key words: launch complex, residual resource, damage, cyclic durability.*

Computational and experimental methodology for evaluating the criteria levels of resistance of computing tools to the effects of ultrashort pulses / O.V. Zherdev, A.Y. Onufrey, A.A. Orlov, A.V. Razumov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 218–224.

The article deals with the method of evaluating the criterion levels of resistance of computing tools to the effects of ultrashort pulses. The method is based on the analysis of previously conducted field experiments of the impact of SC EMI on computing tools and devices of computer technology and the formation of analytical dependences of the criterion levels of resistance of the aircraft on the parameters of SC EMI. The mechanisms of influence and the physical processes of interaction of the electromagnetic field with the semiconductor structures of the aircraft are decisive in this case.

*Key words: criterion level, ultrashort electromagnetic pulse, impact mechanisms, thermal and electrical breakdown, experimental studies, field experiment*

*Polyakov S.A., Stepenko A.N., Shapovalov D.V.* Method for determining the time of repair and preventive works on technological equipment by the criterion of minimum operating costs // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 225–235.

The analysis of existing approaches to determining the frequency of repair and maintenance work in the framework of technical maintenance of technological equipment is carried out. Taking into account the well-known methods for predicting the parameters of the technical state, an approach to the use of predictive information about the reliability of ventilation equipment and the cost of repair and maintenance and repair work is proposed to determine the time of system maintenance that ensures the minimum operating costs.

*Key words: maintenance, technical condition management, repair and preventive work, loss function, risk function.*

*Bashkirtsev V.P.* Actual psychological and pedagogical problems of the formation of the personality of a students in the conditions of limited pedagogical interaction in the higher military school // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 236–242.

The article deals with the psychological and pedagogical problem of the higher military school on the formation of the personality of a military modern limitations pedagogical interaction in the educational process. The author suggests measures to improve the mechanisms of pedagogical interaction of the teaching staff with students at the higher military school in the conditions of limited pedagogical interaction.

*Key words: the formation of personality, interaction of the teacher and students, limited interaction of the teacher with students, higher military school.*

*Inozemtseva L.A., Kuzhekin N.S.* Motivational and value content of the cognitive interest of students and cadets of the military educational institution // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 243–246.

The article deals with the actual problems of forming the cognitive interest of students and cadets through the development of its motivational and value content.

*Key words: cognitive interest, motive, the value of knowledge, motivational and value orientation.*

*Kuzhekin N.S., Myshko V.V., Chikurov V.A.* Planning of the volume of educational work of teaching staff of educational organizations of the Ministry of Defense of the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 247–253.

The experience of planning the volume of educational work of pedagogical workers of educational organizations of the Ministry of Defense of the Russian Federation is analyzed using the example of the department of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky, a model is presented to justify the calculation of the volume of the annual teaching load of teachers.

*Key words: volume of educational work, professorial Teaching Staff (faculty), weight coefficient.*

*Ogorodnikov V.P.* Artificial intelligence: a model of thinking and technique // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 254–260.

The article examines the essence of artificial intelligence as a model of thinking and technology. In this context, the difference between natural and artificial intelligence is revealed, as well as between natural and artificial consciousness. The main historical stages of the development and use of artificial intelligence are traced. The place of artificial intelligence in the "man-technique" system

is specified. The role of artificial intelligence systems in solving the major global problems of our time is being clarified.

*Key words: natural and artificial intelligence, artificial intelligence as a model of thinking, artificial intelligence as a technique, human-technology system, modern global problems.*

*Repyakh N.A., Hrustova A.N. Views A.L. Chizhevsky in the natural scientific direction of the philosophy of russian cosmism // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 261–265.*

The article discusses the cosmophilosophical ideas of the founder of Russian cosmobiology and heliobiology, Alexander Leonidovich Chizhevsky, which had a significant impact on the formation of the natural science direction of the philosophy of Russian cosmism.

*Key words: cosmism, science, differentiation and integration of sciences, outer space, environment, living organism, cosmic energy, solar activity.*

*Avseenko A.I., Dorofeev S.A., Kovalevsky R.I. Evaluation of energy saving indicators of military infrastructure facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 266–273.*

The article considers the definition of the efficiency indicator of the implementation of management decisions and the indicator that characterizes the qualitative composition of the main equipment of the object for planning organizational and technological solutions aimed at reducing power consumption and implementing the energy saving potential calculated within the framework of the potency procedure.

