

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

**Выпуск 690**  
2024 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 воен. наук А. Н. Нестечук*

Члены редакционного совета:

- С. В. Буг** – *доктор пед. наук, проф.* (Михайловская военная артиллерийская академия);  
**В. П. Гаенко** – *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации*  
(12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации);  
**А. М. Гончаров** – *доктор воен. наук, проф.* (Национальный исследовательский  
центр «Курчатовский институт»);  
**М. А. Еремеев** – *доктор техн. наук, проф.* (Московский технологический университет);  
**А. В. Кузичкин** – *доктор техн. наук, проф.* (Научно-исследовательский институт телевидения);  
**А. В. Сержантов** – *доктор воен. наук, проф.* (Военная академия Генерального штаба  
Вооруженных Сил Российской Федерации);  
**Б. В. Соколов** – *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации*  
(Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук);  
**К. Г. Ставров** – *доктор техн. наук, проф.* (Государственный научно-исследовательский  
навигационно-гидрографический институт).

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, проф.*;  
**И. А. Готюр**, *доктор техн. наук, проф.*; **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, 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:  
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. 23.03.2024.  
Формат печатного листа 320×450/4.  
Уч.-печ. л. 84,00. Уч.-изд. л. 41,75  
Тираж 26 экз. Заказ 4148/103.  
Отпечатано в типографии  
Военно-космической академии  
имени А. Ф. Можайского

## СОДЕРЖАНИЕ

### СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Авксентьев А. А., Николаев Ю. А.* Метод наименьшего отрезка для расчета координат космического объекта по угловым расстояниям до звезд ..... 7
- Белов П. Ю., Мирошник К. С., Хомченков А. В.* Способ оптимального формирования фрейма канального уровня для агрегированного трафика в мультисервисной сети передачи данных по критерию минимума сквозной задержки ..... 15
- Володин Р. С., Тараканов М. Н., Цыбульник А. Н.* Методика расчета координат объектов наблюдения при комплексировании эллиптического и пеленгационного способа позиционирования ..... 25
- Горянский А. С., Карытко А. А., Лизан В. М., Петрич Д. О.* Оптимизация алгоритма оценки параметров движения космических объектов по совокупности измерений автоматизированной системой предупреждения опасных ситуаций .. 36
- Конищев В. С., Харченко А. В., Яшков С. А.* Имитационная модель обработки сигналов с расширением спектра в радиосистемах передачи информации с компенсацией помех в базисе дискретного косинусного преобразования ..... 48
- Лавров В. В., Лучкин Р. С., Немыкин О. И., Прохоров М. Е., Рындин Ю. Г., Тестов А. В.* Робастный алгоритм сегментации оптического изображения, формируемого в процессе наблюдения звездного неба ..... 60
- Махов Д. С., Шумбар А. В.* Перераспределение параметров радиоканалов многолучевой фазированной антенной решетки робототехнических комплексов для повышения устойчивости системы передачи информации ..... 72

### СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Доронин А. П., Новиков А. В., Петроченко В. М., Филиппёнок В. В.* Метод создания мезомасштабных полей искусственных аэрозольных образований верхнего яруса с целью регулирования условий образования и эволюции конвективных облаков ..... 79
- Рыжый Н. В.* Выбор рациональных участков размещения объектов методом аддитивной свертки критериев ..... 87

### ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Бирюков Д. Н., Захаров О. О., Шестаков И. А.* Подход к построению системы управления средствами аудита информационной безопасности при априорной неопределенности характеристик исследуемого объекта ..... 95

*Бирюков Д. Н., Лебедев С. Л., Руссу В. Ю.* Выбор способа представления функций исполняемого кода программ для формирования обучающей выборки ..... 102

*Нагибин Д. В., Платонов А. А., Сабиров Т. Р.* Методика идентификации реализованных в заказных интегральных схемах функционально-структурных спецификаций ..... 112

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

*Александров М. А., Минаков Е. П., Мищеряков А. В., Мищеряков С. В.* Метод оценивания вероятности пролета орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли над пространственно-временными областями ..... 121

*Арсеньев В. Н., Слатова Е. В.* Обеспечение требуемой вероятности выбора заданного объекта из множества наблюдаемых космическим аппаратом обзора околоземного космического пространства ..... 134

*Букирёв А. С., Ипполитов С. В., Савченко А. Ю., Яцечко М. И.* Функциональная модель информационно-преобразующих элементов комплексов бортового оборудования воздушных судов ..... 143

*Воронин О. И., Цветков А. В.* Методика формирования параметров системы поддержания работоспособности технических средств соединения Ракетных войск стратегического назначения в условиях фрактального потока неисправностей ..... 166

*Зубарев А. В., Карагодин В. В., Рыбаков Д. В.* Применение метода частотных характеристик для оценивания технического состояния силовых трансформаторов ..... 176

*Какаев В. В., Куликов С. В., Логунов С. В., Федоренко Д. С.* Методика определения материалов и долей их содержания на видимой поверхности безатмосферных небесных тел на основе анализа спектров отражения ..... 185

*Карагодин В. В., Рыбаков Д. В.* Метод оценивания работоспособности систем электроснабжения объектов наземной космической инфраструктуры ..... 194

*Карагодин В. В., Смирнов С. В., Хомич И. В.* Вариант построения адаптивной системы автоматического регулирования возбуждения бесщеточного синхронного генератора ..... 205

*Карытко А. А.* Метод коррекции оценок параметров движения групповых динамических объектов в автоматизированных системах предупреждения опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве на основе интерполяции фрагментов траектории движения группы ..... 215

- Козлов В. В., Коноплёв М. Д., Лагун А. В., Харченко В. А.* Синтез средств, обеспечивающих безопасное производство пуска ракет космического назначения ..... 225
- Конищев В. С., Мальцев Г. Н.* Потенциальная помехоустойчивость радиотехнических систем передачи информации в условиях нешумовых помех ..... 234
- Котьяшов Е. В., Куваев О. Л., Наговицына А. Н., Чернявский В. А.* Методический подход к определению рациональной структуры размещения пунктов приема информации перспективной космической геодезической системы ..... 240
- Миргородский А.Н., Мосягин Р.А., Моторин В.М., Сальников В.М.* Методика расчета остывания жидкости в подземных коммуникациях наземной космической инфраструктуры ..... 250
- Петухов А. И., Султанов А. Э.* Повышение точности моделирования продольных колебаний корпуса ракет-носителей с учетом характеристик жесткости топливных баков ..... 256

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

- Белошицкий А. В., Дедик Н. А., Мещерякова Е. И.* Подготовка офицеров-преподавателей военных вузов в системе переподготовки и повышения квалификации: психолого-педагогическая проблематика ..... 264
- Пастушков А. В., Прищеп В. Н., Северенко А. В.* Факторы, влияющие на результаты стрельбы из стрелкового оружия в условиях служебно-боевой деятельности военнослужащих вследствие применения физической нагрузки ..... 270
- Чебурков М. А., Шабиков Е. И.* Математическая модель подготовки обучающихся с учетом нелинейных и неинвариантных свойств образовательного процесса ..... 275

#### ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

- Огородников В. П.* Объективные и субъективные предпосылки развития ракетно-космической техники ..... 283
- Репях Н. А., Хрустова А. Н.* Судьба и творчество отечественного философа-космиста Николая Александровича Сетницкого ..... 293

#### ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

- Загруддинов Ю. А., Казимиров А. В., Скорик Е. А.* Способ оценивания мощности взрыва компонентов ракетного топлива на базе сжиженного природного газа ..... 302

## ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

<i>Кабанов Е. Л.</i> Проблемы развертывания и функционирования системы управления Коллективных миротворческих сил, пути их решения .....	307
<i>Кокшаров С. Н., Михеев О. Ю., Салтыков К. Б.</i> Методика определения рациональной численности временного органа управления организационно-технической системы военного назначения тактического звена .....	313
Рефераты статей .....	318
Сведения об авторах .....	328
Сведения о рецензентах .....	335

А. А. Авксентьев,  
кандидат технических наук, доцент;  
Ю. А. Николаев

## МЕТОД НАИМЕНЬШЕГО ОТРЕЗКА ДЛЯ РАСЧЕТА КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО УГЛОВЫМ РАССТОЯНИЯМ ДО ЗВЕЗД

Разработан метод, позволяющий рассчитать координаты космического объекта по угловым расстояниям до звезд. Изложена последовательность действий для выделения объекта и идентификации звезд. Получены зависимости, позволяющие рассчитать направляющие косинусы линии визирования объекта по угловым расстояниям от него до трех звезд, а также координаты объекта по двум непересекающимся линиям его визирования с различных ракурсов. Проведены сравнения точностей определения координат разработанным и известными методами.

Ключевые слова: метод наименьшего отрезка, координаты космического объекта, космический аппарат, линия визирования, ошибки измерений.

### ВВЕДЕНИЕ

Для решения большинства задач, связанных с полетами космических объектов (КО), требуется знание их навигационных параметров: вектора скорости, координат и момента времени, в который указанные параметры наблюдаются. К числу таких задач относятся: прогноз параметров движения, расчет срока активного существования, определение координат места падения и другие связанные с полетами КО задачи.

В ряде случаев навигационные параметры КО могут быть рассчитаны на борту объекта и переданы потребителям. Для этого на борту КО должна быть установлена аппаратура, принимающая информацию от навигационных спутников и передающая параметры движения центра масс объекта потребителям. На практике такое бывает не всегда.

Разработанный метод позволяет рассчитывать параметры движения КО, от которых не поступает информация об их параметрах движения. Метод является актуальным, поскольку потребность в таком расчете возникает достаточно часто.

Известен метод космической триангуляции, который позволяет рассчитывать навигационные параметры КО в аналогичных условиях [1, 2]. Но он более сложен в реализации и не предназначен для случая, когда получаемые направления линий визирования (ЛВ) космического объекта вследствие ошибок измерений лежат в различных плоскостях и не образуют треугольник.

Наиболее близким к описываемому является метод наименьшего отрезка между линиями визирования для расчета координат космического объекта [3]. Однако его точность зависит от точности ориентации космических аппаратов (КА), на которых установлены камеры наблюдения (КН). Описываемый метод свободен от этого недостатка, и это обуславливает его более высокую точность.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Имеются два КА: КА<sub>1</sub> и КА<sub>2</sub>. На борту КА<sub>1</sub> установлена камера наблюдения КН<sub>1</sub>, способная вырабатывать информацию о координатах изображений звезд и КО на матрице своей камеры. На КА<sub>2</sub> установлена КН<sub>2</sub> с аналогичными возможностями.

Требуется разработать метод расчета навигационных параметров КО в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) [4] с указанием времени, к которому они относятся.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Геометрическая связь координат изображений  $K_{11}$  и  $A_{11}$ , с направлениями на КО и звезду  $A$ , наблюдаемых в момент времени  $t_1$  на матрице КН<sub>1</sub>, показана на рис. 1.

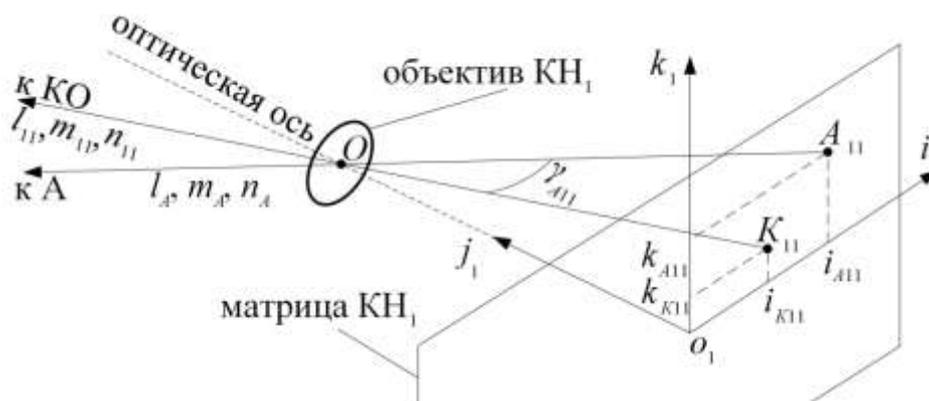


Рис. 1. Геометрическая связь координат изображений  $K_{11}$  и  $A_{11}$  с направлениями на космический объект КО и звезду  $A$

На рисунке обозначены:

$l_A, m_A, n_A$  и  $l_{11}, m_{11}, n_{11}$  – направляющие косинусы векторов, направленных в момент времени  $t_1$  от  $A_{11}$  к  $A$  и от  $K_{11}$  к КО в АГЭСК;

$o_1 i_1 j_1 k_1$  – приборная система координат КН<sub>1</sub> с матрицей в плоскости осей  $o_1 i_1$  и  $o_1 k_1$ ;

$i_{A11}, k_{A11}$  и  $i_{K11}, k_{K11}$  – координаты  $A_{11}$  и  $K_{11}$  в приборной системе координат КН<sub>1</sub>.

### 1. Выделение космического объекта на фоне звезд.

Для простоты описания и восприятия рассматривается простейший случай выделения КО. Он заключается в выделении одного КО, попавшего на фоне звезд в поле зрения КН.

Для выделения КО на фоне звезд КА стабилизируется в инерциальном пространстве. В таком режиме изображения звезд на ПЗС-матрице КН становятся неподвижными с точностью, определяемой ошибками стабилизации. Среди неподвижных звезд выделяется подвижный КО, который меняет свои координаты на матрице КН со скоростью, превышающей значение, соответствующее ошибкам стабилизации.

### 2. Идентификация звезд.

Идентификацией является установление соответствия между изображением звезды на матрице КН и координатами соответствующей этому изображению звезды. Такими координатами являются величины прямого восхождения  $\alpha$  и склонения  $\delta$ , которые указываются в каталогах, например, в каталоге звезд [5].

До идентификации заполняется матрица соответствия, каждая строка которой содержит характеристики одной из подходящих по яркости звезд. Подходящими являются звезды, яркость которых достаточна для их наблюдения с помощью установленных на КА<sub>1</sub> и КА<sub>2</sub> камер. В ячейках матрицы соответствия указываются величины  $\alpha$  и  $\delta$  звезд, полученные из каталога. Кроме того, в ячейки каждой строки вносятся уникальные признаки, которые отличают любую из подходящих звезд от остальных.

Уникальными могут быть различные по физической природе признаки, например, расстояния между изображениями звезд, углы между направлениями на них, яркость и цвет изображений звезд. В качестве уникального признака выберем квадраты расстояний от изображения идентифицируемой звезды до ближайших изображений других звезд. Основанием для такого выбора является сравнительная легкость расчета квадрата расстояния. Для измерения квадрата расстояния от  $A_{11}$  до  $B_{11}$  необходимо априорно навести КН<sub>1</sub> на звезду  $A$  так, чтобы в поле зрения КН оказалась звезда  $B$ . Требуется зафиксировать координаты  $i_{A_{11}}, k_{A_{11}}, i_{B_{11}}, k_{B_{11}}$  и внести в матрицу соответствия для строки звезды  $A$  квадрат расстояния:

$$(A_{11}B_{11})^2 = (i_{B_{11}} - i_{A_{11}})^2 + (k_{B_{11}} - k_{A_{11}})^2. \quad (1)$$

Аналогичные квадраты расстояний от  $A_{11}$  до следующих по удаленности изображений звезд вносятся в несколько следующих ячеек этой же строки. Если точность определения квадратов расстояний позволяет, то можно ограничиться внесением в строку двух квадратов расстояний до изображений следующих по удаленности к  $A_{11}$  звезд. Если уникальность не наблюдается, то для признаков необходимо предусмотреть третью ячейку в каждой строке матрицы соответствия, а если и этого мало, то четвертую и последующие.

С помощью матрицы соответствия определяются  $\alpha$  и  $\delta$  для трех попавших на матрицу КН изображений звезд. При идентификации звезд квадраты расстояний до ближайших изображений звезд на матрице КН сравниваются со значениями расстояний, внесенных в рассматриваемую строку матрицы соответствия. Расстояния до изображений КО исключаются из сравнения. Если для ближайших изображений звезд квадраты расстояний соответствуют табличным, то это означает, что исследуемое изображение идентифицировано. Для этого изображения, характеризуемого координатами на матрице КН, величины  $\alpha$  и  $\delta$  становятся известными.

Идентификация проводится с учетом допустимого отклонения квадратов расстояний между ближайшими звездами. Основной причиной отклонений является дискретность определения координат изображений на матрице КН.

Если в поле зрения КН попадают несколько КО, то необходимо использовать характеристики, которые являются уникальными для каждого объекта, например, яркость и цвет КО.

Выделение КО и идентификация звезд изложены в общих чертах, поскольку они не определяют сущность предлагаемого метода, но подтверждают возможность решения задач 1 и 2. В дальнейшем эти задачи считаются решенными.

### 3. Расчет направляющих косинусов линий визирования звезд.

Если известны значения  $\alpha_A$  и  $\delta_A$  для звезды  $A$ , то направляющие косинусы ее линии визирования в АГЭСК рассчитываются по формулам:

$$l_A = \cos \alpha_A \cos \delta_A, \quad m_A = \sin \alpha_A \cos \delta_A, \quad n_A = \sin \delta_A. \quad (2)$$

Аналогично вычисляются направляющие косинусы ЛВ всех звезд, включенных в матрицу соответствия.

### 4. Расчет прямого восхождения $\alpha_{K_{11}}$ и склонения $\delta_{K_{11}}$ космического объекта.

Прямое восхождение, склонение и направляющие косинусы линии визирования КО в отличие от аналогичных параметров звезд являются переменными величинами. Они рассчитываются на момент времени  $t_1$ , в который фиксируются координаты КО на матрице КН<sub>1</sub>.

Расчет основывается на равенстве двух выражений для косинуса угла  $\gamma_{A_{11}}$ , показанного на рис. 1. Косинус угла  $\gamma_{A_{11}}$  на момент  $t_1$  выражается сначала по теореме косинусов, а затем – по правилам векторной алгебры.

Поскольку оптическая ось перпендикулярна плоскости матрицы КН<sub>1</sub> и пересекает плоскость в начале приборной системы координат, то:

$$R_{OK_1} = \sqrt{F^2 + k_{K11}^2 + i_{K11}^2}, \quad (3)$$

$$R_{OA_1} = \sqrt{F^2 + k_{A11}^2 + i_{A11}^2}, \quad (4)$$

$$R_{A_1K_1} = \sqrt{(i_{A11} - i_{K11})^2 + (k_{A11} - k_{K11})^2}, \quad (5)$$

где  $R_{OK_1}, R_{OA_1}, R_{A_1K_1}$  – длины сторон  $OK_1, OA_1$  и  $K_1A_1$  треугольника  $OK_1A_1$ ;  
 $F$  – фокусное расстояние объектива КН<sub>1</sub>;  
 $i_{A11}, k_{A11}, i_{K11}, k_{K11}$  – координаты точек  $A_1$  и  $K_1$ .

Входящие в формулы (3)–(5) величины должны быть выражены в одинаковых единицах длины. Тогда по теореме косинусов рассчитывается численное значение

$$\cos \gamma_{A11} = \frac{F^2 + i_{K11}i_{A11} + k_{K11}k_{A11}}{\sqrt{(F^2 + i_{K11}^2 + k_{K11}^2)(F^2 + i_{A11}^2 + k_{A11}^2)}}. \quad (6)$$

По правилам векторной алгебры значение (6) выражается через скалярное произведение направляющих косинусов:

$$l_A l_{11} + m_A m_{11} + n_A n_{11} = \cos \gamma_{A11}, \quad (7)$$

где  $l_{11}$  – проекция орта ЛВ КО на ось ОХ АГЭСК,  $l_{11} = \cos \alpha_{K11} \cos \delta_{K11}$ ;  
 $m_{11}$  – проекция орта ЛВ КО на ось ОУ АГЭСК,  $m_{11} = \sin \alpha_{K11} \cos \delta_{K11}$ ;  
 $n_{11}$  – проекция орта ЛВ КО на ось ОZ АГЭСК,  $n_{11} = \sin \delta_{K11}$ .

С учетом (7) и рассчитанных аналогично соотношениям (2) направляющих косинусов ЛВ звезд  $A, B$  и  $C$  получается следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} l_A \cos \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} + m_A \sin \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} + n_A \sin \delta_{K11} &= \cos \gamma_{A11}, \\ l_B \cos \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} + m_B \sin \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} + n_B \sin \delta_{K11} &= \cos \gamma_{B11}, \\ l_C \cos \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} + m_C \sin \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} + n_C \sin \delta_{K11} &= \cos \gamma_{C11}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $l_B, m_B, n_B, l_C, m_C, n_C$  – направляющие косинусы линий визирования звезд  $B$  и  $C$ ;  
 $\alpha_{K11}$  и  $\delta_{K11}$  – восхождение и склонение КО, наблюдаемое КН<sub>1</sub> в момент времени  $t_1$ ;  
 $\cos \gamma_{B11}$  – косинус угла между линиями визирования  $KO$  и  $B$ , вычисляемый аналогично (6);  
 $\cos \gamma_{C11}$  – косинус угла между линиями визирования  $KO$  и  $C$ , вычисляемый аналогично (6).

Если обе части первого уравнения системы (8) умножить на  $-l_B$ , а обе части второго уравнения системы (8) умножить на  $l_A$  и затем отдельно сложить левые и правые части, то получится следующее уравнение:

$$(l_A m_B - l_B m_A) \sin \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} + (l_A n_B - l_B n_A) \sin \delta_{K11} = l_A \cos \gamma_{B11} - l_B \cos \gamma_{A11}, \quad (9)$$

Если обе части первого уравнения системы (8) умножить на  $-l_C$ , а обе части третьего уравнения системы (8) умножить на  $l_A$  и затем отдельно сложить левые и правые части, то получится уравнение

$$(l_A m_C - l_C m_A) \sin \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} + (l_A n_C - l_C n_A) \sin \delta_{K11} = l_A \cos \gamma_{C11} - l_C \cos \gamma_{A11}, \quad (10)$$

Аналогичным путем из уравнений (9) и (10) исключается слагаемое с неизвестным произведением  $\sin \alpha_{K11} \cos \delta_{K11}$ . Получается уравнение с одним неизвестным, из которого рассчитывается

$$\sin \delta_{K11} = \frac{(l_C m_A - l_A m_C)(l_A \cos \gamma_{B11} - l_B \cos \gamma_{A11}) + (l_A m_B - l_B m_A)(l_A \cos \gamma_{C11} - l_C \cos \gamma_{A11})}{(l_A n_C - l_C n_A)}. \quad (11)$$

Поскольку  $-90^\circ \leq \delta_{K11} \leq 90^\circ$ , то

$$\delta_{K11} = \arcsin(\sin \delta_{K11}) \quad (12)$$

и

$$\cos \delta_{K11} = \sqrt{1 - \sin^2 \delta_{K11}}. \quad (13)$$

Значения  $\sin \delta_{K11}$  и  $\cos \delta_{K11}$ , рассчитанные в соответствии с (11) и (13), подставляются в уравнение (10). В результате получается

$$\sin \alpha_{K11} = \frac{l_A \cos \gamma_{C11} - l_C \cos \gamma_{A11} - (l_A n_C - l_C n_A) \sin \delta_{K11}}{(l_A m_C - l_C m_A) \cos \delta_{K11}}. \quad (14)$$

Величина  $\cos \alpha_{K11}$  определяется из любого уравнения системы (8), например из первого:

$$\cos \alpha_{K11} = \frac{\cos \gamma_{A11} - m_A \sin \alpha_{K11} \cos \delta_{K11} - n_A \sin \delta_{K11}}{l_A \cos \delta_{K11}}. \quad (15)$$

Величина  $\alpha_{K11}$  определяется с помощью значений (14) и (15) следующим образом. Если  $\cos \alpha_{K11} \geq 0$ , то

$$\alpha_{K11} = \arcsin(\sin \alpha_{K11}), \quad (16)$$

а если  $\cos \alpha_{K11} < 0$ , то

$$\begin{cases} \alpha_{K11} = \arcsin(\sin \alpha_{K11}) \pm \pi, \\ \frac{\pi}{2} < \alpha_{K11} < \frac{3\pi}{2}. \end{cases} \quad (17)$$

## 5. Расчет направляющих косинусов линии визирования КО с помощью КН<sub>1</sub> на момент времени $t$ .

Визирование КО с помощью КН<sub>1</sub> и КН<sub>2</sub>, находящихся на КА<sub>1</sub> и КА<sub>2</sub>, производится периодически. Моменты визирования КО с бортов КА<sub>1</sub> и КА<sub>2</sub> в общем случае не совпадают. Пусть на момент времени  $t$  определены прямое восхождение  $\alpha_{K2}$  и склонение  $\delta_{K2}$  КО, полученные с помощью КН<sub>2</sub>, находящейся на борту КА<sub>2</sub>. Для расчета координат КО необходимо рассчитать прямое восхождение  $\alpha_{K1}$  и склонение  $\delta_{K1}$  КО, полученные с помощью КН<sub>1</sub> на момент времени  $t$ .