*Key words: technocenosis, energy saving potential, dynamic properties of energy saving potential, confidence interval, object efficiency indicator, artificial neural network, error back propagation method, associative element, weight coefficient.*

*Goncharov I.V., Novikov A.V., Timoshchuk A.S. Modern environmental solutions for the organization of water disposal of field camps formations and military units // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 274–278.*

The article discusses environmental solutions for the organization of water disposal on the example of a modern Autonomous field camp APL-500, accepted for supply in the Ministry of defense of the Russian Federation. The analysis of normative legal acts in the field of ensuring the environmental safety of troops in the field and, in particular, on issues of water disposal.

*Key words: environmental safety of troops, field conditions, engineering and technical support of environmental safety, regulatory and legal support of environmental safety.*

*Atarschikov A.N., Danelyan A.P., Novikov V.A. The method of deploying the space segment of the national system for monitoring the situation in the Arctic // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 279–285.*

The article considers a methodological approach to organizing the use of a system for rapid deployment of a low-orbit multi-satellite grouping of small spacecraft (MCA) to provide coverage of the situation in the Arctic. The classification and analysis of monitoring systems in the Arctic are presented. Possible ways of developing a national system for monitoring the situation in the Arctic are outlined.

*Key words: space situation monitoring system, operational deployment system of the ICA orbital grouping, non-standard ICA launch vehicles.*

*Ikonnikov O.V., Kazakhov B.D., Kolyagin D.A. Information subsystem for collection, processing and exchange radar information of the network structure // Proceedings of the Military Space*



academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 677. – P. 286–291.

The analysis of existing algorithms for processing radar information is carried out, and the problems of using traditional algorithms for processing radar information on a time scale close to real time are identified. The prerequisites for creating an information system of a network structure are revealed. A solution for delivering radar information to consumers without changing the hierarchical structure of the information support system is proposed. Recommendations for building the structure of a promising automated control system, its information subsystem, and their application in the AF are developed.

*Key words: algorithm, automated control system, network structure, information support, telemetry information.*

**Авсеенко Александр Иванович**, начальник 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 752-29-59, e-mail: avseenko@mail.ru

**Агишев Сергей Валинурович**, адъюнкт 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

**Алёхин Сергей Григорьевич**, начальник 55-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: vka-onr@mil.ru

**Алёшин Евгений Николаевич**, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: aleshin\_evgeny@inbox.ru

**Ананенко Владимир Михайлович**, старший преподаватель 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.

**Андрушкевич Дарья Владимировна**, старший преподаватель 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-87, andrushkevich.d@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) 347-96-42, e-mail: vka@mil.ru

**Атарщиков Александр Николаевич**, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (981) 896-81-71, e-mail: vka@mil.ru

**Башкирцев Виктор Павлович**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат педагогических наук, доцент; тел.: 8 (965) 008-99-71, e-mail: orbitarus@mail.ru

**Бирюков Денис Николаевич**, начальник 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: biryukov.d.n@yandex.ru

**Боровской Евгений Павлович**, научный сотрудник НИЦ войсковой части 13991 (164170, Россия, г. Мирный Архангельской обл.); тел.: 8 (921) 676-23-91.

**Бородюк Артем Александрович**, адъюнкт 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-36, e-mail: borodjuck@mail.ru

**Бубликов Максим Алексеевич**, курсант 1-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-11.

**Воротягин Валентин Николаевич**, адъюнкт 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: vorotyagin@rambler.ru

**Голиков Игорь Олегович**, доцент 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-11.

**Головчинская Наталья Владимировна**, научный сотрудник 142-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 839-30-57, e-mail: gvoseverples1@rambler.ru

**Головчинский Владимир Орестович**, старший научный сотрудник 142-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 581-97-09, e-mail: gvoseverples1@rambler.ru

**Голяков Алексей Дмитриевич**, 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.

**Гончаров Игорь Владимирович**, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: igor\_goncharov52@mail.ru

**Данелян Александр Петрович**, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, тел.: 8 (981) 896-81-71, e-mail: vka@mil.ru

**Дорофеев Сергей Алексеевич**, начальник кафедры засекречивающей аппаратуры связи филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» (236036, Россия, Калининград, Советский пр-т, 82); кандидат технических наук, доцент; 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

**Еремеев Игорь Юрьевич**, профессор 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Жбанов Константин Константинович**, адъюнкт 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (929) 115-47-71, e-mail: vka@mil.ru

**Жердев Олег Витальевич**, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат юридических наук; тел.: 8 (911) 945-1383, e-mail: vka@yandex.ru

**Завьялова Галина Михайловна**, доцент 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-11.

**Звонарев Виталий Валерьевич**, начальник 233-й лаборатории 23-го отдела 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 (911) 254-58-70.

**Иванов Роман Дмитриевич**, помощник начальника отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-95-19, e-mail: vka@mail.ru

**Иконников Олег Владимирович**, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел. 8 (911) 159-41-93.

**Иноземцева Людмила Александровна**, преподаватель 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 810-62-63, e-mail: lucilia@mail.ru

**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 (951) 664-50-26.

**Калинин Владимир Николаевич**, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, 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, почетный профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, ветеран космонавтики РФ; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@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; тел.: 8 (906) 262-32-59, e-mail: kan534@mail.ru

**Ковалевский Родион Игоревич**, офицер службы ЗГТ филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» (236036, Россия, Калининград, Советский пр-т, 82); тел.: 8 (911) 478-26-39, e-mail: rodik\_net@mail.ru

**Кокарев Алексей Сергеевич**, 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: askokarev@gmail.com

**Колягин Дмитрий Александрович**, докторант 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел. 8 (921) 658-51-28.

**Кохановский Андрей Геннадьевич**, доцент 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-26.

**Кужекин Николай Сергеевич**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-96, e-mail: vka@mil.ru

**Кузнецов Александр Борисович**, начальник 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-26.

**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, e-mail: vka@mil.ru

**Лебедев Сергей Леонидович**, сотрудник войсковой части 35565 (119602, Россия, Москва, Мичуринский пр-т, 70); тел.: 8 (495) 541-08-23, e-mail: lebedev244@mail.ru

**Левчук Анатолий Александрович**, 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: 79117613172@yandex.ru

**Лупашко Максим Николаевич**, начальник 533-го военного представительства МО РФ (191124, Россия, Санкт-Петербург, пл. Растрелли, 2); тел.: 8 (905) 283-04-47, e-mail: Vka\_24kaf@mil.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, заслуженный деятель науки РФ; тел.: 8 (812) 347-97-32.

**Маринин Владислав Михайлович**, курсант 573-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Матвеев Сергей Анатольевич**, адъюнкт 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-32.

**Медяников Даниил Олегович**, начальник 162-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 965-57-56, e-mail: vka@mil.ru

**Моргунов Владимир Михайлович**, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (952) 213-45-65, e-mail: k7asp1735@yandex.ru

**Мышко Василий Васильевич**, доцент 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

**Новиков Александр Валерьевич**, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел. 8 (812) 347-95-52, e-mail: salska@mail.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, действительный член Академии военных наук; тел.: 8 (911) 200-44-95, e-mail: vka@mil.ru

**Огородников Владимир Петрович**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор философских наук; профессор; тел.: 8 (951) 668-24-86; e-mail: ogovladimir@yandex.ru

**Октябрьский Владимир Валентинович**, старший преподаватель 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-51, e-mail: valentoss@gmail.com

**Онуфрей Андрей Юрьевич**, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 656-51-42, e-mail: vka@yandex.ru

**Орлов Антон Александрович**, научный сотрудник – бортовой оператор научно-исследовательской лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (929) 111-41-27 e-mail: vka@yandex.ru

**Островский Александр Сергеевич**, профессор кафедры информационной безопасности Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национального исследовательского университета) (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (499) 263-69-26, e-mail: aleksandr\_ostrovsky@mail.ru

**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 (812) 347-95-62, e-mail: pavlov62@list.ru

**Павлов Дмитрий Александрович**, преподаватель 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: dpavlov@mail.ru

**Передрий Александр Васильевич**, доцент 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доцент; тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Пименов Виктор Фёдорович**, старший научный сотрудник 221-й лаборатории 22-го отдела 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 (960) 280-23-77.

**Поляков Сергей Александрович**, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 720-84-18.

**Попов Александр Сергеевич**, старший научный сотрудник 231-й лаборатории 23-го отдела 2-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 (961) 806-26-58.