Пусть визирование КО с помощью КН<sub>1</sub> проведено на моменты времени, из которых ближайшими к  $t$  являются  $t_1$  и  $t_2$ . В соответствии с (4) на моменты  $t_1$  и  $t_2$  рассчитываются  $\alpha_{K11}$ ,  $\delta_{K11}$  и  $\alpha_{K12}$ ,  $\delta_{K12}$ . На момент времени  $t$  их значения определяются путем интерполяции:

$$\alpha_{K1} = \alpha_{K11} + \frac{\alpha_{K12} - \alpha_{K11}}{t_2 - t_1} (t - t_1), \quad \delta_{K1} = \delta_{K11} + \frac{\delta_{K12} - \delta_{K11}}{t_2 - t_1} (t - t_1). \quad (18)$$

Направляющие косинусы линий визирования КО рассчитываются аналогично (2):

$$l_1 = \cos \alpha_{K1} \cos \delta_{K1}, \quad m_1 = \sin \alpha_{K1} \cos \delta_{K1}, \quad n_1 = \sin \delta_{K1}; \quad (19)$$

$$l_2 = \cos \alpha_{K2} \cos \delta_{K2}, \quad m_2 = \sin \alpha_{K2} \cos \delta_{K2}, \quad n_2 = \sin \delta_{K2}, \quad (20)$$

где  $l_1, m_1, n_1$  – направляющие косинусы ЛВ КО с борта КА<sub>1</sub> в АГЭСК на момент времени  $t$ ;

$l_2, m_2, n_2$  – направляющие косинусы ЛВ КО с борта КА<sub>2</sub> в АГЭСК на момент времени  $t$ .

### 6. Расчет координат КО.

С помощью полученных направляющих косинусов составляются параметрические уравнения ЛВ КО с бортов КА<sub>1</sub> и КА<sub>2</sub> [6]:

$$X_1 = X_{10} + l_1 p_1, \quad Y_1 = Y_{10} + m_1 p_1, \quad Z_1 = Z_{10} + n_1 p_1; \quad (21)$$

$$X_2 = X_{20} + l_2 p_2, \quad Y_2 = Y_{20} + m_2 p_2, \quad Z_2 = Z_{20} + n_2 p_2, \quad (22)$$

где  $X_{10}, Y_{10}, Z_{10}$  – координаты КА<sub>1</sub> на момент определения  $l_1, m_1, n_1$ ;

$X_{20}, Y_{20}, Z_{20}$  – координаты КА<sub>2</sub> на момент определения  $l_2, m_2, n_2$ ;

$p_1, p_2$  – свободные параметры, принадлежащие множеству действительных чисел.

Если бы уравнения (21) и (22) точно описывали линии визирования, то координаты КО определялись бы координатами точки пересечения ЛВ. Однако существование ошибок измерений и вычислений приводит к тому, что прямые (21) и (22) сближаются, но не пересекаются. Рассчитаем  $p_1 = p_1^*$  и  $p_2 = p_2^*$ , при которых ЛВ (21) и (22) сближаются на минимальное расстояние.

Квадрат расстояния между любой точкой ЛВ (21) и любой точкой ЛВ (22) выражается следующим образом:

$$R^2 = (X_{20} - X_{10} + l_2 p_2 - l_1 p_1)^2 + (Y_{20} - Y_{10} + m_2 p_2 - m_1 p_1)^2 + (Z_{20} - Z_{10} + n_2 p_2 - n_1 p_1)^2. \quad (23)$$

Минимумы  $R$  и  $R^2$  достигаются при значениях  $p_1^*$  и  $p_2^*$ , которые определяются как корни системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{dR^2}{dp_1^*} = 0, \\ \frac{dR^2}{dp_2^*} = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Откуда следует значение

$$p_2^* = \frac{(l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2)[l_1(X_{20} - X_{10}) + m_1(Y_{20} - Y_{10}) + n_1(Z_{20} - Z_{10})]}{1 - (l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2)^2} - \frac{l_2(X_{20} - X_{10}) + m_2(Y_{20} - Y_{10}) + n_2(Z_{20} - Z_{10})}{1 - (l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2)^2}. \quad (25)$$

Величина  $p_1^*$  рассчитывается путем подстановки  $p_2^*$  из (25) в следующее уравнение:

$$p_1^* = l_1(X_{20} - X_{10}) + m_1(Y_{20} - Y_{10}) + n_1(Z_{20} - Z_{10}) + p_2^*(l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2). \quad (26)$$

С помощью подстановок  $p_1^*$  и  $p_2^*$  в уравнения (21) и (22) определяются  $X_1^*, Y_1^*, Z_1^*$  и  $X_2^*, Y_2^*, Z_2^*$ , которые являются координатами крайних точек наименьшего отрезка между рассматриваемыми ЛВ.

При равенстве ошибок определения  $X_1^*, Y_1^*, Z_1^*$  и  $X_2^*, Y_2^*, Z_2^*$ , а также нормальных законах их распределения наиболее правдоподобными координатами КО являются координаты середины наименьшего отрезка между линиями визирования:

$$X = 0,5(X_1^* + X_2^*), \quad Y = 0,5(Y_1^* + Y_2^*), \quad Z = 0,5(Z_1^* + Z_2^*). \quad (27)$$

Если необходимо определить скорость КО, то координаты (27) рассчитываются для нескольких моментов времени и аппроксимируются зависимостями, от которых находятся производные по времени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов подтверждают работоспособность рассматриваемого метода. Безусловное подтверждение наблюдается в случаях, когда измерительные приборы КА работают безошибочно. Тогда полученные в результате расчетов координаты КО совпадают с заданными.

В качестве примера приведем результаты, полученные при следующих координатах КА<sub>1</sub>, КА<sub>2</sub> и КО в АГЭСК:

- для КА<sub>1</sub>:  $X_{10} = 42164200,0$  м,  $Y_{10} = 0$ ,  $Z_{10} = 0$ ;
- для КА<sub>2</sub>:  $X_{20} = 42164197,1679091$  м,  $Y_{20} = -15453,9860998521$  м,  $Z_{20} = 0$ ;
- для КО:  $X_0 = 42364199,2886189$  м,  $Y_0 = -7763,64509376471$  м,  $Z_0 = 0$ .

Заданные координаты соответствуют расположению КА<sub>1</sub>, КА<sub>2</sub> и КО в окрестности геостационарной орбиты.

По разработанному методу были получены практически совпадающие значения свободных параметров (25) и (26):  $p_2^* = 200149,917894544$  м и  $p_1^* = 200149,917894544$  м, а также незначительные отличия полученных координат КО (27) от заданных:  $X - X_0 = 3,6 \cdot 10^{-12}$  м,  $Y - Y_0 = 0$  и  $Z - Z_0 = 0$ .

С точностью до ошибок округлений полученные координаты совпали с заданными. К такому же выводу привели результаты расчетов, выполненные при других расположениях КА<sub>1</sub>, КА<sub>2</sub> и КО.

Побудительным мотивом для разработки изложенного метода явилась зависимость ошибок координат КО, определяемых с помощью известного метода [3], от погрешности ориентации КА. При неточности ориентации КА, составляющей  $0,1^\circ$ , ошибки расчетов координат КО, находящихся на расстоянии 100 км от КА, могут достигать 175 м.

Ошибки изложенного в данной статье метода свободны от влияния неточной ориентации КА. Абсолютные ошибки изложенного метода зависят от погрешности направления ЛВ  $\varepsilon$ , от расстояния до космического объекта  $r$  и от угла между линиями визирования  $\beta$ . В табл. 1 представлены приведенные ошибки, полученные при одинаковых расстояниях  $r$  от КО до каждого из двух применяемых КА.

Таблица 1

Приведенные ошибки метода наименьшего отрезка

$\beta$ , град	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180
$\Delta$ , $10^{-4} \text{ м} / \varepsilon r$	33,2	16,8	11,3	8,54	6,89	5,82	4,53	3,80	3,36	3,10	2,95	2,91

Для пересчета представленных в таблице приведенных ошибок в абсолютные выбирается значение  $\Delta$ , соответствующее углу  $\beta$  между линиями визирования, умножается на расстоя-

ние  $r$  в метрах и на выраженную в угловых минутах погрешность направления ЛВ  $\varepsilon$ . Получаемая абсолютная ошибка выражается в метрах. Если  $\varepsilon$  является максимальной ошибкой, то и получаемая абсолютная ошибка тоже является максимальной. В промежутках между представленными в табл. 1 значениями используется интерполяция.

Например, для аппаратуры, способной с максимальной ошибкой 0,1 угловой минуты определить направление линий визирования на КО, находящийся от каждого из КА на расстоянии 100 км, при угле  $\beta = 80^\circ$ , положение центра масс объекта определяется с максимальной ошибкой 4,5 м.

При определении координат КО методом триангуляции некомпланарность линий визирования не учитывается. Возникающая от этого дополнительная ошибка при условиях, описанных выше, составляет величину до 2,9 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствован метод, позволяющий рассчитывать координаты космического объекта с использованием наименьшего отрезка между линиями визирования КО. При реализации метода:

- на фоне звезд выделяется космический объект;
- идентифицируются три ближайшие к КО звезды и определяются  $\alpha_{K11}, \delta_{K11}$  и  $\alpha_{K12}, \delta_{K12}$  КО;
- рассчитываются направляющие косинусы линий визирования КО с двух ракурсов на один и тот же момент времени;
- определяются координаты крайних точек наименьшего отрезка между двумя линиями визирования;
- вычисляются координаты и вектор скорости КО в АГЭСК.

Работоспособность метода подтверждена результатами расчетов. Расчитаны значения ошибок, получаемых при его применении.

Сравнение с аналогичными известными методами приводит к выводам о меньшей трудоемкости и более высокой точности разработанного метода. Он может быть полезен при расчетах координат и вектора скорости космических объектов.

## Список используемых источников

1. *Половников В. И., Скутницкий В. М.* Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции: моногр. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 123 с.
2. *Половников В. И.* Метод высокоточной космической триангуляции // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 638. – С. 5–8.
3. *Авксентьев А. А.* Метод наименьшего отрезка между линиями визирования для расчета координат космического объекта // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского». – 2022. – Вып. 682. – С. 21–27.
4. *Власов С. А., Мамон П. А.* Теория полета космических аппаратов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 435 с.
5. Морской астрономический альманах ИПА РАН, 2019–2020 / отв. ред. Г. А. Космодамианский. – 348 с. – URL: <http://www.astromyth.ru/Astronomy/Constellations Schema.htm> (дата обращения: 20.02.2024).
6. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., испр. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.

П. Ю. Белов<sup>1</sup>,

доктор технических наук;

К. С. Мирошник<sup>2</sup>;

А. В. Хомченков<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Военная академия Ракетных войск стратегического назначения  
имени Петра Великого, г. Балашиха Московской обл.

## СПОСОБ ОПТИМАЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ФРЕЙМА КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ ДЛЯ АГРЕГИРОВАННОГО ТРАФИКА В МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА СКВОЗНОЙ ЗАДЕРЖКИ

В статье рассматривается способ, который может быть использован в пакетных телекоммуникационных сетях для минимизации сквозной задержки при передаче мультиплексированного трафика за счет оптимизации размера пакета и размещения в одном фрейме канального уровня нескольких пакетов сетевого уровня.

Ключевые слова: детерминированное сетевое исчисление, Ethernet фрейм, телекоммуникационный трафик, сквозная задержка.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ информационного обмена в мультисервисных сетях передачи данных позволяет сделать вывод, что имеет место значительное количество Ethernet фреймов существенно меньших чем 1500 байт максимально возможного размера. Как известно [1], использование фреймов маленького размера приводит к появлению большого количества избыточной служебной информации в объеме 26 байт на каждый фрейм, где преамбула составляет 7 байт, начальный разделитель фрейма – 1 байт, MAC-адрес назначения – 6 байт, MAC-адрес источника – 6 байт, тип сетевого протокола – 2 байта, проверочная последовательность фрейма – 4 байта. Также нужно учесть межпакетный разрыв (интервал), соответствующий 12 байтам. Это приводит к неэффективному использованию пропускной способности сети. С другой стороны, когда размер полезной части слишком большой по отношению к служебной части, это приводит к существенному увеличению задержки при передаче низкоскоростного трафика, в связи с необходимостью длительного накопления данных на полноразмерный фрейм и длительного приема всего фрейма в промежуточных узлах.

Также известно, что Ethernet фрейм предназначен для передачи одного пакета данных сетевого уровня от одного узла к другому, но существуют механизмы объединения, например, нескольких IP пакетов для передачи по Ethernet:

1) протоколы мультиплексирования пакетов, которые обычно добавляют заголовок или маркеры, чтобы указать границы каждого пакета внутри кадра Ethernet. Это позволяет получателю эффективно извлекать и декодировать каждый пакет. Некоторые примеры протоколов мультиплексирования пакетов включают MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) и PPP (*Point-to-Point Protocol*);

2) VLAN технология, позволяющая разделить одну физическую сеть на несколько виртуальных сетей. Каждая виртуальная сеть имеет свой идентификатор VLAN (VLAN ID), который добавляется в заголовок фрейма Ethernet. Это позволяет сетевому оборудованию, такому как коммутаторы, правильно маршрутизировать и пересылать фреймы Ethernet внутри определенного VLAN. В случае использования VLAN, можно настроить виртуальную сеть таким образом, чтобы она поддерживала передачу нескольких IP пакетов в одном Ethernet фрейме.

Однако данные подходы к формированию одного фрейма из нескольких IP пакетов не учитывают влияние размера Ethernet фрейма на показатель сквозной задержки, а направлены на обеспечение функциональности.

Все это приводит к увеличению показателя сквозной задержки и превышению требований к качеству обслуживания (QoS) при передаче данных и обуславливает необходимость использования при обеспечении качества обслуживания агрегированного трафика технических решений, способных пакетировать входной поток с оптимальным размером Ethernet фрейма по критерию минимума сквозной задержки.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ АГРЕГИРОВАННЫХ ДАННЫХ

Учитывая необходимость обеспечения минимума сквозной задержки для построения математической модели сети передачи данных, была использована теория детерминированного сетевого исчисления [2, 4], успешно применяемая для решения подобного класса задач.

Сетевое исчисление [3] (англ., *Network Calculus*) – это совокупность математических результатов, которые позволяют исследовать граничные значения характеристик функционирования таких сложных технических систем, как сети связи, цифровые электрические цепи, конкурирующие программы и др. Сетевое исчисление дает теоретическую основу для анализа гарантированной производительности телекоммуникационных пакетных сетей, в отличие от теории массового обслуживания, оперирующей в основном со средними значениями показателей. Основная идея теории детерминированного сетевого исчисления состоит в описании пульсирующего входного  $A(t)$  и выходного  $A'(t)$  потоков кусочно-линейными функциями поступления  $\alpha(t)$  и обслуживания  $\beta(t)$ , и в вычислении на их основе максимальной сквозной задержки  $d_{\max}$  этих потоков (рис. 1).

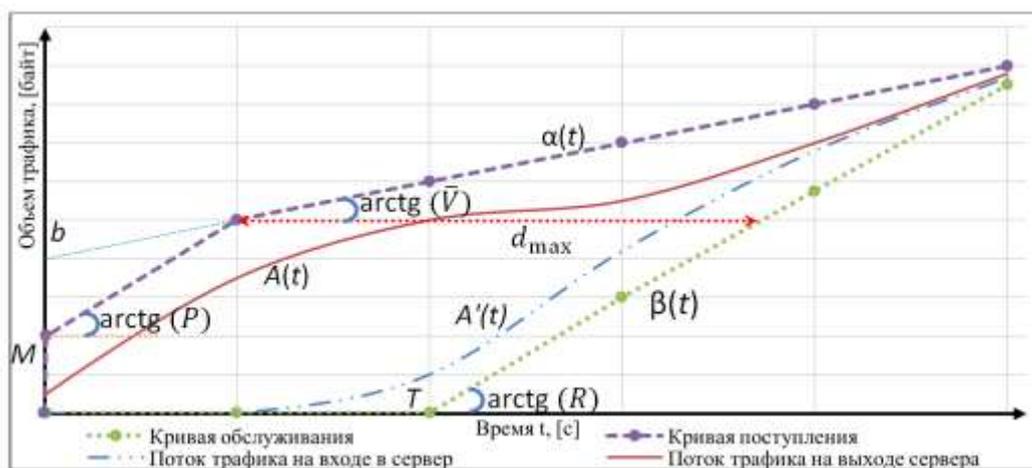


Рис. 1. Основные элементы алгебраической ветви детерминированного сетевого исчисления

Алгебраическое детерминированное сетевое исчисление базируется на  $\min+$  алгебре. Основные операции  $\min+$  алгебры и их свойства приведены и доказаны в [2, 4]. В статье для построения математической модели передачи агрегированных данных использованы следующие  $\min+$  алгебраические операции:

– агрегирование

$$(f \oplus g)(t) = f(t) + g(t);$$

– свертка

$$(f \otimes g)(t) = \inf_{0 \leq u \leq t} \{f(t-u) + g(u)\},$$

где  $\inf$  – инфимум (максимум всех минорант множества);  
– обратная свертка

$$(f \oslash g)(d) = \sup_{u \geq 0} \{f(d+u) - g(u)\},$$

где  $\sup$  – супремум (минимум всех мажорант множества);  
– остаток (поточечная разность)

$$(f \ominus g)(t) = f(t) - g(t).$$

При построении математической модели для получения кривой поступления входного трафика вычисляется суммарная средняя скорость всего агрегированного потока и определяется бёрстность (максимальный всплеск, коэффициент пачечности трафика) [2]. При этом под кривой поступления трафика понимают функцию от времени, описывающую зависимость суммарного количества поступивших данных для потока с побитовой скоростью [2] и имеющую вид (рис. 1)

$$\alpha(t) = \min\{M + Pt, \bar{V}_{\text{общ}} t + b\}, \quad (1)$$

где  $M$  – максимальный размер Ethernet фрейма в потоке;  
 $P$  – пиковая скорость потока;  
 $b$  – допустимая бёрстность потока, определяемая произведением  $M$  на количество микропотоков в агрегате;  
 $\bar{V}_{\text{общ}}$  – устойчивая средняя скорость потока.

Далее на основании данных, полученных от сервера контроля информационного обмена, рассчитываются параметры кривой остаточного обслуживания всех сетевых устройств на маршруте следования агрегированного трафика.

Для построения кривой остаточного обслуживания на маршруте следования агрегата трафика необходимо построить кривые поступления потоков (кросспотоков), проходящих через телекоммуникационное оборудование на пути анализируемого агрегата трафика ( $\alpha^{\mathbb{F}_n}(t)$ , где  $\mathbb{F}$  – агрегат кросспотока, а  $n$  – количество агрегатов), а также кривые обслуживания этого телекоммуникационного оборудования.

Кривая обслуживания задается параметрами  $R$  (скоростью обработки трафика) и  $T$  (максимальной задержкой бит потока в устройстве) и имеет вид [3]

$$\beta(t) = R(t-T)^+ = \begin{cases} R(t-T), & \text{если } t > T; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

После нахождения кривых поступления трафика для всех кросспотоков и кривых обслуживания телекоммуникационного оборудования на маршруте следования агрегата трафика необходимо найти кривые остаточного обслуживания этих устройств обработки трафика  $S$  путем нахождения поточечной разности кривых обслуживания оборудования и суммы всех агрегатов кросспотоков проходящих через него [3]:

$$\beta_{\langle S \rangle}^{\text{ост.об.}} = \beta_{\langle S \rangle} \ominus (\alpha^{\mathbb{F}_0} \oplus \dots \oplus \alpha^{\mathbb{F}_n}) = \beta_{\langle S \rangle} \ominus \left( \bigoplus_{i=0}^n \alpha^{\mathbb{F}_i} \right), \quad (3)$$

где  $\beta_{\langle S \rangle}^{\text{ост.об.}}$  – кривая остаточного обслуживания устройства обработки трафика  $S$  на маршруте следования агрегата;  
 $\beta_{\langle S \rangle}$  – кривая обслуживания устройства обработки трафика  $S$  на маршруте следования агрегата;  
 $\alpha^{\mathbb{F}_n}$  – кривая поступления кросспотока на маршруте следования агрегата трафика;  
 $n$  – количество кросспотоков, проходящих через устройство  $S$ ;  
 $\ominus$  – поточечная разность;  
 $\oplus$  – поточечная сумма.

Затем необходимо произвести  $\min+$  свертку [3] полученных кривых остаточного обслуживания  $\beta_{\langle s \rangle}^{\text{ост.об.}}$  всех обслуживаемых устройств на пути следования агрегата:

$$\beta_{\text{общ}}^{\text{ост.об.}} = \bigotimes_{i=1}^m \beta_i^{\text{ост.об.}}, \quad (4)$$

где  $\beta_{\text{общ}}^{\text{ост.об.}}$  – кривая остаточного обслуживания, предоставляемая сетью связи для целевого агрегата трафика;

$\beta_i^{\text{ост.об.}}$  – кривая остаточного обслуживания устройства обработки трафика на маршруте следования агрегата;

$m$  – количество устройств обработки трафика на маршруте следования агрегата.

В сетевом исчислении для приведенных выше видов кривой поступления (1) и кривой вида «скорость–задержка» (кривая обслуживания) (2) известна формула вычисления максимальной задержки битового потока в узле [4]:

$$d_{\text{max}} = \left( M + \frac{b - M}{P - \bar{V}_{\text{общ}}} (P - R)^+ \right) / R + T. \quad (5)$$

Однако в формуле (5) не учтено время задержки на формирование одного Ethernet фрейма, которое может быть определено как отношение размера фрейма (который состоит из размера полезной части фрейма  $L_{\text{пл}}$  и размера служебной части фрейма  $L_{\text{сл}}$ ) к скорости обработки трафика устройством:

$$T_{\text{форм}} = (L_{\text{пл}} + L_{\text{сл}}) / R. \quad (6)$$

Также не учтено возрастание пиковой скорости потока  $P$  при использовании фреймов маленького размера, из-за увеличения избыточности, вызванной появлением большего количества служебных данных. Учесть данное увеличение  $P$  возможно введением коэффициента

$$1 + L_{\text{сл}} / L_{\text{пл}}. \quad (7)$$

Таким образом, с учетом (6) и (7) выражение (5) примет вид

$$d_{\text{max}} = \frac{M + \frac{b - M}{(1 + \frac{L_{\text{сл}}}{L_{\text{пл}}})P - R} \left( (1 + \frac{L_{\text{сл}}}{L_{\text{пл}}})P - R \right)^+}{R} + T + \frac{L_{\text{пл}} + L_{\text{сл}}}{R}. \quad (8)$$

Целевая функция (8) является математической моделью, описывающей максимальную сквозную задержку в процессе передачи агрегированного пакетного трафика. График функции представлен на рис. 2.

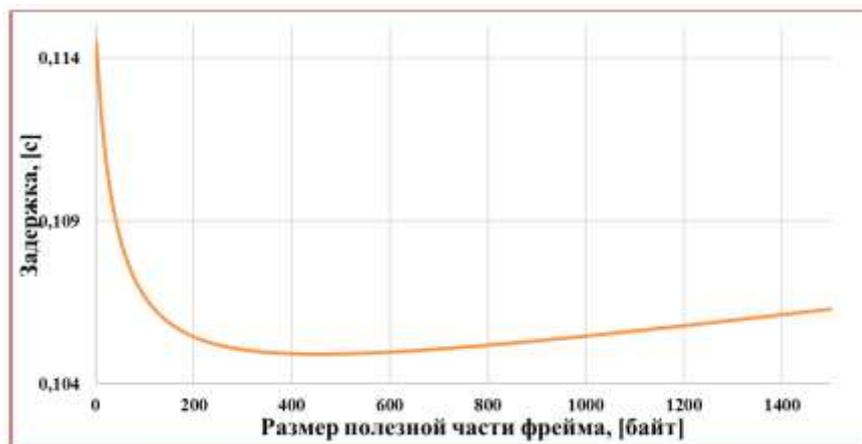


Рис. 2. Зависимость максимальной сквозной задержки от размера полезной части фрейма при передаче агрегированного потока

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Анализ выражения (8) на предмет существования первой производной по  $L_{пл}$  и графика функции (рис. 2) позволяет сделать вывод о существовании экстремума. В этом случае поиск решения для вычисления оптимального размера полезной части Ethernet фрейма сводится к нахождению значения  $L_{пл}$ , при котором первая производная выражения (8) равна нулю. В результате громоздких алгебраических преобразований получено решение вида

$$L_{пл} = \frac{\sqrt{(P-r)bPL_{сл} - (M(R-r) + b(P-R))PL_{сл} - PL_{сл}}}{P-r} \quad (9)$$

Однако из [4] следует, что полученная выше кривая остаточного обслуживания узлов телекоммуникационного оборудования для интересующего целевого агрегата трафика не всегда будет вида «скорость–задержка». При большом количестве сетевых устройств и кросс-потоков кривая остаточного обслуживания будет иметь вид многоступенчатой псевдоаффинной кривой. В данном случае необходимо привести кривую остаточного обслуживания, полученную для интересующего агрегата трафика к виду «скорость–задержка» путем усреднения. Для этого сложим все значения кривой не равные 0 и разделим на количество таких значений, получив среднюю скорость обслуживания. Подставив такую скорость в выражение (2), получим усредненную кривую остаточного обслуживания узлов телекоммуникационного оборудования для интересующего целевого агрегата трафика (рис. 3). Подставив ее параметры в выражение (9), можно найти оптимальное решение.

Указанный подход позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты и время нахождения оптимального решения по сравнению с полным перебором размера полезной части Ethernet фрейма.

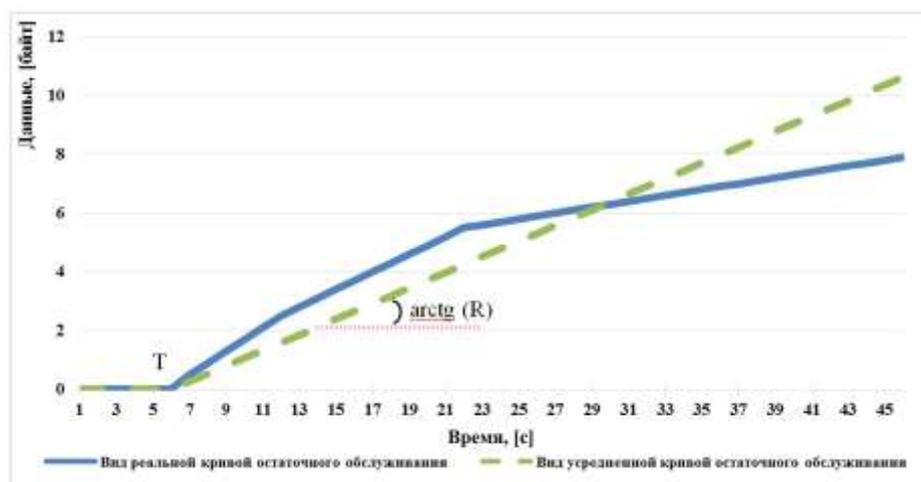


Рис. 3. Пример результата усреднения кривой остаточного обслуживания

## ОПТИМАЛЬНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ФРЕЙМОВ КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ

Для решения заявленной задачи предлагается способ оптимального формирования фреймов канального уровня для агрегированного трафика в мультисервисной сети передачи данных по критерию минимума сквозной задержки (рис. 4), суть которого состоит в следующем.

Источник агрегированного трафика передает весь входной поток через устройство пакетирования получателю с учетом текущего оптимального размера Ethernet фрейма, полезная часть которого в начальный момент времени принимается равной размеру пакета сетевого уровня.



Рис. 4. Функциональная схема способа оптимального формирования фрейма канального уровня для агрегированного трафика в мультисервисной сети передачи данных по критерию минимума сквозной задержки

В устройстве пакетирования собирается статистика о входных Ethernet фреймах (времени поступления, размере, источнике, получателе и типе трафика), которая передается в блок вычисления оптимального размера полезной части Ethernet фрейма.

Параллельно сервер контроля информационного обмена непрерывно в режиме реального времени собирает статистику о структуре сети и передаваемых потоках на основании перехвата пакетов трафика, служебных пакетов алгоритмов маршрутизации и резервирования пропускной способности, а также контроля загруженности буферов телекоммуникационных устройств. Данная статистическая информация также передается в блок вычисления оптимального размера полезной части Ethernet фрейма.

Далее в устройство пакетирования передается значение оптимального размера полезной части Ethernet фрейма, полученное в блоке вычисления оптимального размера полезной части Ethernet фрейма.

На основании полученных данных в устройстве пакетирования формируются Ethernet фреймы из нескольких IP пакетов в соответствии с очередностью приоритетного обслуживания IP пакетов и равенством оптимальному размеру Ethernet фрейма. При этом в общем случае размер Ethernet фрейма будет отличаться от оптимального. Решение о помещении очередного IP пакета во фрейм принимается на основании критерия минимума модуля разности оптимального и формируемого Ethernet фреймов:

$$\arg \min_{L_{\text{форм}}} |L_{\text{опт}} - L_{\text{форм}}|. \quad (11)$$

При равенстве полученных модулей очередной IP пакет включается в Ethernet фрейм, так как функция  $d_{\text{max}}$  от размера полезной части Ethernet фрейма с увеличением аргумента возрастает медленнее (см. рис. 2).

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

С целью оценки эффективности предложенного способа в каналах мультисервисной сети передачи данных была разработана имитационная модель сети связи в среде MATLAB Simulink с использованием стандартных средств и дополнительной библиотеки CyNC (рис. 5) [5]. Схема моделирования включала все узлы и потоки исследуемой сети для расчета оптимального размера фрейма канального уровня, относящегося к агрегированному потоку видеоконференцсвязи.

Реализация в имитационной модели узлового оборудования представлена на рис. 6 и включает в себя механизмы оценки средних и пиковых значений показателей QoS.

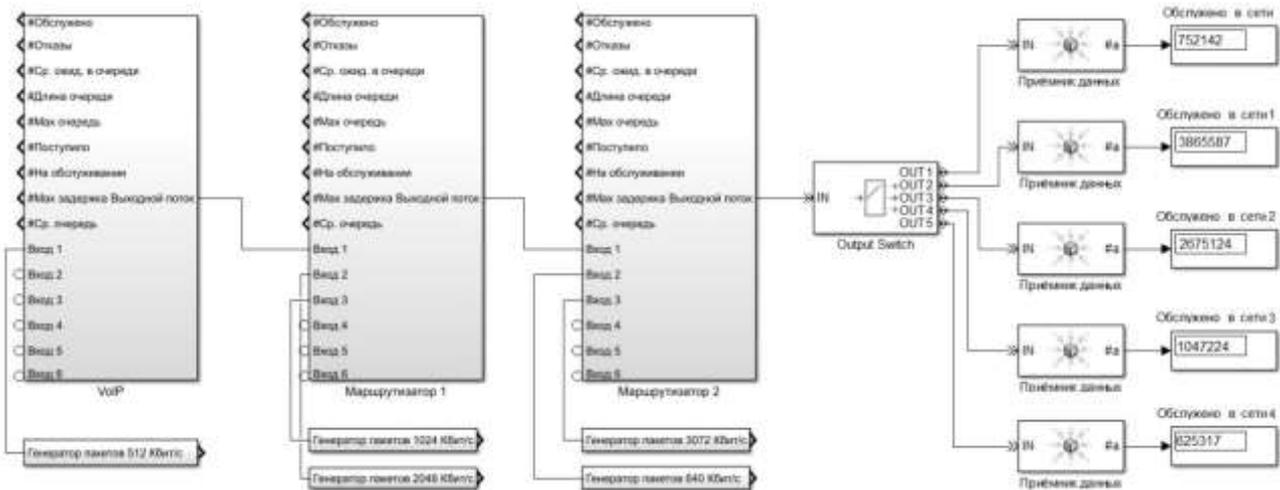


Рис. 5. Модель прохождения потоков данных через рассматриваемые узлы в MATLAB/Simulink

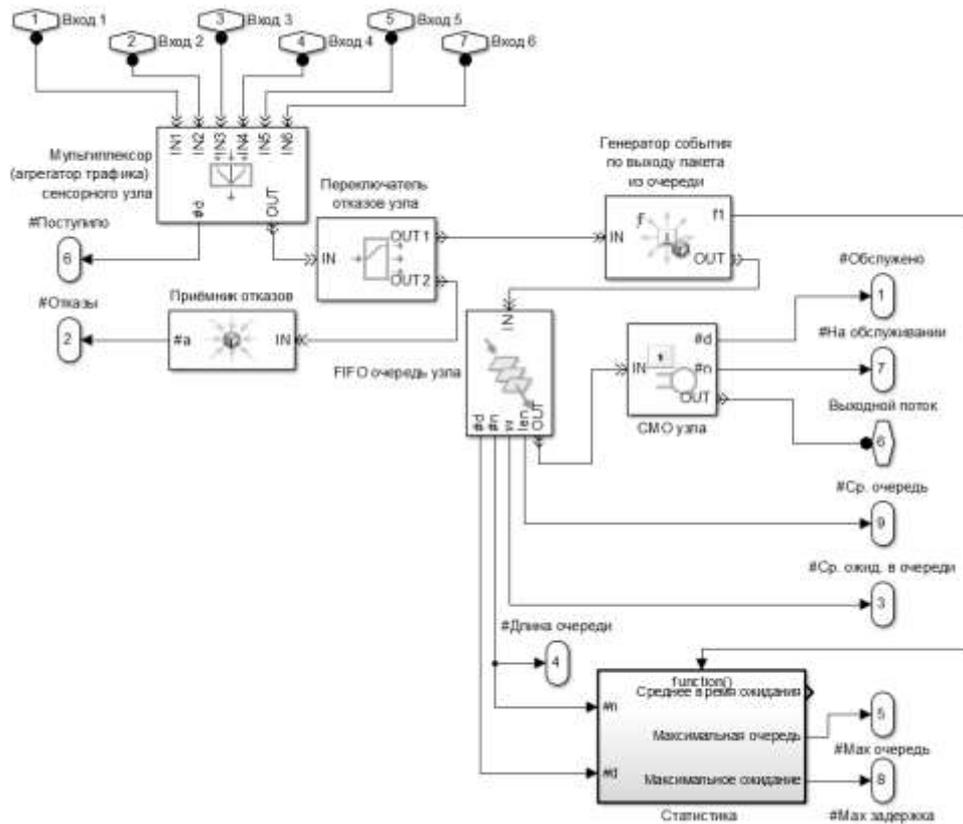


Рис. 6. Схема построения узлового оборудования в MATLAB/Simulink

Генерирование телекоммуникационного трафика осуществляется датчиком случайных чисел и генератором пакетов фиксированного размера в случайные моменты времени. При этом был использован датчик случайных чисел с распределением Пуассона для моделирования простейшего потока и Паретто для моделирования фрактального трафика. Датчик случайных чисел в соответствии с заданным видом распределения и его параметрами генерирует импульсы через случайные интервалы времени. Получив импульс, генератор пакетов генерирует сущность (пакет). Сгенерированные пакеты поступают на вход имитатора узло-

вого оборудования телекоммуникационного узла. На узловом оборудовании происходит агрегирование трафика с последующей его передачей по дисциплине обслуживания FIFO на следующий элемент сети передачи данных и последующей доставкой пакета конечному пользователю. При проведении эксперимента генерировалось 10 Гб телекоммуникационного трафика. Статистика размера полезной части фрейма в сгенерированном потоке представлена на рис. 7.



Рис. 7. Гистограмма распределения размера полезной части фрейма в сгенерированном потоке

При использовании Ethernet фрейма оптимального размера удалось снизить избыточность служебной информации с 23% до 8% (рис. 8). Что, в зависимости от скорости Ethernet соединения (100 Мбит/с или 1000 Мбит/с), приведет к снижению сквозной задержки на величину от 5 до 15% по сравнению со средним размером фрейма, исходя из размера полезной части (рис. 7).

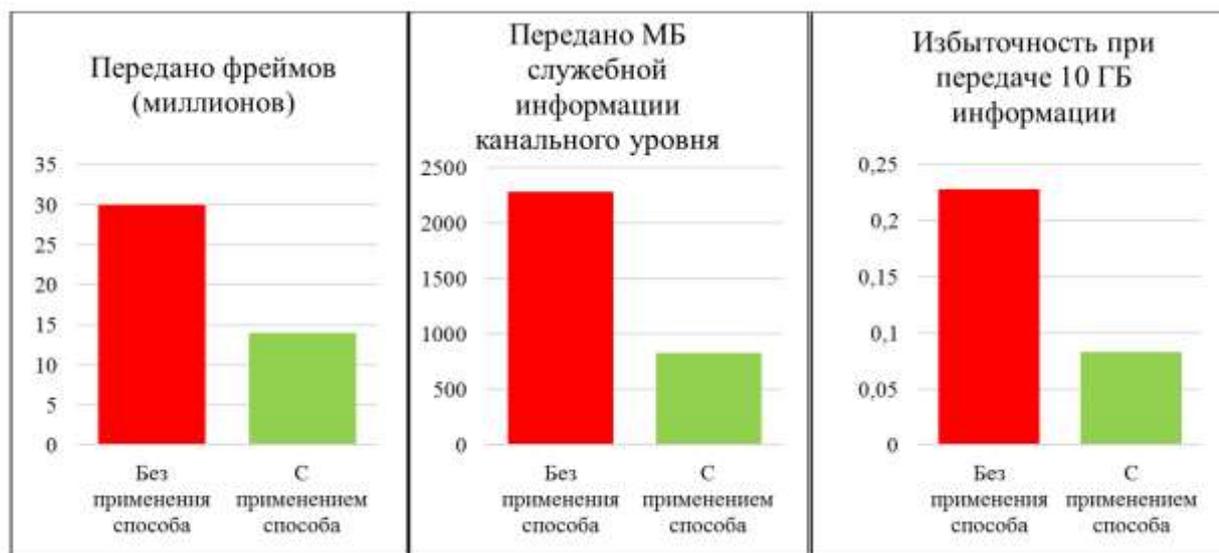


Рис. 8. Результаты моделирования передачи фрактального агрегированного телекоммуникационного трафика

По результатам экспериментов (рис. 9) отмечено совпадение экспериментальных значений сквозной задержки потока при изменении размера полезной части Ethernet фрейма со значениями, рассчитанными с помощью математической модели (см. рис. 2), представленной в предложенном способе в пределах ошибки в 4%, что говорит об его адекватности.

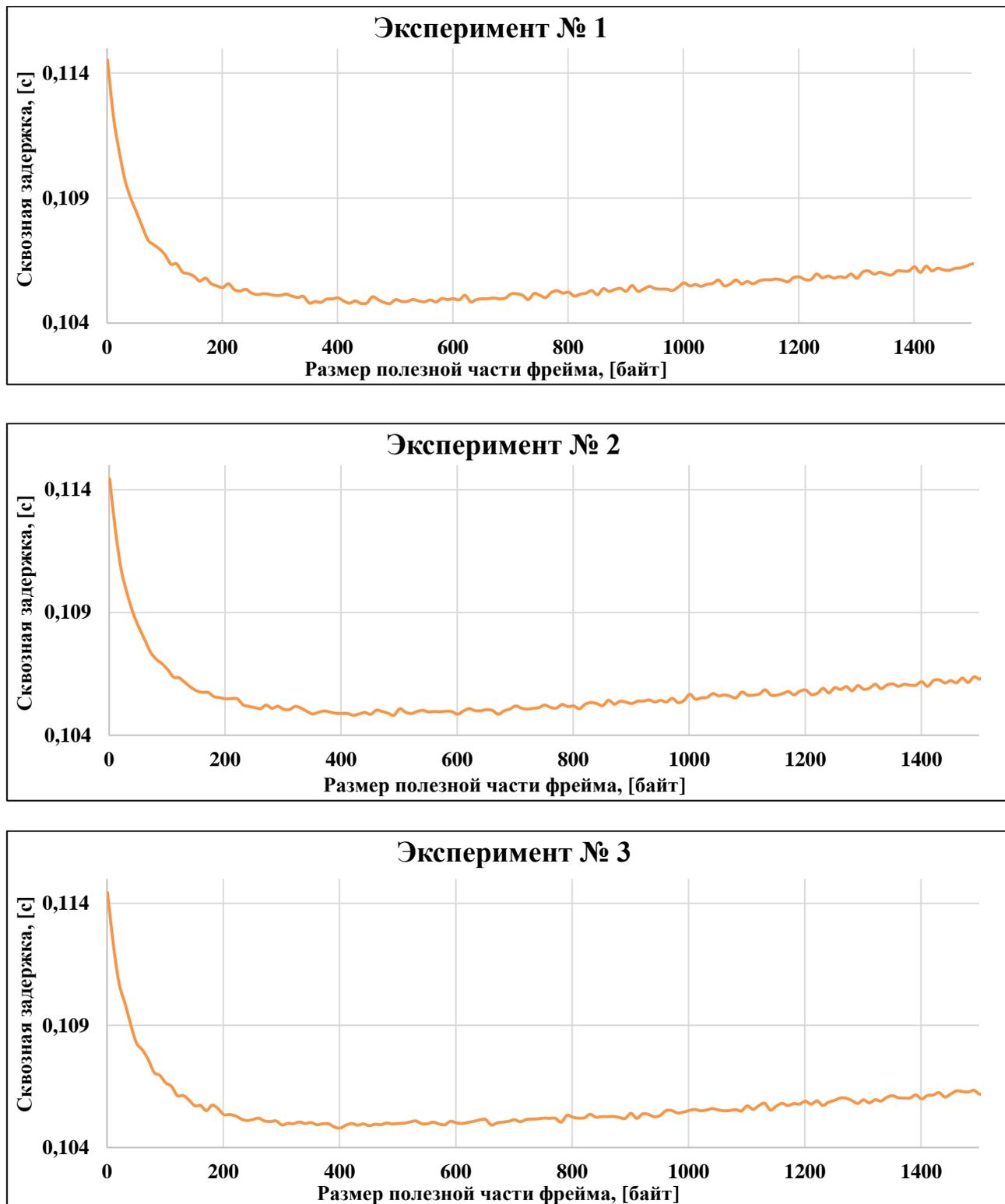


Рис. 9. Зависимость сквозной задержки от размера полезной части Ethernet фрейма, полученная при проведении моделирования

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, способ оптимального формирования фрейма канального уровня для агрегированного трафика в мультисервисной сети передачи данных по критерию минимума сквозной задержки в первую очередь предназначен для динамического определения оптимального размера Ethernet фрейма и минимизации сквозной задержки в мультисервисных сетях передачи данных за счет формирования фрейма из нескольких IP пакетов. Это позволяет использовать предлагаемый способ практически в любых пакетных системах передачи данных.

Широкое применение предлагаемого способа в современных телекоммуникационных сетях обусловлено возможностью реализации его с использованием как недорогих программируемых интегральных схем, так и с помощью программы в операционной системе соответствующего телекоммуникационного оборудования (управляемого коммутатора или маршрутизатора).

### Список используемых источников

1. *Олифер В. Г., Олифер Н. А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб. : Питер, 2020. – 1008 с.
2. *Boudec J. L., Thiran P.* Network calculus: A theory of deterministic queuing systems for the Internet. – Springer, 2014. – 298 p.
3. *Bouillard A., Boyer M., Corronc E. L.* Deterministic Network calculus. – ISTE Ltd, 2018. – 319 p.
4. *Лысиков А. А., Росляков А. В.* Сетевое исчисление (Network calculus) и его применение для оценки сетевых характеристик. – Самара : ПГУТИ, 2019. – 222 с.
5. *Schioler H., Schwefel H. P., Hansen M. B.* CyNC – a MATLAB/SimuLink Toolbox for Network calculus // In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international conference on Performance evaluation methodologies and tools. – Nantes, 2007. – P. 1–10.

Р. С. Володин<sup>1</sup>,

*кандидат технических наук;*

М. Н. Тараканов<sup>2</sup>;

А. Н. Цыбульник<sup>3</sup>,

*доктор технических наук, профессор*

<sup>1, 2</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

<sup>3</sup>Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, г. Ярославль.