**Разумов Александр Владимирович**, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 785-28-51, e-mail: vka@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

**Сакулин Александр Николаевич**, доцент 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-36, e-mail: gusarskayaulica@yandex.ru

**Саламан Роман Сергеевич**, начальник лаборатории Центрального научно-исследовательского института Военно-воздушных сил (Министерства обороны Российской Федерации) (127083, Россия, Москва, Петровско-Разумовская аллея, 12а); тел.: 8 (926) 264-14-92, e-mail: wolf2007@yandex.ru

**Самохвалов Илья Константинович**, курсант 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: samik534@mail.ru

**Саниев Руслан Рифович**, адъюнкт 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Семенов Кирилл Владимирович**, начальник 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Семенюк Сергей Сергеевич**, заместитель начальника 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Соловьев Игорь Александрович**, старший научный сотрудник 341-й лаборатории 34-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

**Соловьева Маргарита Владимировна**, научный сотрудник 363-й лаборатории 36-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

**Степанов Игорь Викторович**, помощник начальника учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(911)223-86-59, e-mail: Vka\_24kaf@mil.ru

**Степенко Андрей Николаевич**, заместитель начальника академии по тылу – начальник отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук.

**Странадкин Руслан Николаевич**, адъюнкт 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (918) 412-56-35, e-mail: k7asp1735@yandex.ru

**Тимашов Павел Васильевич**, адъюнкт 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: tim\_p.v@mail.ru

**Тимофеев Владимир Васильевич**, преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (952) 285-4206, e-mail: Vka\_24kaf@mil.ru

**Тимошук Александр Сергеевич**, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: astim2@yandex.ru

**Трофимова Наталья Андреевна**, научный сотрудник 343-й лаборатории 34-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

**Умаров Александр Бахтиёрович**, адъюнкт 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: antropicier737@gmail.com

**Федоров Алексей Владимирович**, доцент факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО (197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверский пр-т, 49); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 925-18-86, e-mail: avfedorov@itmo.ru

**Фоминов Иван Вячеславович**, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-21.

**Холинов Иван Андреевич**, курсант 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: xolin.i.a@yandex.ru

**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

**Чикуров Виталий Александрович**, начальник 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

**Чунин Дмитрий Николаевич**, адъюнкт 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-31, e-mail: vka@mil.ru



**Шаповалов Дмитрий Викторович**, заместитель начальника академии по военно-политической работе – начальник отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук.

**Шемелов Владимир Александрович**, профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

**Шиловский Евгений Юрьевич**, адъюнкт 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Якимов Виктор Леонидович**, доцент 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-34, e-mail: yakim78@yandex.ru

**Яковлев Алексей Иванович**, 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) 347-96-42, e-mail: vka@mil.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.

**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

**Басыров Александр Геннадьевич**, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexanderbas@mail.ru

**Башкирцев Виктор Павлович**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-23-57.

**Бирюков Денис Николаевич**, начальник 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; e-mail: vka@mil.ru

**Гнидко Константин Олегович**, профессор 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (999) 532-71-82, e-mail: greeny598@yandex.ru

**Гончаренко Владимир Анатольевич**, профессор 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 242-01-19, e-mail: vlango@mail.ru

**Григорьев Андрей Николаевич**, начальник 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: Grig-AN@ya.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, профессор; тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: doronin52@mail.ru

**Еремеев Игорь Юрьевич**, профессор 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Какаев Виталий Викторович**, заместитель начальника управления – начальник отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук; тел.: 8 (995) 996-89-82.

**Козинков Игорь Александрович**, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: vka@mil.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

**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.

**Кунтурова Надежда Борисовна**, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: giz26@rambler.ru

**Миронов Андрей Николаевич**, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-74, e-mail: mirovov-anik@yandex.ru

**Назаров Андрей Вячеславович**, начальник 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

**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

**Павлов Александр Николаевич**, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: pavlov62@list.ru

**Разумов Александр Владимирович**, старший научный сотрудник научно-исследовательского 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 (921) 785-28-51, e-mail: vka@mil.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

**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 (911) 912-54-04, e-mail: sadin@yandex.ru

**Сазонов Константин Викторович**, начальник 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-54, e-mail: vka@mil.ru

**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.

**Хомоненко Анатолий Дмитриевич**, профессор 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; e-mail: vka@mil.ru

**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.