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ КОМПЛЕКСИРОВАНИИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО И ПЕЛЕНГАЦИОННОГО СПОСОБА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

В статье предложена методика аналитического расчета пространственных координат объектов наблюдения по сигналам наземных некооперируемых источников радиоизлучения при комплексировании эллиптического и пеленгационного способа позиционирования. Аналитическое определение местоположения объектов наблюдения получено в прямоугольной системе координат на основе решения системы нелинейных уравнений при определенных ограничениях и оценены точностные характеристики предлагаемого способа.

Ключевые слова: объект наблюдения, некооперируемый источник излучения, система нелинейных уравнений, поверхности (линии) положения, оценки точности пространственных координат, комплексирование эллиптического и пеленгационного способа определения координат.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для определения местоположения объектов наблюдения (ОН) в радиолокации распространен метод, основанный на использовании поверхностей (линий) положения. Поверхность положения – поверхность, для которой измеряемый параметр имеет постоянное значение. Пространственные координаты ОН определяются точкой пересечения трех поверхностей положения [1, 2].

### **МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ПО СИГНАЛАМ НАЗЕМНЫХ НЕКООПЕРИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Определение местоположения ОН в разнесенной радиолокационной системе, образованной посторонней (некооперируемой) наземной радиолокационной станцией (РЛС), используемой в качестве источника излучения, и пассивным приемным пунктом (ПП), обеспечивается комплексированием эллиптического и пеленгационного методов определения координат [3–6].

Принцип определения пространственных координат ОН с использованием постороннего источника излучения представлен на рис. 1.

В точке 1 расположен ПП, имеющий координаты  $(x_{\text{п}}, y_{\text{п}}, z_{\text{п}})$ , в точке 2 расположена некооперируемая РЛС с координатами  $(x_{\text{р}}, y_{\text{р}}, z_{\text{р}})$ , облучающая ОН, находящийся в точке 3 с координатами  $(x_{\text{он}}, y_{\text{он}}, z_{\text{он}})$ . Расстояние между РЛС и ПП обозначено  $d_{21}$ .

Момент прихода сигнала, излученного РЛС, в точку 1 обозначен  $t_{21}$  и фиксируется аппаратурой ПП. Момент излучения РЛС в направлении ОН обозначен  $t_2$ , момент прихода сигнала, отраженного от ОН, в точку 1 обозначен  $t_1$ .

Разность времени приема в точке 1 сигналов прямого распространения, принимаемых непосредственно от РЛС по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны и отраженных от ОН, обозначена  $t_p$ :

$$t_p = (t_2 + t_1) - t_{21}. \quad (1)$$

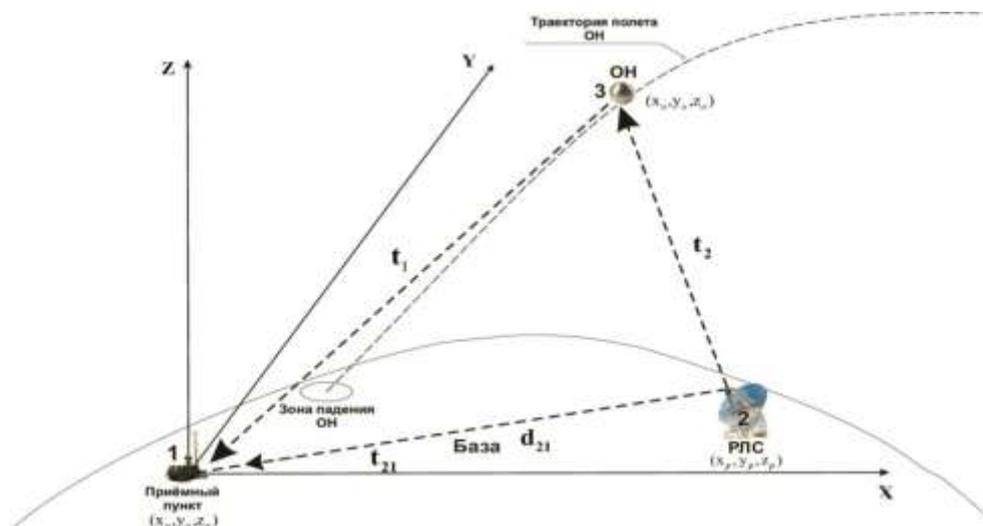


Рис. 1. Принцип определения пространственных координат ОН с использованием некооперируемой РЛС

Поверхностью положения суммы дальностей является эллипсоид. Линия положения выражается через эллипс при пересечении ее плоскостью, проходящей через ось эллипсоида [1, 2].

Сумма дальностей от ОН до ПП  $D_1$  и до некооперируемой РЛС  $D_2$

$$D_1 + D_2 = D_{12} = d_{21} + ct_p, \quad (2)$$

где

$$d_{21} = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2}, \quad (3)$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Уравнение эллиптической поверхности имеет вид

$$D_{12} = \sqrt{(x_p - x_{он})^2 + (y_p - y_{он})^2 + (z_p - z_{он})^2} + \sqrt{(x_п - x_{он})^2 + (y_п - y_{он})^2 + (z_п - z_{он})^2}. \quad (4)$$

Совмещение начала системы координат с точкой стояния ПП и при условии  $x_н = 0$ ,  $y_н = 0$  (а  $z_н = 0$  – ПП на уровне моря), приводит уравнение эллиптической поверхности к виду

$$D_{12} = \sqrt{(x_p - x_{он})^2 + (y_p - y_{он})^2 + (z_p - z_{он})^2} + \sqrt{x_{он}^2 + y_{он}^2 + z_{он}^2}. \quad (5)$$

Поверхностью положения азимута является вертикальная плоскость, образующая с плоскостью  $XOY$  угол  $\beta$ . Уравнение поверхности положения азимута  $\beta$  имеет вид

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x_{он}}{y_{он}}. \quad (6)$$

Поверхностью положения угла места является коническая поверхность, которая при пересечении ее поверхностью положения азимута дает линию положения угла места [7]. Уравнение линии положения угла места  $\varepsilon$  имеет вид

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{z_{\text{ОН}}}{\sqrt{(x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2)}} . \quad (7)$$

Пересечение поверхностей положения для определения координат ОН представлено на рис. 2.

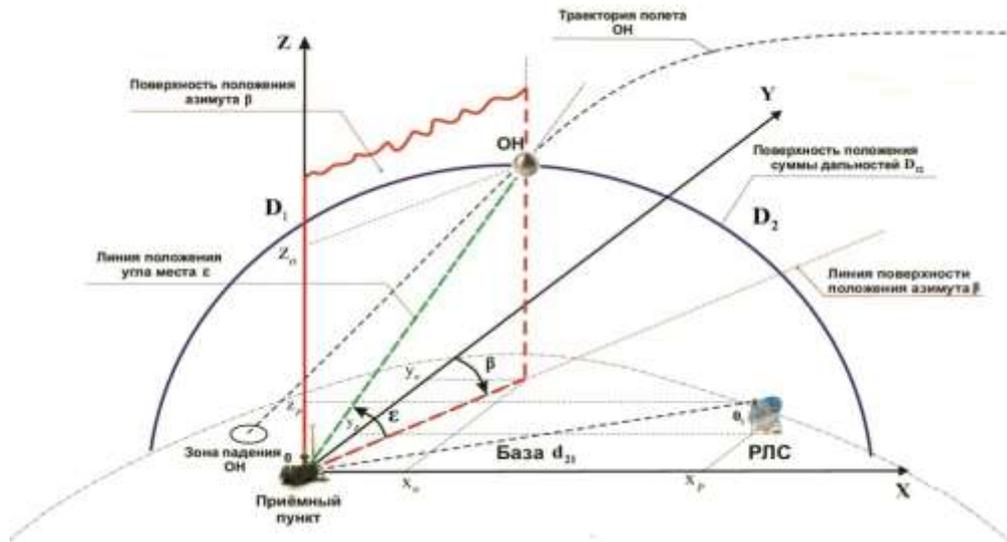


Рис. 2. Пересечение трех поверхностей положения для определения координат ОН

Применительно к рассмотренной разнесенной радиолокационной системе получена система уравнений для определения координат ОН  $(x_{\text{ОН}}, y_{\text{ОН}}, z_{\text{ОН}})$ , для чего уравнение (5) приведено к виду

$$D_{12} - \sqrt{x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2 + z_{\text{ОН}}^2} = \sqrt{(x_p - x_{\text{ОН}})^2 + (y_p - y_{\text{ОН}})^2 + (z_p - z_{\text{ОН}})^2} . \quad (8)$$

После преобразования и введения обозначений уравнение (8) примет вид

$$A_1 x_{\text{ОН}} + A_2 y_{\text{ОН}} + A_3 z_{\text{ОН}} - 2D_{12} \sqrt{x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2 + z_{\text{ОН}}^2} = B_1 , \quad (9)$$

где  $A_1 = 2x_p$ ,  $A_2 = 2y_p$ ,  $A_3 = 2z_p$ ,  $B_1 = A_{\text{рлс}} - D_{12}^2$  (где  $A_{\text{рлс}} = x_p^2 + y_p^2 + z_p^2$ ), а уравнения (6) и (7) следующий вид:

$$x_{\text{ОН}} y_{\text{ОН}}^{-1} = A_4 , \quad (10)$$

$$(x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2)^{-0.5} z_{\text{ОН}} = A_5 , \quad (11)$$

где  $A_4 = \operatorname{tg} \beta$ ,  $A_5 = \operatorname{tg} \varepsilon$ .

Система нелинейных уравнений для определения координат ОН  $(x_{\text{ОН}}, y_{\text{ОН}}, z_{\text{ОН}})$ :

$$\begin{cases} A_1 x_{\text{ОН}} + A_2 y_{\text{ОН}} + A_3 z_{\text{ОН}} - 2D_{12} \sqrt{x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2 + z_{\text{ОН}}^2} = B_1; \\ x_{\text{ОН}} y_{\text{ОН}}^{-1} = A_4; \\ (x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2)^{-0.5} z_{\text{ОН}} = A_5. \end{cases} \quad (12)$$

## АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ

Для решения нелинейной системы уравнений (12) получено аналитическое решение, алгоритм которого представлен на рис. 3.

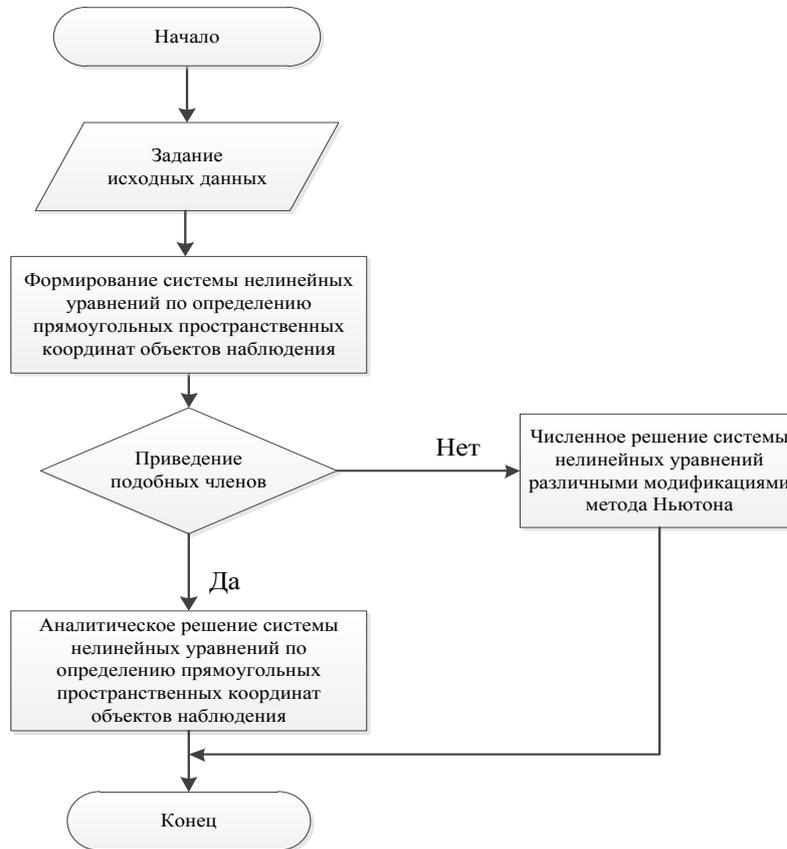


Рис. 3. Структура алгоритма аналитического определения прямоугольных пространственных координат ОН

В соответствии с алгоритмом (рис. 3) получены аналитические зависимости для определения прямоугольных координат ОН:

$$|x_{\text{ОН}}| = \frac{B_1}{A_1 + \frac{A_2}{A_4} + A_3 A_5 \sqrt{1 + \frac{1}{A_4^2}} - 2D_{12} \sqrt{1 + \frac{1}{A_4^2} + A_5^2 + \frac{A_5^2}{A_4^2}}}; \quad (13)$$

$$y_{\text{ОН}} = \frac{x_{\text{ОН}}}{A_4}; \quad (14)$$

$$z_{\text{ОН}} = A_5 \sqrt{x_{\text{ОН}}^2 + \left(\frac{x_{\text{ОН}}}{A_4}\right)^2}. \quad (15)$$

Вид зависимостей (13)–(15) в измеряемых параметрах ОН:

$$|x_{\text{ОН}}| = \frac{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 - (d_{21} + ct_p)^2}{2x_p + \frac{2y_p}{\text{tg}\beta} + 2z_p \text{tg}\varepsilon \left(1 + \frac{1}{\text{tg}^2\beta}\right)^{0.5} - 2(d_{21} + ct_p) \left(1 + \frac{1}{\text{tg}^2\beta} + \text{tg}^2\varepsilon + \frac{\text{tg}^2\varepsilon}{\text{tg}^2\beta}\right)^{0.5}}; \quad (16)$$

$$y_{\text{ОН}} = \frac{x_{\text{ОН}}}{\text{tg}\beta}; \quad (17)$$

$$z_{\text{ОН}} = \text{tg}\varepsilon \sqrt{x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2}. \quad (18)$$

Таким образом, в предложенной модели определение местоположения ОН осуществляется комплексированием эллиптического и пеленгационного способа позиционирования. Для рассмотренного варианта использования поверхностей (линий) положения при определении пространственных координат ОН получены система нелинейных уравнений (12) и ее аналитическое решение (16)–(18).

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ

Для оценки эффективности комплексирования эллиптического и пеленгационного способа позиционирования, определены потенциальные возможности предложенной методики, в частности потенциально достижимая точность измерения координат. Точность измерения координат ОН характеризуется дисперсией или среднеквадратическим отклонением (СКО) оценки [8, 9]. Расчет точности измерения координат ОН в разнесенных системах рассмотрен в работах [10–13]. В предложенной методике оценка точности определения координат ОН, в отличие от известных, базируется на аналитических выражениях (16)–(18), ее этапы представлены на рис. 4.

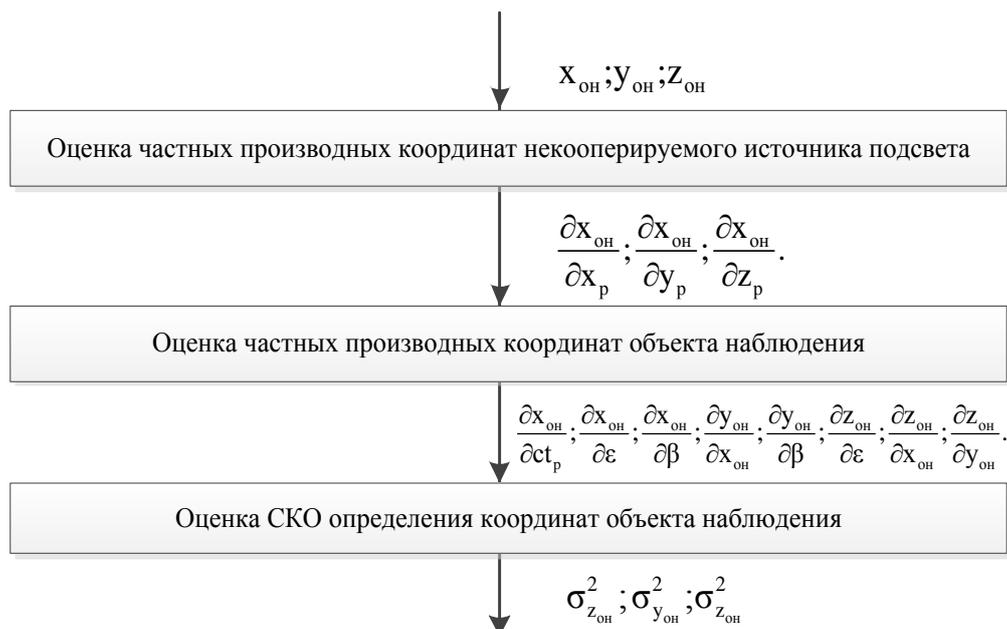


Рис. 4. Этапы оценки точности пространственных координат объекта наблюдения

Для реализации первого этапа выражение (14) с учетом формулы (3) преобразовано к следующему виду:

$$|x_{он}| = \frac{-2(x_p^2 + y_p^2 + z_p^2)^{0.5} ct_p - (ct_p)^2}{2x_p + \frac{2y_p}{tg\beta} + 2z_p tg\varepsilon \left(1 + \frac{1}{tg^2\beta}\right)^{0.5} - 2\left((x_p^2 + y_p^2 + z_p^2)^{0.5} + ct_p\right) \left(1 + \frac{1}{tg^2\beta} + tg^2\varepsilon + \frac{tg^2\varepsilon}{tg^2\beta}\right)^{0.5}}. \quad (19)$$

Введя обозначения  $(x_p^2 + y_p^2 + z_p^2)^{0.5} = D_p$ ,  $ct_p = L_p$ , исключив модуль при  $x_{он}$ , так как для диапазона возможных значений угла  $\beta$  значение синуса положительно, и используя правило нахождения производной частного двух дифференцируемых функций, получены соотношения свидетельствующие о степени влияния ошибок  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $z_p$  на величину  $x_{он}$  ОН:

$$\frac{\partial x_{он}}{\partial x_p} = \frac{-\frac{x_p L_p}{D_p} \left(x_p + \frac{y_p}{tg\beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right) + \left(1 - \frac{x_p L_p}{D_p \sin \beta \cos \varepsilon}\right) (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left(x_p + \frac{y_p}{tg\beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right)^2}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial x_{он}}{\partial y_p} = \frac{-\frac{y_p L_p}{D_p} \left(x_p + \frac{y_p}{tg\beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right) + \left(\frac{1}{tg\beta} - \frac{y_p L_p}{D_p \sin \beta \cos \varepsilon}\right) (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left(x_p + \frac{y_p}{tg\beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right)^2}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial x_{он}}{\partial z_p} = \frac{-\frac{z_p L_p}{D_p} \left(x_p + \frac{y_p}{tg\beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right) + \left(\frac{\sin \varepsilon - \frac{z_p L_p}{D_p}}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right) (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left(x_p + \frac{y_p}{tg\beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right)^2}. \quad (22)$$

Аналогично, в соответствии со вторым этапом, получены частные производные координат ОН:

$$\frac{\partial x_{он}}{\partial t_p}; \quad \frac{\partial x_{он}}{\partial \varepsilon}; \quad \frac{\partial x_{он}}{\partial \beta}; \quad \frac{\partial y_{он}}{\partial x_{он}}; \quad \frac{\partial y_{он}}{\partial \beta}; \quad \frac{\partial z_{он}}{\partial \varepsilon}; \quad \frac{\partial z_{он}}{\partial x_{он}}; \quad \frac{\partial z_{он}}{\partial y_{он}}.$$

Получены частные производные координат ОН  $x_{он}$  с учетом зависимости (16):

$$\frac{\partial x_{он}}{\partial t_p} = \frac{-c(D_p + L_p) \left(x_p + \frac{y_p}{tg\beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right) + \frac{c(D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\sin \beta \cos \varepsilon}}{\left(x_p + \frac{y_p}{tg\beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon}\right)^2}; \quad (23)$$

$$\frac{\partial x_{\text{OH}}}{\partial \varepsilon} = \frac{\frac{z_p - (D_p + L_p) \sin \varepsilon}{\sin \beta \cos^2 \varepsilon} (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right)^2}; \quad (24)$$

$$\frac{\partial x_{\text{OH}}}{\partial \beta} = \frac{\left( \frac{y_p}{\sin^2 \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon (D_p + L_p)}{\cos \varepsilon \operatorname{tg} \beta \sin \beta} \right) (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right)^2}. \quad (25)$$

Получены частные производные координат ОН  $y_{\text{OH}}$  и  $z_{\text{OH}}$ , с учетом зависимостей (17) и (18):

$$\frac{\partial y_{\text{OH}}}{\partial x_{\text{OH}}} = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_c}; \quad (26)$$

$$\frac{\partial y_{\text{OH}}}{\partial \beta} = \frac{x_{\text{OH}}}{\sin^2 \beta}; \quad (27)$$

$$\frac{\partial z_{\text{OH}}}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{\cos^2 \varepsilon} (x_{\text{OH}}^2 + y_{\text{OH}}^2)^{0.5}; \quad (28)$$

$$\frac{\partial z_{\text{OH}}}{\partial x_{\text{OH}}} = \operatorname{tg} \varepsilon x_{\text{OH}} (x_{\text{OH}}^2 + y_{\text{OH}}^2)^{-0.5}; \quad (29)$$

$$\frac{\partial z_{\text{OH}}}{\partial y_{\text{OH}}} = \operatorname{tg} \varepsilon y_{\text{OH}} (x_{\text{OH}}^2 + y_{\text{OH}}^2)^{-0.5}. \quad (30)$$

В соответствии с третьим этапом методики (рис. 4) определены соотношения для дисперсии оценок координат ОН  $x_{\text{OH}}, y_{\text{OH}}, z_{\text{OH}}$ .

Дисперсия оценки координаты  $x_{\text{OH}}$  ОН осуществляется в соответствии с зависимостью

$$\sigma_{x_{\text{OH}}}^2 = \left( \frac{\partial x_{\text{OH}}}{\partial x_p} \sigma_{x_p} \right)^2 + \left( \frac{\partial x_{\text{OH}}}{\partial y_p} \sigma_{y_p} \right)^2 + \left( \frac{\partial x_{\text{OH}}}{\partial z_p} \sigma_{z_p} \right)^2 + \left( \frac{\partial x_{\text{OH}}}{\partial t_p} \sigma_{t_p} \right)^2 + \left( \frac{\partial x_{\text{OH}}}{\partial \varepsilon} \sigma_{\varepsilon} \right)^2 + \left( \frac{\partial x_{\text{OH}}}{\partial \beta} \sigma_{\beta} \right)^2.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}
& \left( \frac{-\frac{x_p L_p}{D_p} \left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right) + \left( 1 - \frac{x_p L_p}{D_p \sin \beta \cos \varepsilon} \right) (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right)^2} \sigma_{x_p} \right)^2 + \\
& + \left( \frac{-\frac{y_p L_p}{D_p} \left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right) + \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} - \frac{y_p L_p}{D_p \sin \beta \cos \varepsilon} \right) (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right)^2} \sigma_{y_p} \right)^2 + \\
& + \left( \frac{-\frac{z_p L_p}{D_p} \left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right) + \left( \frac{\sin \varepsilon - \frac{z_p L_p}{D_p}}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right) (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right)^2} \sigma_{z_p} \right)^2 + \\
& + \left( \frac{-c(D_p + L_p) \left( x_{\text{рлс}} + \frac{y_{\text{рлс}}}{\operatorname{tg} \beta_c} + \frac{z_{\text{рлс}} \sin \varepsilon_c - (D_p + L_p)}{\sin \beta_c \cos \varepsilon_c} \right) + \frac{c(D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\sin \beta_c \cos \varepsilon_c}}{\left( x_{\text{рлс}} + \frac{y_{\text{рлс}}}{\operatorname{tg} \beta_c} + \frac{z_{\text{рлс}} \sin \varepsilon_c - (D_p + L_p)}{\sin \beta_c \cos \varepsilon_c} \right)^2} \sigma_{t_p} \right)^2 + \\
& + \left( \frac{\frac{z_p - (D_p + L_p) \sin \varepsilon}{\sin \beta \cos^2 \varepsilon} (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right)^2} \sigma_\varepsilon \right)^2 + \left( \frac{\left( \frac{y_p}{\sin^2 \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon (D_p + L_p)}{\cos \varepsilon \operatorname{tg} \beta \sin \beta} \right) (D_p L_p + 0.5 \cdot L_p^2)}{\left( x_p + \frac{y_p}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{z_p \sin \varepsilon - (D_p + L_p)}{\sin \beta \cos \varepsilon} \right)^2} \sigma_\beta \right)^2. \quad (31)
\end{aligned}$$

Дисперсия оценки координаты  $y_{\text{ОН}}$  ОН

$$\sigma_{y_{\text{ОН}}}^2 = \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \sigma_{x_{\text{ОН}}} \right)^2 + \left( \frac{x_{\text{ОН}}}{\sin^2 \beta} \sigma_\beta \right)^2. \quad (32)$$

Дисперсия оценки координаты  $z_{\text{ОН}}$  ОН

$$\sigma_{z_{\text{ОН}}}^2 = \left( \frac{1}{\cos^2 \varepsilon} (x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2)^{0.5} \sigma_\varepsilon \right)^2 + \left( \operatorname{tg} \varepsilon x_{\text{ОН}} (x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2)^{-0.5} \sigma_{x_{\text{ОН}}} \right)^2 + \left( \operatorname{tg} \varepsilon y_{\text{ОН}} (x_{\text{ОН}}^2 + y_{\text{ОН}}^2)^{-0.5} \sigma_{y_{\text{ОН}}} \right)^2. \quad (33)$$

Полученные соотношения позволяют оценить потенциальную точность модели определения пространственных координат ОН в разнесенной радиолокационной системе, использующей сигналы некооперируемого источника излучения наземного базирования [14].

В расчетах значения ошибок определения координат некооперируемого источника излучения наземного базирования  $x_p, y_p, z_p$ , измерения угловых координат  $\beta, \epsilon$  ОН и разности времени прихода отраженного относительно прямого сигнала  $t_p$  могут использоваться характеристики различных комплексов пассивной локации. Ниже представлены графики (рис. 5), иллюстрирующие степень влияния различных факторов на СКО оценок координат ОН по результатам расчетов, выполненных для источников радиоизлучения диапазона 2,0–18,0 ГГц и тактико-технических характеристик комплекса радиотехнической разведки [15].

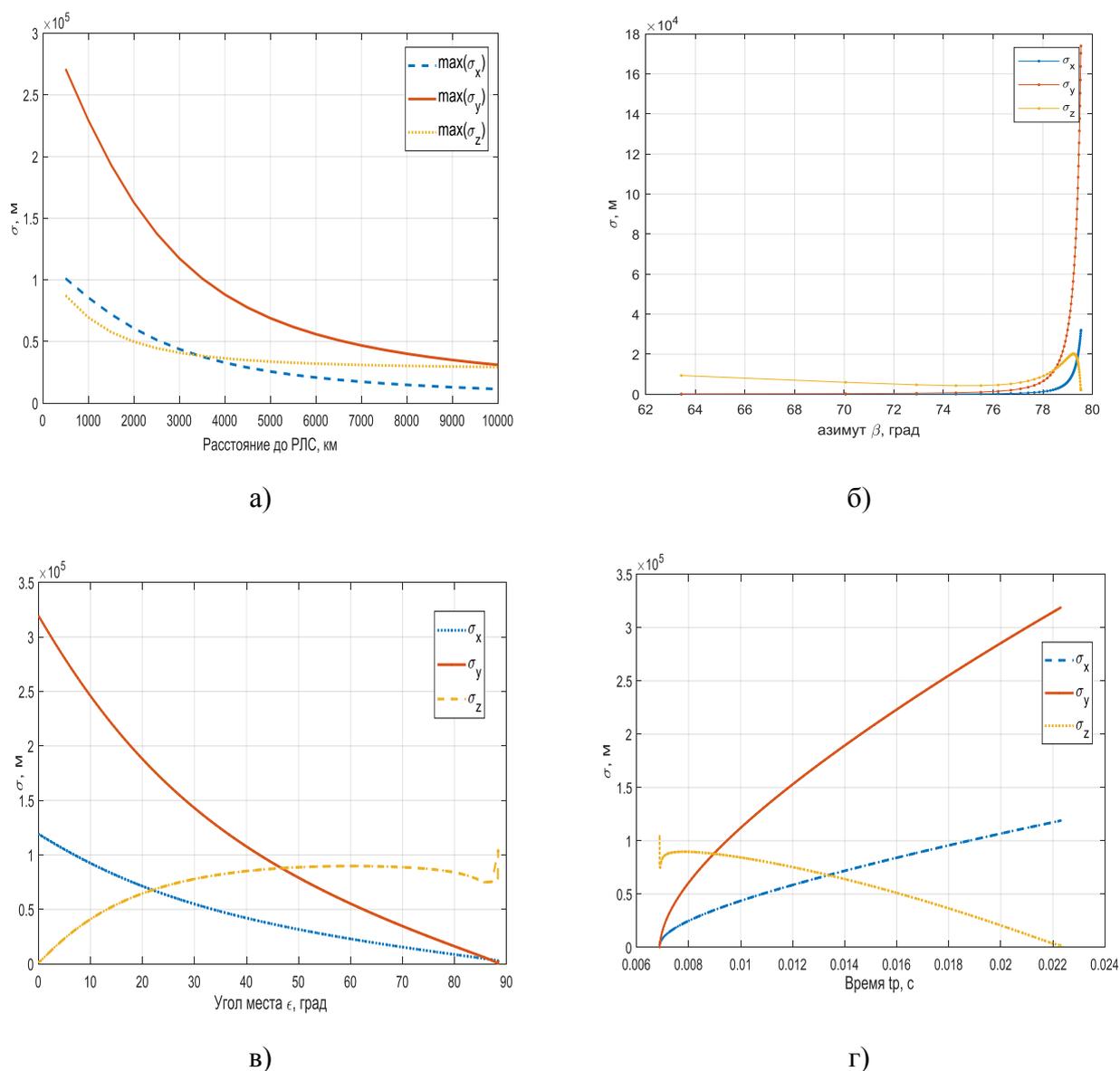


Рис. 5. Зависимости СКО оценки координат ОН:

а – от расстояния до некооперируемой РЛС; б – от угла места; в – от азимута; г – от разности времени приема прямого и отраженного сигналов

На рис. 6 показан результат графической реализации модели определения местоположения ОН с эллипсами ошибок координат в двух плоскостях (ХОУ, ХОZ).

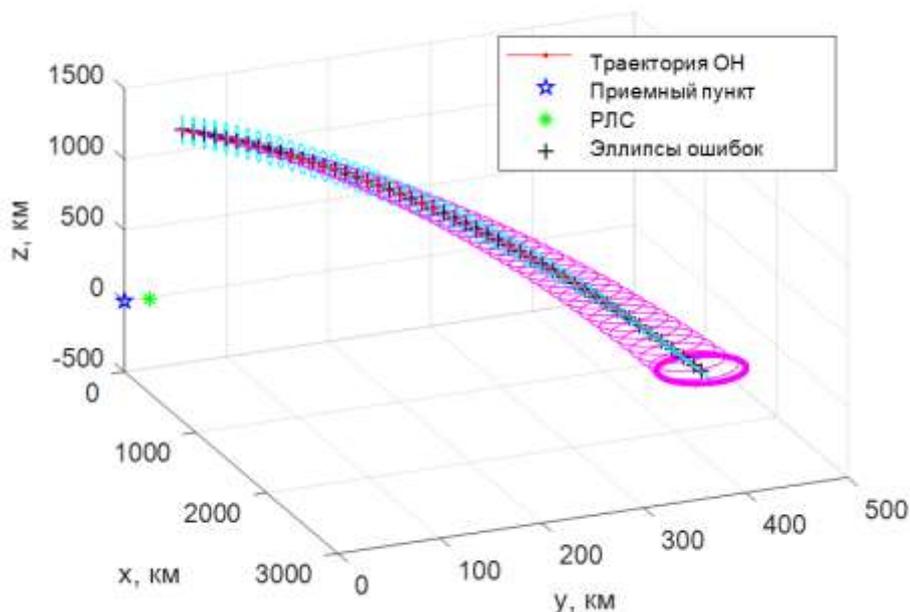


Рис. 6. Графическая реализация модели определения местоположения ОН с эллипсами ошибок координат в двух плоскостях ( $XOY$ ,  $XOZ$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассмотренной модели степень влияния расстояния до некооперируемой РЛС  $\sigma_b$ , азимута  $\sigma_\beta$  и угла места  $\sigma_\epsilon$  ОН, а также разности времени приема прямого сигнала от некооперируемой РЛС и отраженного сигнала от ОН  $\sigma_{t_p}$  на точность измерения пространственных координат ОН различна. Оценка базы разнесенной системы  $\sigma_b$  не оказывает существенного влияния, которое снижается с уменьшением дальности до ОН (рис. 5,а).

При больших дальностях до ОН наибольшие ошибки наблюдаются при азимуте от  $70^\circ$  до  $90^\circ$ , а наименьшие – при азимутах, близких к  $180^\circ$  или  $0^\circ$  (рис. 5,б). При дальности до ОН, сопоставимой с базой модели, величина ошибки резко возрастает на азимутах, близких к  $0^\circ$ . Чтобы минимизировать СКО измерения азимута  $\sigma_\beta$ , ОН необходимо наблюдать под азимутом, близким к  $180^\circ$ .

Размер ошибки измерения угла места  $\sigma_\epsilon$  также является функцией координат ОН. Эта ошибка стремится к минимуму при азимуте ОН, близкому к  $90^\circ$  (рис. 5,в). На больших дальностях и при  $\beta \geq 90^\circ$  значение ошибки растет. Для уменьшения величины ошибки угла места  $\sigma_\epsilon$  наблюдение целесообразно проводить на азимутах, близких к  $90^\circ$ .

Наибольшее влияние на точность измерения пространственных координат ОН вносит ошибка измерения разности времени приема прямого и отраженного сигналов наземной некооперируемой РЛС  $\sigma_{t_p}$ , которая уменьшается при азимутах ОН, близких к  $180^\circ$ , и дальностях – менее двух баз разнесенной системы (рис. 5,г).

Предложенная методика может применяться для расчета пространственных координат ОН в разнесенной системе, использующей сигналы некооперируемой наземной РЛС при комплексировании эллиптического и пеленгационного способа позиционирования.

### Список используемых источников

1. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 721 с.
2. *Беклемишев Д. В.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. – М. : Наука, 1974. – 320 с.
3. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В. С. Кондратьева, А. Ф. Котова, Л. Н. Маркова. – М. : Радио и связь, 1986. – 264 с.
4. *Аверьянов В. Я.* Разнесенные радиолокационные станции и системы. – Минск : Наука и техника, 1978. – 184 с.
5. *Сколник М. И.* Справочник по радиолокации : в 2 кн. – М. : Техносфера, 2014. – Кн. 2. – 680 с.
6. *Володин Р. С., Комиссаров А. В., Тараканов М. Н.* Оценка потенциальной реализуемой зоны обнаружения баллистических объектов по сигналам наземных некооперируемых источников излучения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 37–43.
7. *Жирных Б. Г., Серёгин В. И.* Начертательная геометрия : учебник / под общ. ред. В. И. Серёгина. – 1-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 168 с.
8. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М. : Академия, 2003. – 576 с.
9. Информационные технологии в радиотехнических системах / В. А. Васин [и др.]; под ред. И. Б. Федорова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 672 с.
10. *Караваев В. В., Сазонов В. В.* Статистическая теория пассивной локации. – М. : Радио и связь, 1987. – 240 с.
11. *Лешко Н. А., Цыбульник А. Н.* Радиотехническая разведка и скрытная радиолокация : моногр. – Ярославль : Изд-во ЯрГПУ им. К. Д. Ушинского, 2006. – 152 с.
12. *Сайбель А. Г.* Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. – М. : Оборонгиз, 1958. – 55 с.
13. Теоритические основы радиолокации / Я. Д. Ширман [и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.
14. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021660672. Программа для реализации методики оценки пространственных координат баллистических объектов в разнесенной радиолокационной системе с некооперируемым источником излучения / Р. С. Володин. – Заявл. 24.06.2021; опубл. 30.06.2021.
15. *Перунов Ю. М., Куприянов А. И.* Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. – 4-е изд. – М. : Вузовская книга, 2019. – 190 с.

А. С. Горянский,  
кандидат технических наук;  
А. А. Карытко,  
кандидат технических наук;  
В. М. Лизан;  
Д. О. Петрич,  
кандидат технических наук

## **ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО СОВОКУПНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ**

Предложен подход к оптимизации алгоритма решения задачи оценки параметров движения космических объектов по совокупности измерительной информации. Оптимизация достигается снижением размерности решаемой задачи за счет выполнения дополнительной процедуры селекции координатной измерительной информации. Критерий, обеспечивающий селекцию измерительной информации, основывается на расчете минимального, среднего и максимального расстояний между орбитами. Выполнен вычислительный эксперимент по селекции координатной измерительной информации, сформированной средствами наблюдения по объектам с близкими параметрами орбиты. Представленные в статье результаты обеспечивают уменьшение вычислительной сложности алгоритма оценки параметров движения космических объектов и снижение требований к производительности вычислительных средств систем мониторинга околоземного космического пространства.

Ключевые слова: алгоритм, динамический объект наблюдения, оценка параметров орбиты, расстояние между орбитами, вычислительная сложность алгоритма.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Универсализация космической техники, широкое использование при ее производстве передовых промышленных технологий и современной электронной компонентной базы позволили существенно снизить массогабаритные характеристики современных космических аппаратов (КА). Данный факт приводит к постоянному планомерному расширению состава орбитальных группировок КА, что значительно повышает требования к эффективности функционирования автоматизированных систем мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) в части, касающейся обеспечения безопасности их орбитального движения, в частности предупреждения опасных сближений с фрагментами космического мусора (КМ) и другими космическими объектами (КО) искусственного происхождения. В дальнейшем в работе для именованного КА, фрагментов их разрушения, КМ и других КО будет использоваться термин «динамические объекты наблюдения».

Контроль движения объектов, находящихся на околоземной орбите, обеспечивается автоматизированной системой предупреждения опасных ситуаций (АСПОС) по измерительной координатной и некоординатной информации, формируемой наземными радиолокационными и оптико-электронными (квантово-оптическими) средствами мониторинга ОКП. Координатная информация представляется вектором параметров движения  $\vec{x} = \{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{\dot{X}}, \hat{\dot{Y}}, \hat{\dot{Z}}\}$ , задаваемым в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) для фиксированного момента времени. На основе  $\vec{x}$  рассчитываются параметры орбиты объекта, выполняется прогноз параметров движения, соответствующие математические выражения и модели движения хорошо известны [1–4] и в данной работе не приводятся.

Качественный анализ влияния ошибок, содержащихся в векторе параметров движения  $\vec{x}$ , на точность прогноза положения объекта в пространстве свидетельствует о том, что на ин-

тервалах прогноза длительностью более 20 минут большее влияние ошибки оказывают на точность прогноза положения объекта вдоль орбиты. Достоверное определение координат объекта с максимально допустимой ошибкой по положению вдоль орбиты, не превышающей 10 км, на интервале прогноза длительностью, равной одному периоду обращения, требует выполнения двух критериев, например:

- 1) абсолютная ошибка  $|\varepsilon_r|$  положения объекта в пространстве, содержащаяся в  $\vec{x}$ , не должна превышать 0,01 км;
- 2) абсолютная ошибка  $|\varepsilon_v|$  скорости движения объекта, содержащаяся в  $\vec{x}$ , не должна превышать 1 м/с [5].

Пример влияния указанных значений ошибок  $\varepsilon_r, \varepsilon_v$  на результаты прогноза параметров движения низкоорбитального космического объекта, находящегося на околокруговой орбите с высотой 440 км, для случая равномерного разложения составляющих ошибки по осям АГЭСК ( $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0,0057$  км,  $\varepsilon_{\dot{x}} = \varepsilon_{\dot{y}} = \varepsilon_{\dot{z}} = 0,00057$  км/с) представлен на рис. 1.

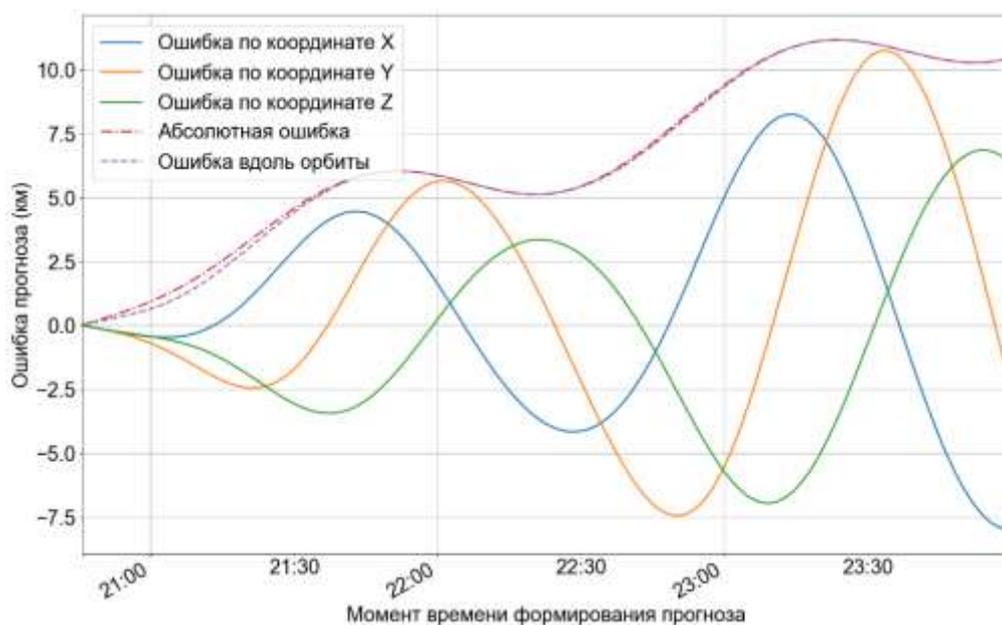


Рис. 1. Пример влияния ошибок, содержащихся в параметрах движения объекта, на точность прогноза положения объекта в пространстве

На практике указанные выше критерии, как правило, не выполняются. Высокоточная оценка параметров движения объектов осуществляется на основе обработки совокупности неравноточных векторов параметров движения  $\{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n\}$ , сформированных различными радиолокационными и оптическими средствами, при этом покрытие траектории движения объектов осуществляется неравномерно [5].

Пусть  $n$  — количество векторов параметров движения, сформированных средствами наблюдения,  $m$  — количество средств наблюдения,  $k$  — количество объектов «владельцев», которым принадлежат  $n$  векторов параметров движения, при этом выполняется условие  $n \gg k$ . Таким образом, возникает комбинаторная задача селекции векторов, принадлежащих объекту «владельцу», решение которой достигается выполнением процедуры поиска такого сочетания  $j$  векторов из  $n$ ,  $j \leq n$ , для которого выполняются критерии:

$$\mathbf{o}^* = \arg \min_{\mathbf{o}} \Psi(\mathbf{o}, \vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_j), \quad (1)$$

$$\Psi(\mathbf{o}, \vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_j) \leq \varepsilon,$$

- где  $\Psi$  – функционал, основанный на реализации взвешенного метода наименьших квадратов [6], характеризующий меру невязки векторов  $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_j$  с параметрами движения объекта, получаемыми процедурой прогноза на основе параметров орбиты  $\mathbf{o}$  для моментов времени  $\{t_1^*, t_2^*, \dots, t_j^*\}$ ;
- $\varepsilon$  – предельно допустимое значение интегральной невязки выбранных  $j$  векторов параметров движения, сформированных средствами мониторинга, и результатов процедуры прогнозирования параметров движения.

Вычислительная сложность задачи селекции может быть оценена произведением вычислительной сложности операции составления всевозможных паросочетаний  $j$  из  $n$  векторов (данная операция имеет порядок  $O(n!)$ ), образующих множество значений функционала  $\Psi$ , на котором реализуется поиск параметров орбиты  $\mathbf{o}$ , доставляющих его минимум (1), на величину вычислительной сложности алгоритма расчета функционала  $\Psi$ , имеющую порядок  $O(p^3)$ , поскольку основными операциями при нахождении значения функционала  $\Psi$  являются операции умножения матриц, здесь  $p = k \cdot 6$ .

Итоговая вычислительная сложность задачи селекции векторов параметров движения имеет порядок  $O(n!)$ . Увеличение значения числа одновременно анализируемых векторов  $n$  ведет к значительному расходованию вычислительных ресурсов АСПОС, снижению темпа обработки координатной информации и, вместе с тем, повышает достоверность правильной селекции. Наибольшая размерность задачи селекции векторов параметров движения динамических объектов наблюдения достигается при обработке координатной информации, сформированной по объектам, движение которых происходит в областях ОКП с наиболее плотным распределением космических объектов, а также по объектам из состава пусков ракет космического назначения (РКН), выводящих на околоземную орбиту кластерную полезную нагрузку.

Динамика отношения числа объектов, выведенных в ОКП, к числу пусков РКН по годам (по данным открытого каталога NORAD), представлена на рис. 2. Среднее число объектов, выводимых в ОКП одной РКН, в 2023 году равно 13 [7]. Основным источником увеличения значений данного показателя являются пуски РКН, осуществляемые в рамках программы развертывания системы спутниковой связи Старлинк. В соответствии с данными каталога NORAD по состоянию на 09 декабря 2023 года в 2023 году в рамках данной программы выполнено 60 пусков РКН, в каждом пуске выводилось от 22 (Старлинк версии 2.0 мини) до 60 (Старлинк версии 1.5) космических аппаратов.

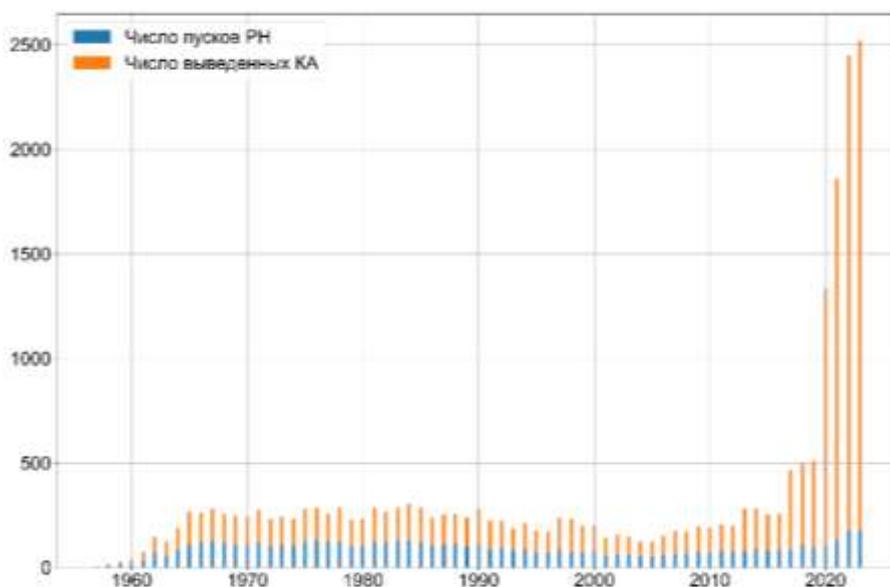


Рис. 2. Отношение числа объектов, выведенных в ОКП, к числу пусков РКН

Таким образом, является целесообразным проведение исследований, направленных на развитие и совершенствование методов и алгоритмов селекции координатной информации с целью эффективного снижения размерности задач, решаемых на этапе формирования высокоточной оценки параметров движения динамических объектов наблюдения путем агрегирования измерительной информации, формируемой различными измерительными средствами.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ

Оценка параметров движения объектов по данным траекторных наблюдений содержит ошибку, вид и параметры распределения которой определяются электромагнитным фоном в зоне действия радиолокационного средства мониторинга ОКП, условиями оптической видимости в зоне действия оптико-электронного средства мониторинга ОКП, особенностями и состоянием аппаратуры измерительных средств, условиями наблюдения объекта, особенностями используемых алгоритмов анализа информации, соответствием принятых при обработке информации гипотез реальным распределениям случайных величин.

Основной вклад в ошибки прогнозирования параметров движения  $i$ -го объекта на основе вектора параметров движения  $\vec{x}_i$  вносят ошибки, содержащиеся в его скоростных составляющих  $\{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}\}$ . Таким образом, наиболее достоверная оценка расстояния между орбитами, рассчитываемыми по векторам параметров движения  $\vec{x}_1, \vec{x}_2$ , достигается при условии формирования данных векторов в окрестности какой-либо точки ОКП, наиболее плотно «прилегающей» к траекториям движения соответствующих объектов.

Дополнительный критерий селекции векторов параметров движения предлагается реализовать на основе сравнения минимального, среднего и максимального расстояний  $dR$  между траекториями движения объектов в пространстве. При этом принимается допущение о том, что траектория движения объекта представляет собой замкнутый эллипс.

Содержание критерия заключается в распределении множества сформированных наблюдательными средствами векторов  $\{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n\}$  между непересекающимися подмножествами  $\{K_1, K_2, \dots, K_b\}$ , при этом  $i$ -й вектор принадлежит  $j$ -му подмножеству  $\vec{x}_i \in K_j$ , если  $\forall \vec{x}_j, \vec{x}_j \neq \vec{x}_i, \vec{x}_j \in K_j$  и выполняется система правил:

$$\begin{cases} \max_u (dR(\mathbf{o}(\vec{x}_i), \mathbf{o}(\vec{x}_j), u_q)) \leq dR_{\max}^*, \\ \frac{\sum_{q=0}^{N-1} dR(\mathbf{o}(\vec{x}_i), \mathbf{o}(\vec{x}_j), u_q)}{N} \leq dR_{\text{mid}}^*, \\ \min_u (dR(\mathbf{o}(\vec{x}_i), \mathbf{o}(\vec{x}_j), u_q)) \leq dR_{\min}^*, \\ \left| u(\vec{x}_i) - u(\vec{x}_j) \right| \leq \varepsilon_u, \end{cases} \quad (2)$$

$$u_q \in \{0, \Delta u, 2\Delta u, \dots, (N-1)\Delta u\}, \quad N = \frac{2\pi}{\Delta u},$$

где  $dR_{\max}^*, dR_{\text{mid}}^*,$

$dR_{\min}^*$

– априорно заданные критические значения максимального, среднего и минимального расстояний между эллипсами, определяемые погрешностью измерений и особенностями движения объектов наблюдения;

- $\vec{o}(\vec{x}_i)$  – орбита, вычисленная на основе вектора  $\vec{x}_i$ ;
- $u(\vec{x}_i)$  – значение аргумента широты объекта на момент времени формирования вектора  $\vec{x}_i$ ;
- $\Delta u$  – шаг дискретизации кривой эллипса по аргументу широты, определяющий точки, для которых вычисляется значение функции  $dR$ ;

Априорные значения ограничений критерия (2) устанавливаются на основе результатов анализа типовых программ движения элементов пусков РКН с полезной нагрузкой в виде кластеров космических аппаратов, а также с учетом статистических данных и результатов моделирования процесса фрагментации КМ.

Вычислительная сложность алгоритма разбиения множества векторов  $n$  на  $b$  непересекающихся подмножеств в наихудшем случае будет иметь порядок  $O\left(\frac{2^n}{\sqrt{n}}\right)$ , характерный для рекурсивных алгоритмов.

Алгоритмы вычисления расстояния между орбитами широко известны. Многие из них обладают быстрой сходимостью и не требуют больших вычислительных ресурсов, например, алгоритм быстрой оценки минимального расстояния между орбитами [8, 9], получивший апробацию в сфере решения задач предупреждения угроз столкновения Земли с астероидами. Традиционные фильтры, основанные на сравнении параметров, характеризующих плоскость орбиты  $i, \Omega$ , не чувствительны к фрагментации КМ, продолжительным компланарным переходам, совершаемым космическими аппаратами с применением электроракетных двигателей установок малой тяги, и не способны выполнять эффективную селекцию векторов параметров движения объектов, совершающих движение в близких орбитальных плоскостях.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве исходных данных при проведении вычислительного эксперимента используется открытый каталог космических объектов, распространяемый системой NORAD в формате двухстрочных элементов. В представленных ниже результатах используется каталог от 15 мая 2023 года, включающий информацию о 23281 объекте.

Проведение вычислительного эксперимента состоит в последовательном выполнении трех этапов:

- 1) формирования совокупностью модельных наблюдательных средств множества векторов параметров движения  $X_G$  по объектам используемого каталога, для которых выполняются условия формирования вектора параметров движения;
- 2) селекции из множества  $X_G$  векторов параметров движения, принадлежащих группе контрольных объектов  $G_k$ , с использованием предложенного в работе критерия (2);
- 3) оценки качества результатов селекции и достигнутого снижения вычислительной сложности алгоритма оценки параметров движения космических объектов.

В ходе проведения вычислительного эксперимента приняты следующие допущения:

- длительность интервала времени (ширина окна анализа), которому принадлежат вектора параметров движения, поступающие на вход процедуры селекции, не превышает 40 минут;
- группа  $G_k$  выбирается таким образом, чтобы объекты, входящие в ее состав, совершали движение по траекториям, принадлежащим областям ОКП с наиболее плотным распределением космических объектов, находились в одной орбитальной плоскости и обладали квазиравномерным распределением по аргументу широты, угловое расстояние между первым и последним объектами группы не должно превышать  $20^\circ$ .

Результаты выполненного в ходе вычислительного эксперимента предварительного анализа распределения космических объектов используемого каталога между орбитальными плоскостями по наклонению представлены на рис. 3.

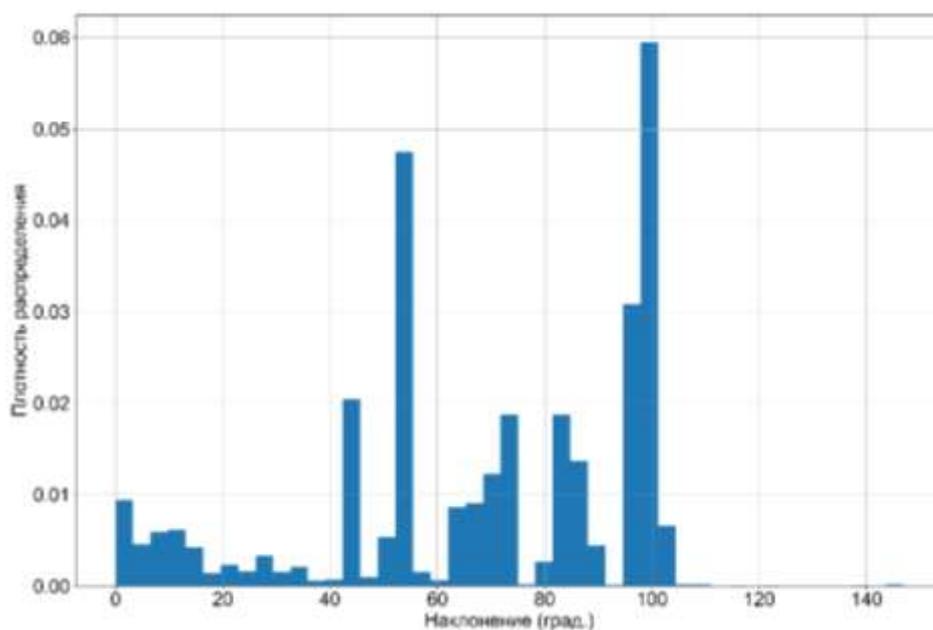


Рис. 3. Плотность распределения объектов в ОКП по наклонению

Согласно данным, представленным на рис. 3, наибольшая плотность объектов достигается в диапазоне наклонений орбитальных плоскостей от 95 до 105 градусов.

Для объектов, орбитальные плоскости которых принадлежат указанному диапазону наклонений, выполнен анализ распределения по периоду обращения вокруг Земли, соответствующая гистограмма представлена на рис. 4 (на рисунке не представлено распределение объектов с периодом обращения более 125 минут, поскольку их суммарный вклад в общее распределение объектов составляет менее одного процента).

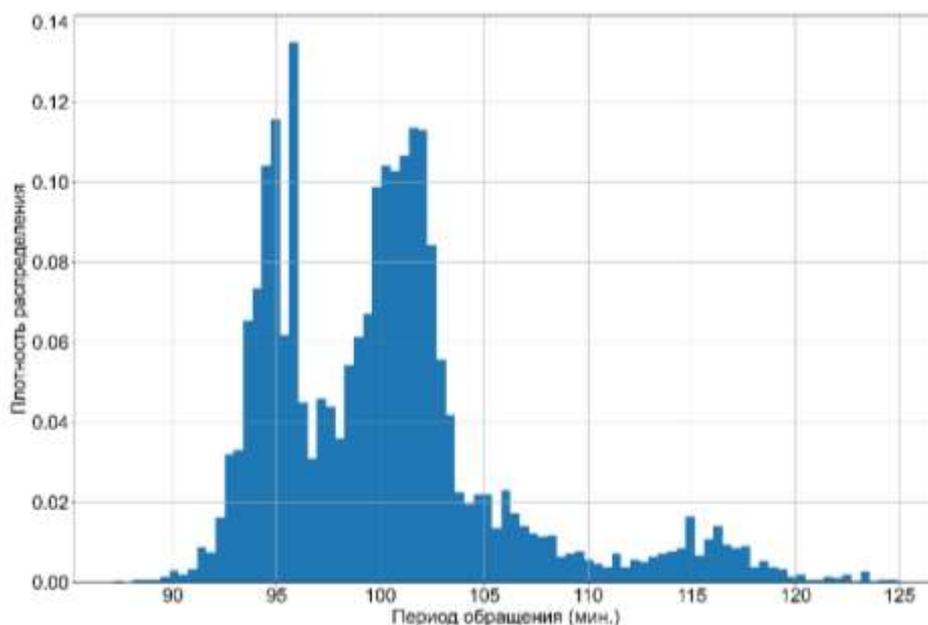


Рис. 4. Плотность распределения объектов по периоду обращения

В соответствии с принятыми допущениями и результатами предварительного анализа, в качестве группы контрольных объектов выбраны элементы 58-го пуска ракеты космического назначения Фэлкон-9, состоявшегося 27 апреля 2023 года, параметры движения объектов

группы представлены в табл. 1. Время привязки параметров движения представлено в формате количества суток, прошедших с начала 2023 года. Значение большой полуоси, равное 6783 км, соответствует периоду обращения, примерно равному 92,77 минуты.

В проводимом эксперименте базовая процедура прогноза параметров движения объектов реализована в соответствии с аналитической моделью движения космических объектов sgp4 [10].

Таблица 1

### Параметры движения группы контрольных объектов

№ п/п	Время привязки параметров орбиты	Наклонение, град.	Прямое восхождение восходящего узла, град.	Эксцентриситет	Аргумент широты перигея, град.	Большая полуось, км	Средняя аномалия, град.
1	134.916	97.6627	135.0181	0.000164	81.96	6783.59	64.49
2	134.916	97.6628	135.0185	0.000167	87.22	6783.57	60.21
3	134.916	97.6635	135.0243	0.000168	85.57	6782.96	74.47
4	134.916	97.6625	135.0207	0.000166	85.27	6783.34	67.02
5	134.916	97.6635	135.0203	0.000165	87.84	6783.38	63.48
6	134.916	97.6635	135.0221	0.000166	86.58	6783.20	68.61
7	134.916	97.6619	135.0149	0.000162	83.24	6783.92	56.40
8	134.916	97.663	135.0216	0.000167	85.38	6783.24	68.85
9	134.916	97.6632	135.0214	0.000168	83.77	6783.27	69.97
10	134.916	97.6628	135.0223	0.000168	84.82	6783.17	70.86
11	134.916	97.663	135.0212	0.000167	85.10	6783.29	68.15
12	134.916	97.6632	135.0225	0.000168	87.26	6783.15	68.90
13	134.916	97.6625	135.0165	0.000172	87.20	6783.77	55.85
14	134.916	97.6638	135.021	0.000167	89.91	6783.31	62.86
15	134.916	97.6638	135.0231	0.000167	87.90	6783.10	69.22

В ходе проведения вычислительного эксперимента для момента модельного времени, на который условия формирования вектора параметров движения по объекту наблюдения считаются выполненными, формируется вектор параметров движения  $\vec{y} = \{\hat{r}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{r}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}\}$ , заданный в сферической (станционной) СК наземного модельного наблюдательного средства, характеризуемого заданными географическими координатами: широтой, долготой, высотой над поверхностью Земного эллипсоида. При этом полагается, что  $\hat{x} = x + \Delta_x$ , где  $x \in \{r, \alpha, \beta, \dot{r}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}\}$ , допустимое абсолютное значение случайной величины  $|\Delta_x|$  для радиальной дальности не превышало 500 метров, для угловых характеристик – 40 угловых минут, для радиальной скорости – 20 метров в секунду, для угловых скоростей – 1 угловую минуту в секунду. Математическое ожидание случайной величины  $\Delta_x$  полагается равным нулю, вид распределения соответствует нормальному. Вектор  $\vec{y}$  пересчитывается с использованием известных преобразований в вектор параметров движения  $\vec{x}$ ,  $\vec{x} = \{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}\}$ , характеризующий положение, скорость и направление движения объекта в АГЭСК.

Пример результатов моделирования описанным выше способом пространственного положения объектов, указанных в табл. 1, представлен на рис. 5 (положение объектов в пространстве отображено кругами красного цвета, проекции объектов на плоскости XOY, XOZ и YOZ представлены крестами синего, зеленого и красного цвета соответственно).

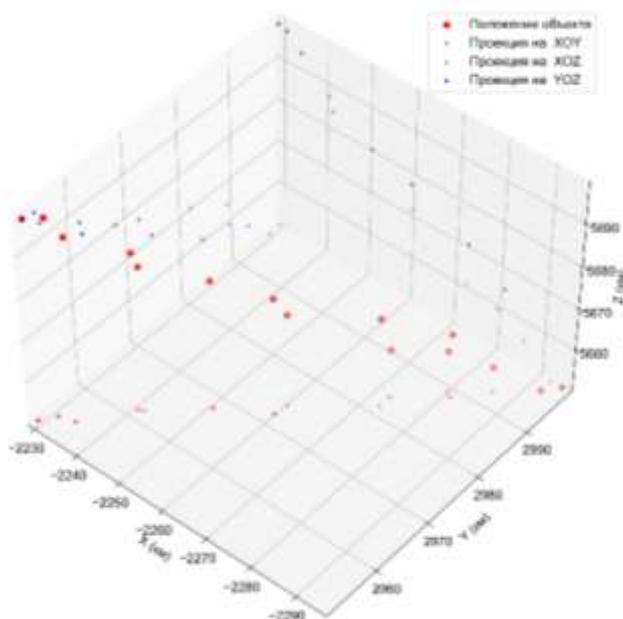


Рис. 5. Распределение объектов в пространстве

Расчет расстояния между орбитами выполнен в соответствии с алгоритмом, изложенным в работе [9], геометрическая интерпретация основных положений данного алгоритма и рассматриваемых в нем точек представлена на рис. 6, при этом использованы следующие значения параметров, управляющих работой алгоритма:

- шаг дискретизации кривой эллипса  $\Delta u$  проецируемой орбиты  $\mathbf{o}_i$  на плоскость второй орбиты  $\mathbf{o}_j$  принимался равным 0,005 радиан;
- поиск минимума расстояния между проекцией  $\hat{p}_i$  точки  $p_i$ , принадлежащей эллипсу орбиты  $\mathbf{o}_i$ , на плоскость орбиты  $\mathbf{o}_j$  и точкой  $p_j$ , принадлежащей кривой эллипса, образуемого траекторией движения КА по орбите  $\mathbf{o}_j$ , выполнялся методом Галлея;
- критерий остановки метода Галлея задавался двумя условиями: либо  $\Delta E \leq 10^{-7}$  радиан, либо  $N \geq 20$ , где  $\Delta E$  – разница между двумя последовательными приближениями значения эксцентрической аномалии, соответствующего минимальной длине отрезка  $p_i, p_j$ , а  $N$  – максимально допустимое число итераций, реализуемых методом Галлея.

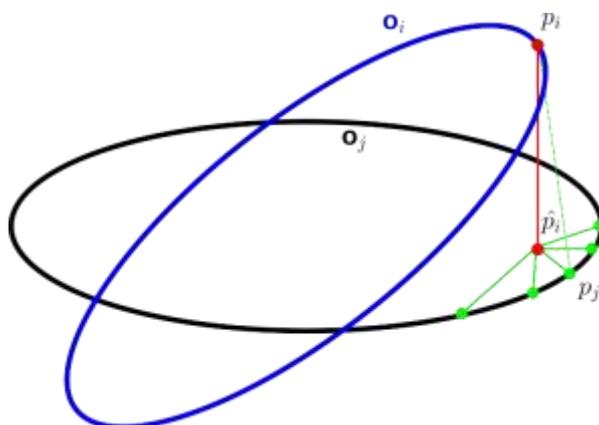


Рис. 6. Геометрическое пояснение к алгоритму оценки расстояния между орбитами

Суть работы алгоритма сводится к рассмотрению прямоугольного треугольника, образуемого вершинами  $p_i, \hat{p}_i, p_j$ , в котором катет  $p_i, \hat{p}_i$  считается постоянным, в то время как минимум гипотенузы  $p_i, p_j$  обеспечивается минимальным значением катета  $\hat{p}_i, p_j$ , поиск точки  $p_j$ , определяемой значением эксцентрической аномалии, ведется итерационно методом Галлея.

Селекция выполнялась среди векторов параметров движения, принадлежащих орбитальным плоскостям, характеризуемых наклоном от 95 до 98 градусов, прямым восхождением всходящего узла от 135 до 137 градусов. Область допустимых значений периода обращения объектов устанавливалась от 90 до 97 минут. Выбор диапазона значений прямого восхождения всходящего узла обусловлен значениями данного параметра у объектов контрольной группы на момент модельного времени формирования вектора параметров движения. Всего рассматривался 61 вектор параметров движения, сформированный по 26 объектам, 15 из которых являлись контрольными (табл. 1).

Фрагменты матрицы расстояний (размерностью  $61 \times 61$  элементов) между орбитами (замкнутыми траекториями движения в форме эллипсов), рассчитанными на основе векторов параметров движения, смоделированных описанным выше способом, представлены на рис. 7.



Рис. 7. Фрагмент диагональной матрицы расстояний между орбитами:  
 а – для смеси объектов контрольной группы с прочими объектами каталога;  
 б – только для объектов контрольной группы

На рис. 7 номера столбцов характеризуют номера объектов в системе NORAD, номера строк – порядковые номера вектора параметров движения. Ячейка матрицы содержит три строки: первая строка – минимальное расстояние между орбитами, вторая строка – среднее расстояние; третья строка – максимальное расстояние. Зеленым цветом выделены ячейки, для которых выполняются критерии:  $dR_{min}^* \leq 25$  км,  $dR_{mid}^* \leq 100$  км,  $dR_{max}^* \leq 500$  км, красным – ячейки, для которых критерии не выполняются.

Анализ данных на рис. 7 выполним на примере строки 11 (рис. 7,а). Данная строка отождествляется с вектором  $\vec{x}$ , сформированным по объекту с номером NORAD 56365 (согласно номеру столбца соответствующего диагонального элемента фрагмента матрицы). В приведенном фрагменте матрицы (рис. 7,а) рассматривается 11 векторов. В соответствии с критерием (2) из них селектируется 6 векторов, принадлежащих объектам с номерами NORAD: 56366 – два вектора; 56365 – два вектора, один из которых отождествлен с диагональным элементом матрицы, принадлежащим строке 11; 56364 – два вектора. Таким образом, для рассматриваемого примера на вход алгоритма оценки параметров движения объекта вместо

11 векторов параметров движения поступит только 6. Отобранная шестерка векторов относится к паре смежных (по распределению в орбитальной плоскости) объектов контрольной группы. Данные рис. 7,б свидетельствуют о возможности проведения эффективной процедуры кластеризации векторов параметров движения, формируемых по динамическим объектам наблюдения, совершающим согласованное групповое движение.

Зависимость числа операций расчета расстояния между орбитами  $N$  от количества анализируемых векторов  $n$  вычисляется согласно выражению

$$N(n) = n \cdot (n - 1) / 2.$$

Таким образом, всего для рассматриваемого в эксперименте примера выполнено  $N = 1830$  операций расчета расстояния между орбитами, из которых  $N^+ = 989$  результатов удовлетворяют системе критериев (2) и  $N^- = 841$  не удовлетворяют, при полном отсутствии ложноотрицательных заключений. Полагая, что полученные числовые значения равномерно распределены между ячейками диагональной матрицы расстояний, сформируем нижнюю границу снижения вычислительной сложности  $P$  задачи расчета значения функционала (1):

$$[P] = N^- / N \approx 0.46.$$

Дополнительно проведенные расчеты показывают, что снижение вычислительной сложности решения рассматриваемой в работе задачи в условиях обработки потока координатной информации, формируемого по одиночным объектам, при отсутствии векторов параметров движения, принадлежащих группам динамических объектов наблюдения, в среднем составляет не менее 70%.

Максимальное время выполнения процедуры расчета расстояния между орбитами двух объектов в однопоточном режиме с использованием микропроцессорного вычислительного ядра Intel Core i3-1125G4 11-го поколения составляет не более 0,0008 секунды. Распределение времени выполнения данной процедуры в ходе проведения вычислительного эксперимента представлено на рис. 8.

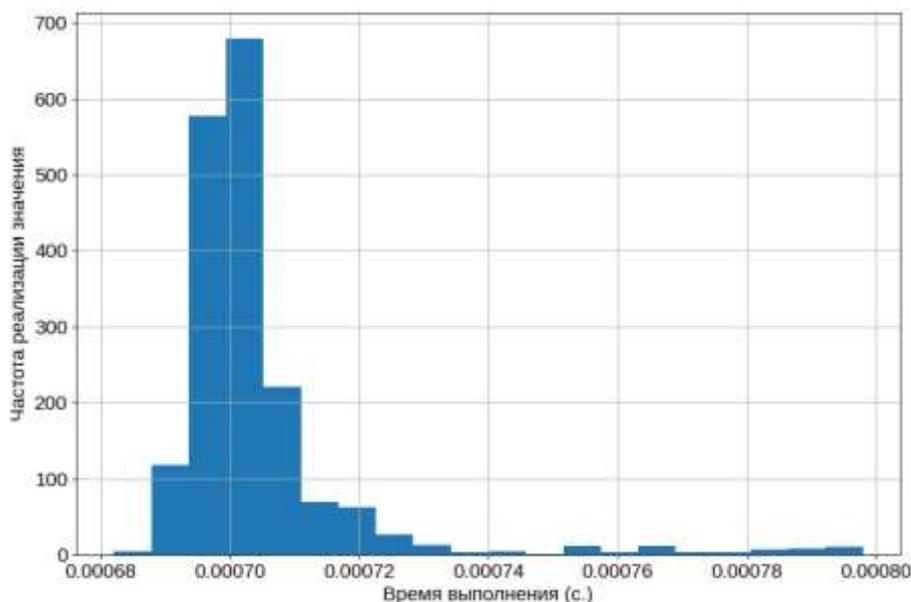


Рис. 8. Распределение времени выполнения функции процедуры расчета расстояния между орбитами

Зависимость потерь оперативности решения задачи (1), обусловленная использованием предлагаемой процедуры селекции координатной информации, от количества одновременно рассматриваемых векторов, представлена на рис. 9.

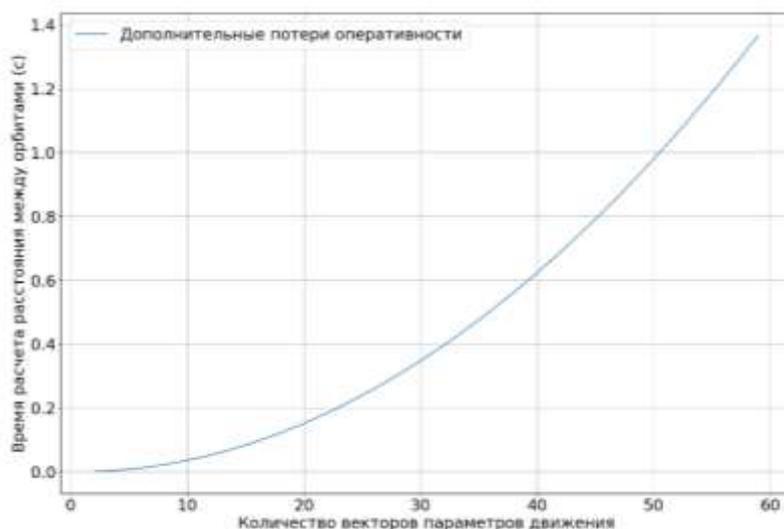


Рис. 9. Зависимость времени выполнения процедуры селективной информации от числа одновременно рассматриваемых векторов параметров движения

Ключевая операция численного прогноза параметров движения объектов, реализуемая при решении задачи (1), обладает высокой ресурсоемкостью. Время выполнения процедуры численного прогноза определяется множеством учитываемых возмущающих воздействий и величиной межитерационного приращения параметра, по которому выполняется дифференцирование системы дифференциальных уравнений, описывающей движение динамического объекта наблюдения. Таким образом, в условиях близкого к двукратному снижению размерности решаемой задачи (1), характеризуемой вычислительной сложностью порядка  $O(n!)$ , при общих дополнительных затратах оперативности, не превышающих нескольких секунд, обеспечивается эффективная селекция координатной информации, формируемой средствами мониторинга, в том числе по групповым объектам наблюдения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

- планомерное расширение состава орбитальных группировок КА значительно повышает требования к эффективности функционирования автоматизированных систем мониторинга ОКП в части, касающейся обеспечения безопасности их орбитального движения и предупреждения опасных сближений с фрагментами КМ и другими объектами искусственного происхождения;
- вычислительная сложность алгоритма расчета параметров орбиты КО по совокупности измерений в АСПОС характеризуется факториальной зависимостью от размерности исходных данных, что способствует значительному расходованию ресурсов вычислительных средств автоматизированных систем и снижает оперативность обработки потока измерительной информации;
- одним из направлений совершенствования алгоритма расчета параметров орбиты объектов по совокупности измерений в АСПОС является снижение размерности задачи уточнения параметров орбит космических объектов на селективной координатной измерительной информации с применением критериев, обладающих большей семантической емкостью информации;
- в результате проведения вычислительного эксперимента по селективной координатной измерительной информации, сформированной средствами наблюдения по групповым объектам, с учетом влияния потока координатной измерительной информации, не прошедшей

идентификацию с объектами владельцами измерений, получены результаты, свидетельствующие о возможности уменьшения вычислительной сложности расчета значений функционала (1) не менее чем в 2 раза.

С точки зрения дальнейшего развития рассмотренного подхода, можно сказать о том, что детальное изучение влияния ошибок оценивания параметров движения динамических объектов наблюдения на результаты их агрегирования по более широкому спектру признаков, каковыми являются Кеплеровы элементы орбиты, и применение функциональной связи между координатной информацией через эллипсы траектории движения КО позволяют создавать сложные системы правил, применяемые в системах интеллектуальной обработки данных. В данном контексте представляет интерес формирование системы продукционных правил нечеткого логического вывода формата «если – то», обеспечивающих автоматизацию принятия решения относительно наиболее вероятной природы формирования текущего расстояния между орбитами КО для соответствующих координатных измерений. Подобная система потенциально способна существенно повысить оперативность обработки координатной информации за счет выполнения ее предварительной кластеризации и более агрессивного и, в то же время, обоснованного снижения размерности задачи построения орбит КО по совокупности измерений.

### Список используемых источников

1. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию – М. : Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1968. – 800 с.
2. *Эльясберг П. Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М. : Наука, 1965. – 540 с.
3. *Battin R. H.* Astronautical Guidance. – N. Y., McGraw-Hill Book Company, 1964.
4. *Власов С. А., Кульвиц А. В., Скрипников А. Н.* Теория полета космических аппаратов : учебник. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 412 с.
5. *Саврасов Ю. С.* Алгоритмы и программы в радиолокации. – М. : Радио и связь, 1985. – 216 с.
6. Космический мусор : в 2 кн. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора / под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова.– 248 с.
7. Space-track [официальный сайт]. – URL: <https://www.space-track.org> (дата обращения: 01.12.2023).
8. *Деревянка А. Е.* Быстрая оценка минимального расстояния между двумя конфокальными гелиоцентрическими орбитами // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физико-математические науки. – 2014. – № 4(37). – С. 144–156.
9. *Hedo J. M., Ruiz M., Pelaez J.* On the minimum orbital intersection distance computation: a new effective method // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – Vol. 479, № 3. – P. 3288–3299.
10. Celestrak : [официальный сайт]. – URL: <https://celestrak.org/NORAD/documentation/spacetrk.pdf> (дата обращения: 01.12.2023)

В. С. Конищев;  
А. В. Харченко,  
*доктор технических наук, профессор;*  
С. А. Яшков,  
*кандидат технических наук*

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА В РАДИОСИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОМЕХ В БАЗИСЕ ДИСКРЕТНОГО КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

В статье представлены описание разработанной компьютерной имитационной модели обработки сигналов с расширением спектра в радиосистемах передачи информации, функционирующих в условиях влияния узкополосных гармонических помех, а также результаты моделирования процесса компенсации помех в базисе дискретного косинусного преобразования.

Ключевые слова: обработка сигналов, расширение спектра, дискретное косинусное преобразование, компенсация помех.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Алгоритмы, использующие ортогональные преобразования при цифровой обработке сигналов, в настоящее время считаются наиболее перспективными для повышения помехозащищенности радиоэлектронных систем, функционирующих при воздействии помех различной структуры. Несмотря на то, что эти алгоритмы известны довольно давно [1–3], до недавнего времени было затруднено их практическое применение в силу значительных аппаратных затрат при их реализации. Технический прогресс в области разработки и создания элементной базы цифровой обработки сигналов, а именно высокопроизводительных цифровых сигнальных процессоров и программируемых логических интегральных схем большой емкости, позволил реализовать в практических устройствах многие известные сложные вычислительные алгоритмы, в том числе алгоритмы дискретных ортогональных преобразований.

В настоящей статье рассматриваются описание разработанной компьютерной имитационной модели обработки сигналов с расширением спектра в радиосистемах передачи информации, функционирующих в условиях влияния узкополосных гармонических помех, а также результаты имитационного моделирования процесса компенсации помех в базисе дискретного косинусного преобразования, которые сравниваются с теоретическими исследованиями помехозащищенности радиосистем передачи информации.

На сегодняшний день компенсация помех в радиосистемах передачи информации реализуется, как правило, путем режекции на основе выбора базиса помехи, полученного при преобразовании Фурье [1, 2]. Основным недостатком дискретных ортогональных преобразований является их высокая вычислительная сложность, поэтому применяются так называемые быстрые алгоритмы Фурье.

Ввиду развития аналогово-цифровых преобразователей, появления доступных цифровых сигнальных процессоров, способных повысить скорость обработки информации в разы, является возможность рассмотреть в качестве приоритетных способов обработки ортогональные преобразования на основе функций косинуса.

## СТРУКТУРА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОМЕХ В БАЗИСЕ ДИСКРЕТНОГО КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

На рис. 1 представлена структурная схема имитационной модели обработки сигналов с компенсацией узкополосных гармонических помех в базисе дискретного косинусного преобразования. Имитационная модель разработана в среде графического программирования LabVIEW и структурно состоит из следующих основных виртуальных приборов (ВП): ВП генератора помех [3]; ВП передающего устройства фазоманипулируемого сигнала [4, 5]; ВП приемного устройства фазоманипулируемого сигнала [4, 5]; ВП канала передачи информации [5]; ВП компенсатора помех в базисе дискретного косинусного преобразования.

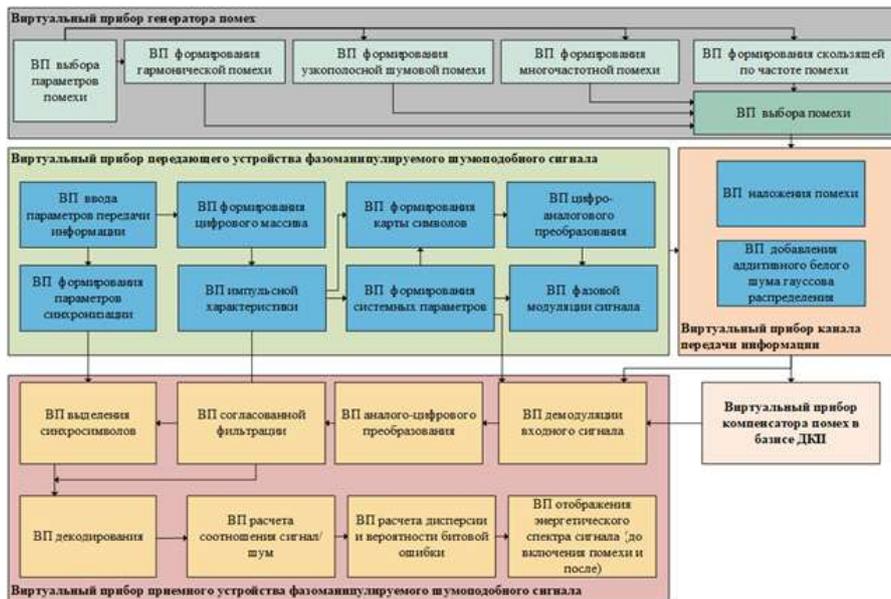


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели

На рис. 2 представлен интерфейс управления и отображения имитационной модели обработки сигналов с компенсацией узкополосных гармонических помех в базисе ДКП. В интерфейсе задаются параметры функционирования ВП имитационной модели, а также отображаются осциллограммы и амплитудно-частотные спектры сигналов и помех, моделируемые ВП модели.

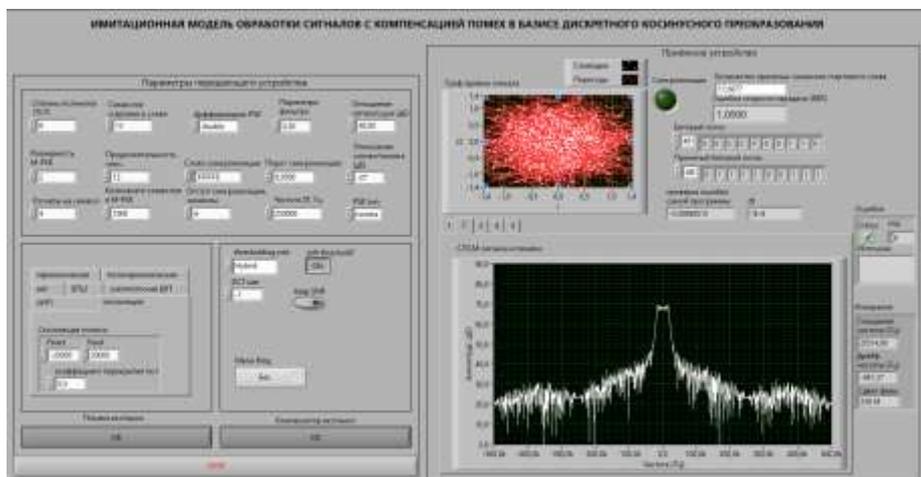


Рис. 2. Интерфейс управления и отображения имитационной модели

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В ЧАСТИ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ В БАЗИСЕ ДИСКРЕТНОГО КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В канале радиосвязи на полезный сигнал накладывается сосредоточенная по спектру помеха  $J(t)$ , т. е. на вход ВП приемного устройства поступает аддитивная смесь полезного сигнала и помехи:

$$x(t) = \sqrt{2} Pr(t)g(t) \cos_0(\omega_0 t) + J(t). \quad (1)$$

В результате аналогово-цифрового преобразования  $x(t)$  получаем вектор  $\mathbf{X}$ :

$$x(t) \rightarrow \mathbf{X} = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})^T. \quad (2)$$

Среди преобразований, имеющих быстрые алгоритмы вычисления, наибольшую эффективность показывает ДКП [6]. Блок-диаграмма программного кода ВП компенсации узкополосных гармонических помех в базисе дискретного косинусного преобразования представлена на рис. 3.

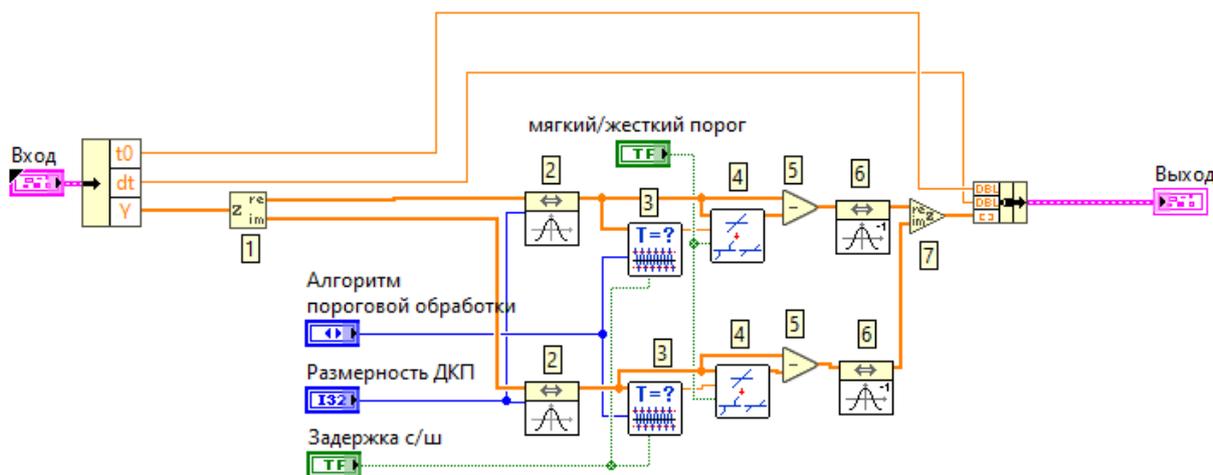


Рис. 3. Блок-диаграмма программного кода ВП компенсации помех

Для того чтобы произвести операцию компенсации помехи необходимо выполнить ряд основных операций над входным воздействием (1).

1. После получения последовательности цифровых отсчетов входного воздействия  $x(t) \rightarrow \mathbf{X} = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})^T$  [7], которые представляют из себя массив комплексных чисел, для дальнейших математических операций необходимо произвести разложение последовательности отсчетов  $\mathbf{X}$  с помощью прямого Z-преобразования на квадратурные дискретные составляющие:

$$\mathbf{X}_{re} = (X_{re_0}, X_{re_1}, \dots, X_{re_{N-1}})^T; \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_{im} = (X_{im_0}, X_{im_1}, \dots, X_{im_{N-1}})^T. \quad (4)$$

Использование разложения последовательности отсчетов  $\mathbf{X}$  с помощью прямого Z-преобразования связано с программной реализацией и обработки цифровой последовательности в среде графического программирования LabVIEW.

На рис. 4 представлены результаты Z-преобразования входного сигнала без помех.

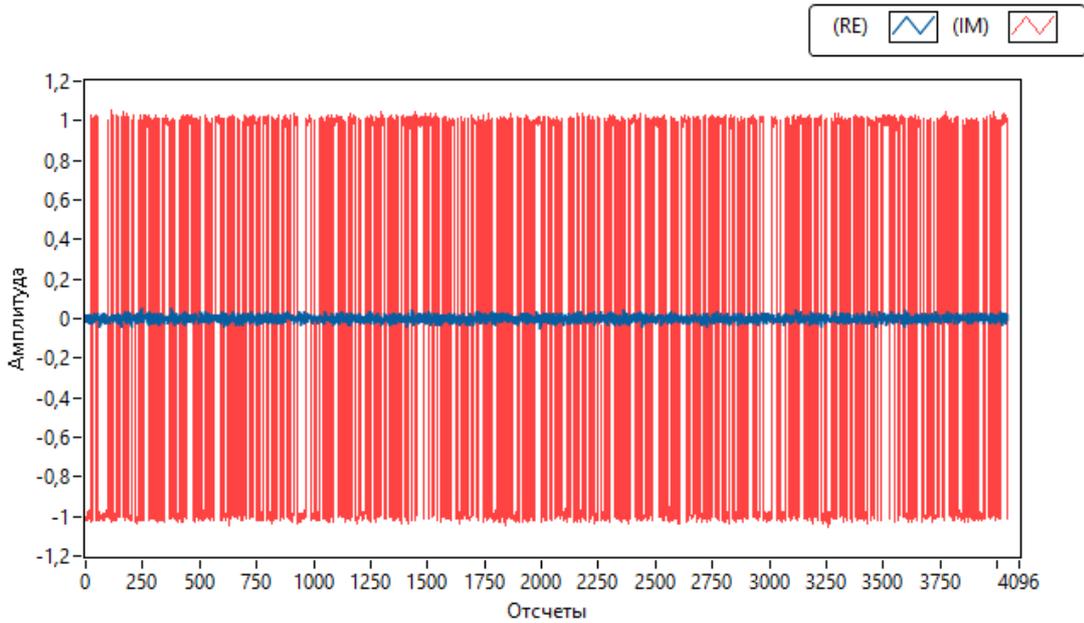


Рис. 4. Результаты Z-преобразования сигнала без помех

2. Далее происходит ДКП вещественной  $\mathbf{X}_{re}$  и мнимой  $\mathbf{X}_{im}$  составляющих вектора  $\mathbf{X}$ :

$$Y_{re_k} = \sqrt{\frac{2}{N}} c(k) \sum_{j=0}^{N-1} X_{re_j} \cos\left(\frac{\pi k}{N} \left(j + \frac{1}{2}\right)\right); \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_{re} = (Y_{re_0}, Y_{re_1}, \dots, Y_{re_{N-1}})^T; \quad (6)$$

$$Y_{im_k} = \sqrt{\frac{2}{N}} c(k) \sum_{j=0}^{N-1} X_{im_j} \cos\left(\frac{\pi k}{N} \left(j + \frac{1}{2}\right)\right); \quad (7)$$

$$\mathbf{Y}_{im} = (Y_{im_0}, Y_{im_1}, \dots, Y_{im_{N-1}})^T. \quad (8)$$

$\mathbf{Y}_{re}$  и  $\mathbf{Y}_{im}$  – это ортогональные вектора вещественной и мнимой составляющих входного воздействия  $X(t)$ , в котором зависимость между компонентами ослаблена (значит, компоненты менее коррелированы) и в таком случае, независимая покомпонентная обработка становится более обоснованной.

На рис. 5 представлены результаты прямого ДКП смесей сигнала и узкополосных гармонических помех, где мощность помех выше мощности сигнала на 3 дБ. На рисунке видно, что при преобразовании смеси сигнала и помех, которые в энергетическом отношении выше, чем сигнал, помехи локализуются в основном в начальных отсчетах (коэффициентах) ДКП как в вещественной, так и в мнимой составляющих векторов.

3. Операция выбора порога ( $T$ ) для обработки играет важную роль в достижении результата компенсации помех и дальнейшего различения сигнала после согласованной фильтрации. При определении формирования значения порога используются правила, которые подробно описаны в [8].

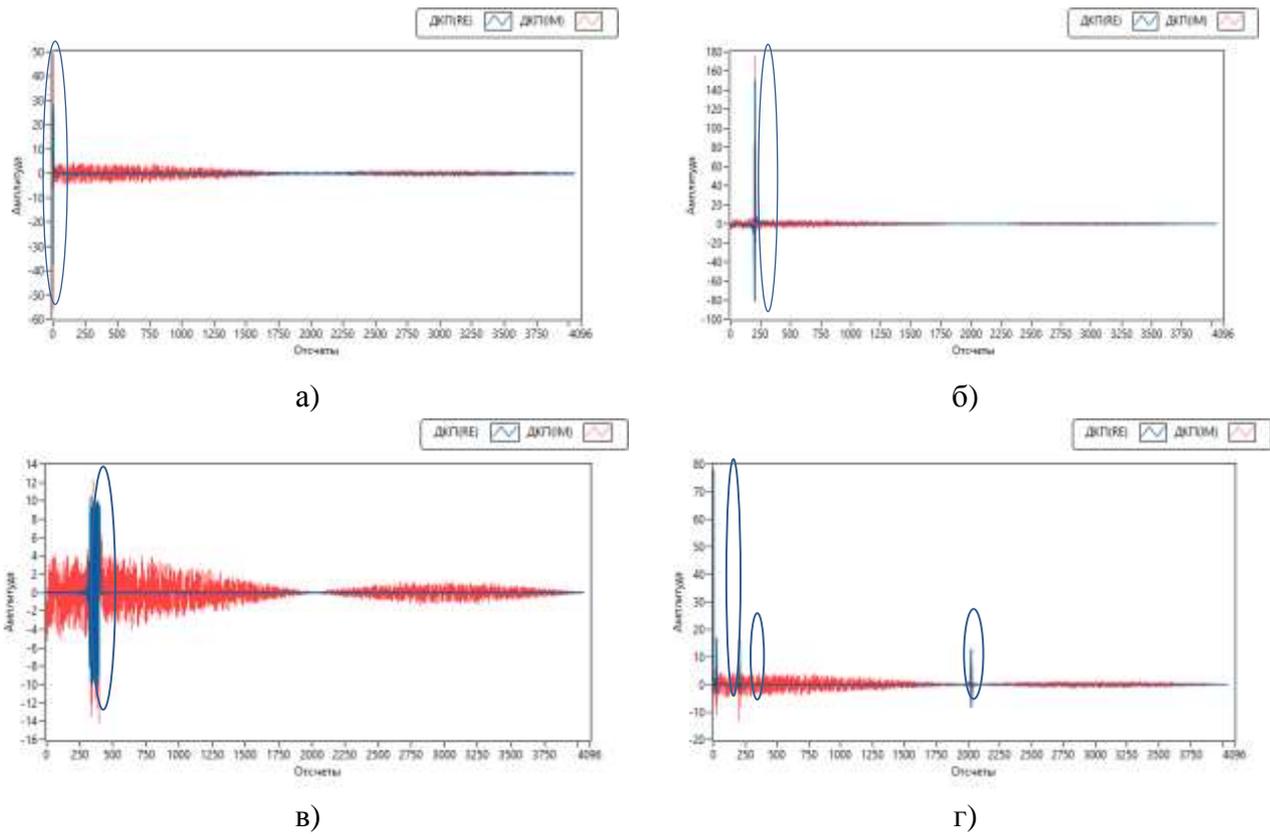


Рис. 5. Осциллограммы смесей сигнала и помех в базисе дискретного косинусного преобразования:

а – узкополосная шумовая; б – немодулированная несущая;  
в – скользящая по частоте; г – полигармоническая

4. Операция пороговой обработки заключается в обнулении значений отсчетов, которые меньше по модулю значения порога  $T$ . В модели применяется «мягкая» (*soft*) пороговая обработка, так как ее использование позволяет устранить появление в восстанавливаемом образе помехи отсчетов полезного сигнала. Значения отсчетов ДКП ( $Y_{re}^*$  и  $Y_{im}^*$ ) после пороговой обработки определяются как:

$$Y_{re}^* = \begin{cases} 0 & , Y_{re} \leq T \\ Y_{re} - T & , Y_{re} > T \\ Y_{re} + T & , Y_{re} < -T \end{cases}, \quad Y_{im}^* = \begin{cases} 0 & , Y_{im} \leq T \\ Y_{im} - T & , Y_{im} > T \\ Y_{im} + T & , Y_{im} < -T \end{cases}. \quad (9)$$

5. Операция компенсации помехи производится в соответствии со следующими выражениями:

$$Y_{re} - Y_{re}^* = Y_{re}^{**}; \quad (10)$$

$$Y_{im} - Y_{im}^* = Y_{im}^{**}. \quad (11)$$

На рис. 6 представлены результаты компенсации узкополосных гармонических помех в базисе ДКП. Из рисунков видно, что амплитуд отсчетов в базисе ДКП значительно ниже, чем амплитуда на рис. 5.

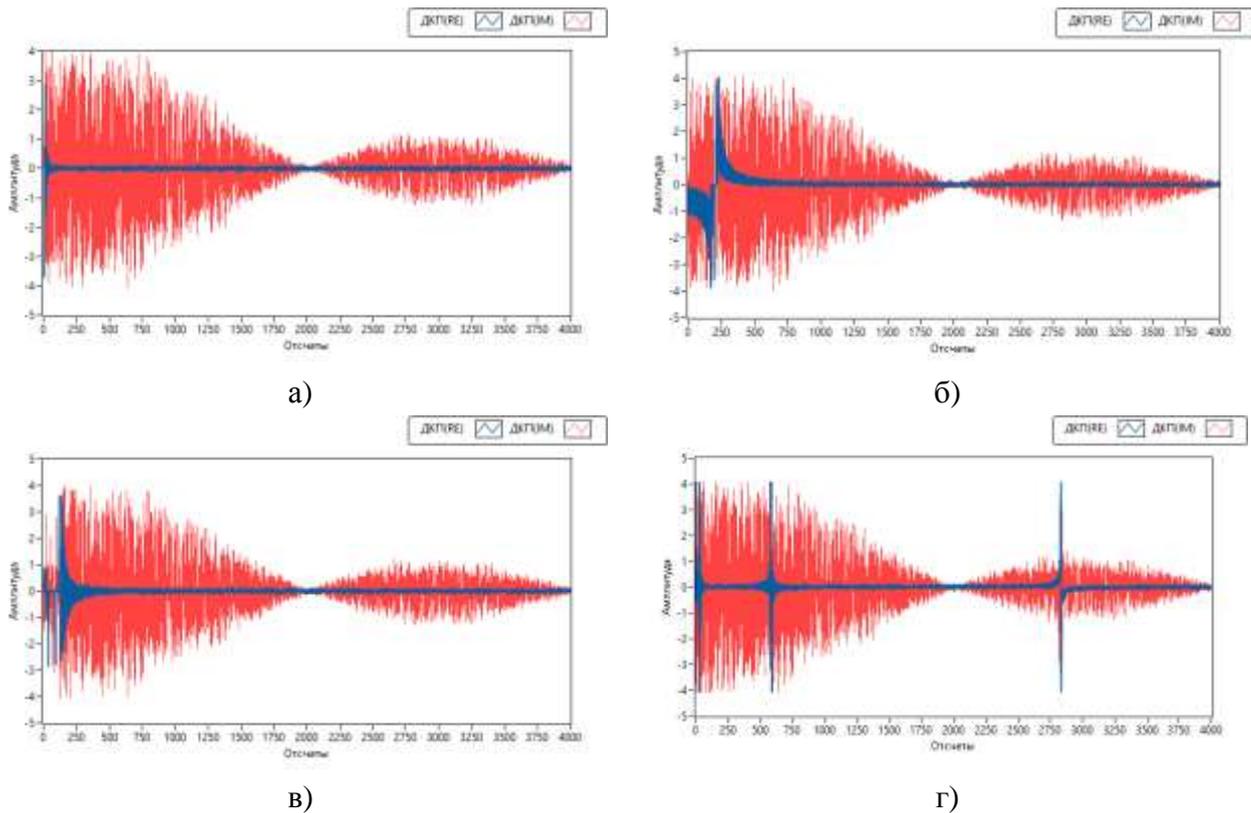


Рис. 6. Осциллограммы смесей сигнала и помех в базисе дискретного косинусного преобразования после операции компенсации

6. Обратное ДКП производится с целью получения вещественного  $\mathbf{X}_{re}$  и мнимого  $\mathbf{X}_{im}$  составляющих вектора входного воздействия  $\mathbf{X}$ :

$$X_{re_j}^* = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} c(k) Y_{re}^{**} \cos\left(\frac{\pi k}{N} \left(j + \frac{1}{2}\right)\right); \quad (12)$$

$$X_{im_j}^* = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} c(k) Y_{im}^{**} \cos\left(\frac{\pi k}{N} \left(j + \frac{1}{2}\right)\right). \quad (13)$$

Получаемые вещественные  $\mathbf{X}_{re}$  и мнимые  $\mathbf{X}_{im}$  составляющие вектора входного воздействия  $\mathbf{X}$  примут вид:

$$\mathbf{X}_{re}^* = (X_{re_0}^*, X_{re_1}^*, \dots, X_{re_{N-1}}^*)^T; \quad (14)$$

$$\mathbf{X}_{im}^* = (X_{im_0}^*, X_{im_1}^*, \dots, X_{im_{N-1}}^*)^T. \quad (15)$$

7. Обратное Z-преобразование производится с целью получения комплексных отсчетов входного воздействия, но с уже компенсированными составляющими помех:

$$\mathbf{X}_{re}^* + \mathbf{X}_{im}^* = \mathbf{X}^*. \quad (16)$$

В результате чего получаем:

$$\mathbf{X}^* = (x_0^*, x_1^*, \dots, x_{N-1}^*)^T. \quad (17)$$

8. Сигнал после компенсации следует в ВП приемного устройства. Результаты обработки сигналов в ВП приемного устройства представлены далее.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При проведении имитационного моделирования использовались следующие параметры модели:

- частота несущего колебания: 2,4 ГГц;
- тип сигнала: фазоманипулируемый противоположный (BPSK);
- количество отсчетов на одно периоде колебания: 4 отсчета;
- степень полинома расширяющей последовательности: 9;
- частота задающего генератора: 1 МГц;
- длина передаваемого сообщения: 4095 символа;
- отношение энергии информационного символа к спектральной плотности средней мощности шума: 30 дБ;
- отношение мощности узкополосных помех к мощности полезного сигнала: 23 дБ;
- виды и параметры узкополосных помех: гармоническая (немодулированная несущая) с частотой 2,41 ГГц, узкополосная шумовая помеха с шириной полосы 1% от полосы сигнала, полигармоническая (3 гармоники с частотами в полосе сигнала), скользящая по частоте в полосе сигнала с шириной спектра 40 КГц и коэффициентом перестройки частоты равным 0,5).

На рис. 7–10 представлены результаты имитационного моделирования влияния узкополосных гармонических помех и применения в схеме обработки сигналов компенсации в базисе ДКП:

- осциллограммы сигнала в ВП приемного устройства (рис. 7,а, г–10,а, г);
- спектральная плотность мощности в ВП приемного устройства (рис. 7,б, д–10,б, д);
- сигнальное созвездие вещественной и мнимой составляющих сигнала при различении в ВП приемном устройстве (рис. 7,в, е–10,в, е).

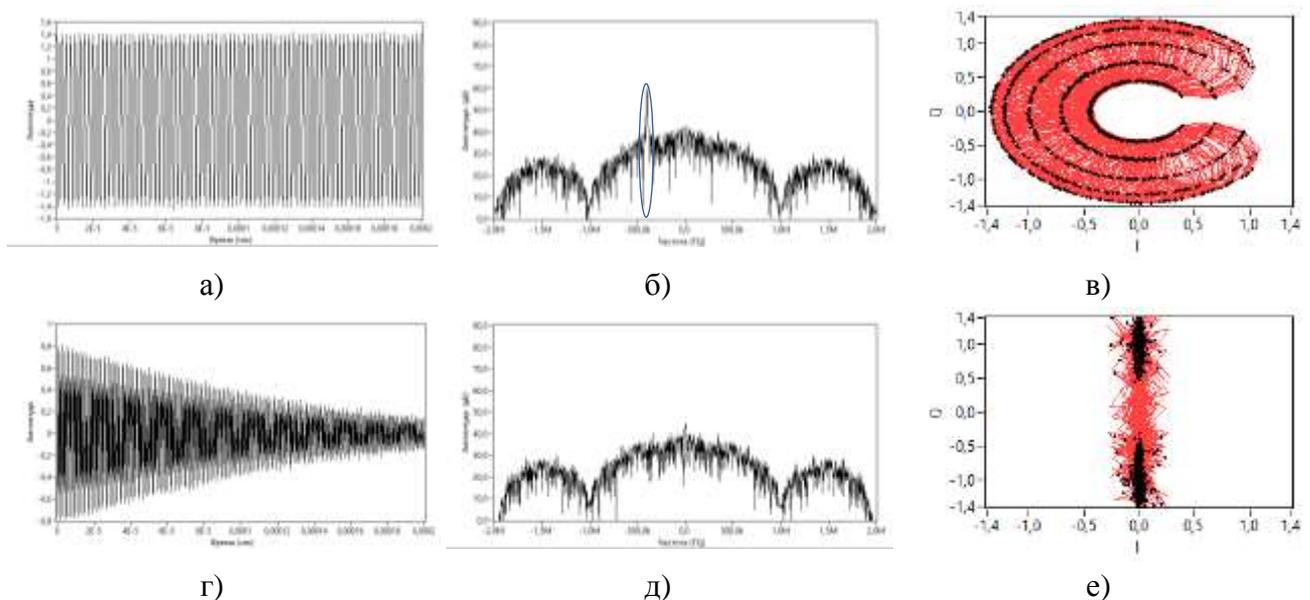


Рис. 7. Результаты обработки сигнала в ВП приемного устройства без компенсации (сверху) и с компенсацией в базисе ДКП (снизу) гармонической помехи

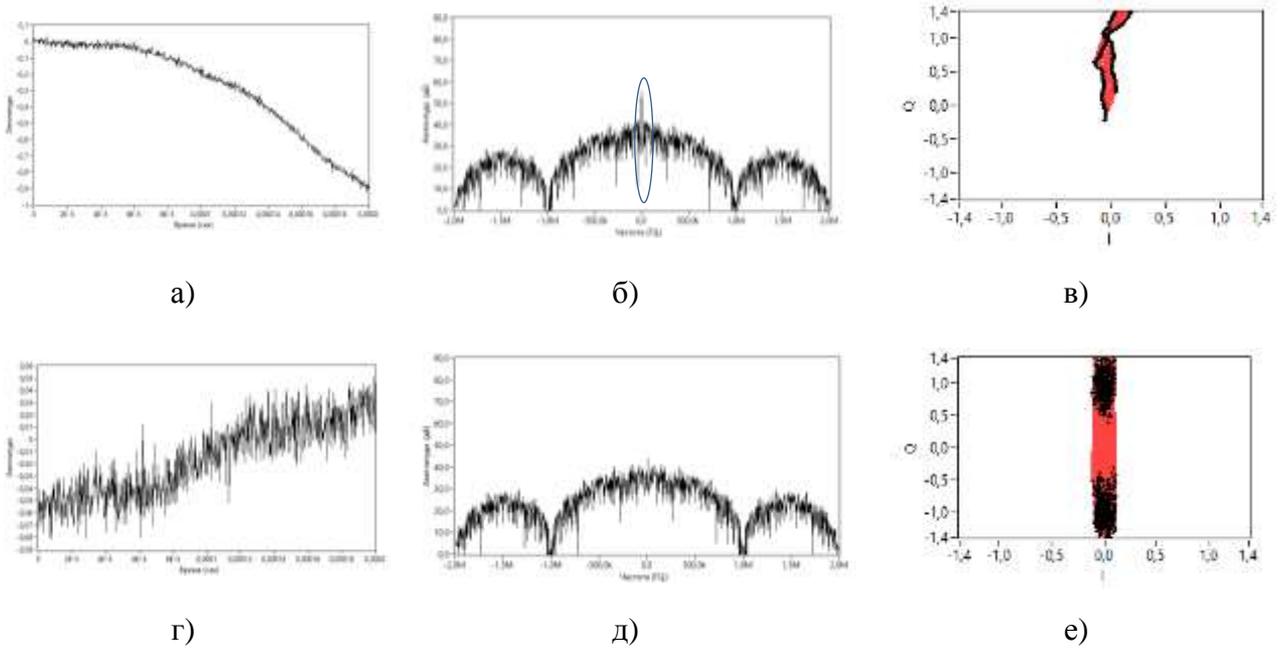


Рис. 8. Результаты обработки сигнала ВП приемного устройства без компенсации (сверху) и с компенсацией в базисе ДКП (снизу) узкополосной шумовой помехи

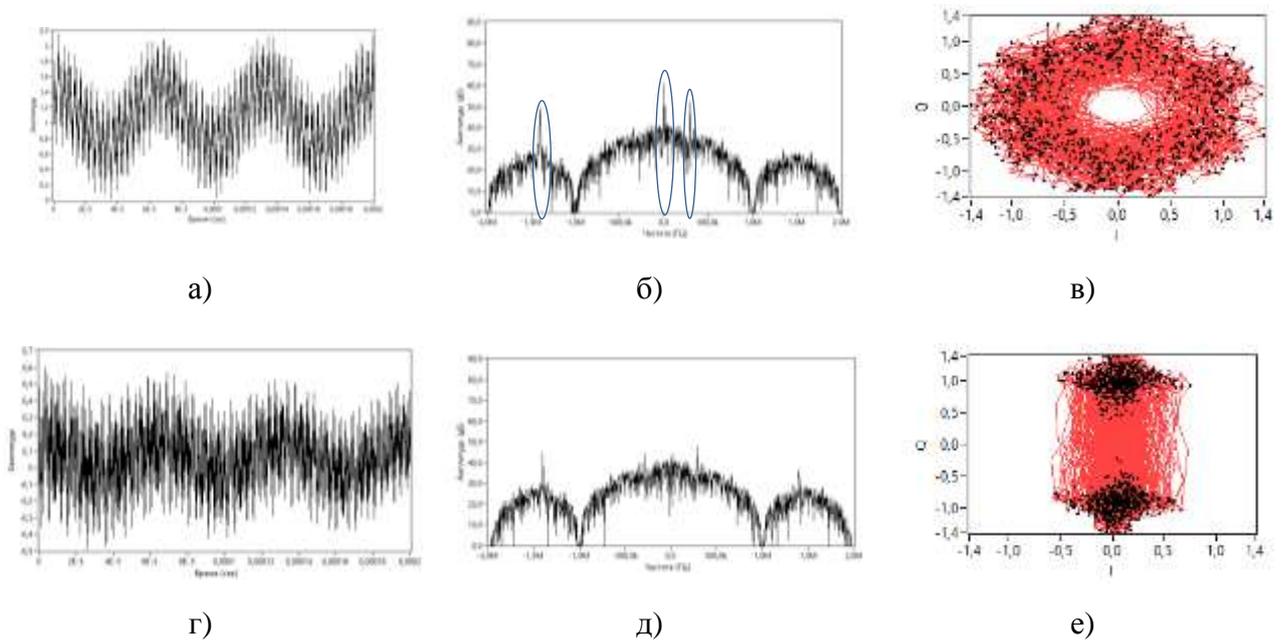


Рис. 9. Результаты обработки сигнала ВП приемного устройства без компенсации (сверху) и с компенсацией в базисе ДКП (снизу) полигармонической помехи

Как видно из рисунков на выходе ВП декодера в приемном устройстве сигнал, который представлен в виде сигнального созвездия вещественной и мнимой составляющих при различении, разделяется на две составляющие (одна характеризует информационную «1», вторая – информационный «0»). При этом достигается значение вероятности ошибочного приема информационного символа, равное  $10^{-6}$  при отношении энергии информационного символа к спектральной плотности средней мощности шума, равном 30 дБ.

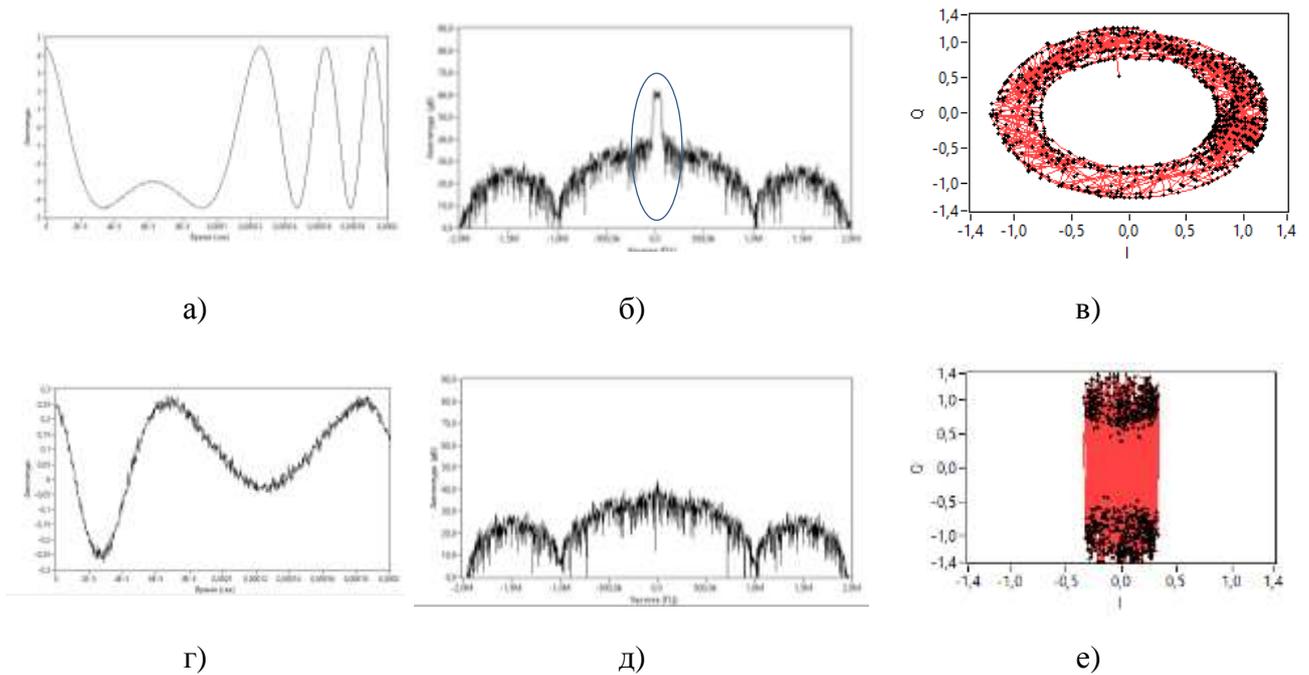


Рис. 10. Результаты обработки сигнала ВП приемного устройства без компенсации (сверху) и с компенсацией в базисе ДКП (снизу) скользящей по частоте гармонической помехи

Следует отметить, что узкополосные спектральные составляющие, которые присутствуют на верхних частях рисунков, в нижних частях рисунков отсутствуют либо незначительно искажают спектр полезного сигнала. Во всех случаях при использовании компенсации ДКП в данных условиях моделирования происходит правильное различение сигналов до определенных критических значений.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

На рис. 11 и 12 представлены расчетные теоретические зависимости вероятности ошибки приема информационного символа от отношения мощности узкополосных гармонических помех к мощности сигнала (1 – при воздействии узкополосных гармонических помех, 2 – применение методов декорреляции помехи, 3 – без воздействия помех) в соответствии с выражением [9]

$$P_0 = Q \left( \frac{\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}}{\sqrt{1 + K_s^{-1} \frac{P_j E_b}{P_s N_0} \gamma}} \right), \quad (18)$$

где  $E_b$  – энергия информационного бита;  
 $K_s$  – коэффициент расширения спектра сигнала;  
 $\gamma$  – коэффициент, учитывающий неравномерность спектральной плотности средней мощности помехи в полосе спектра сигнала.

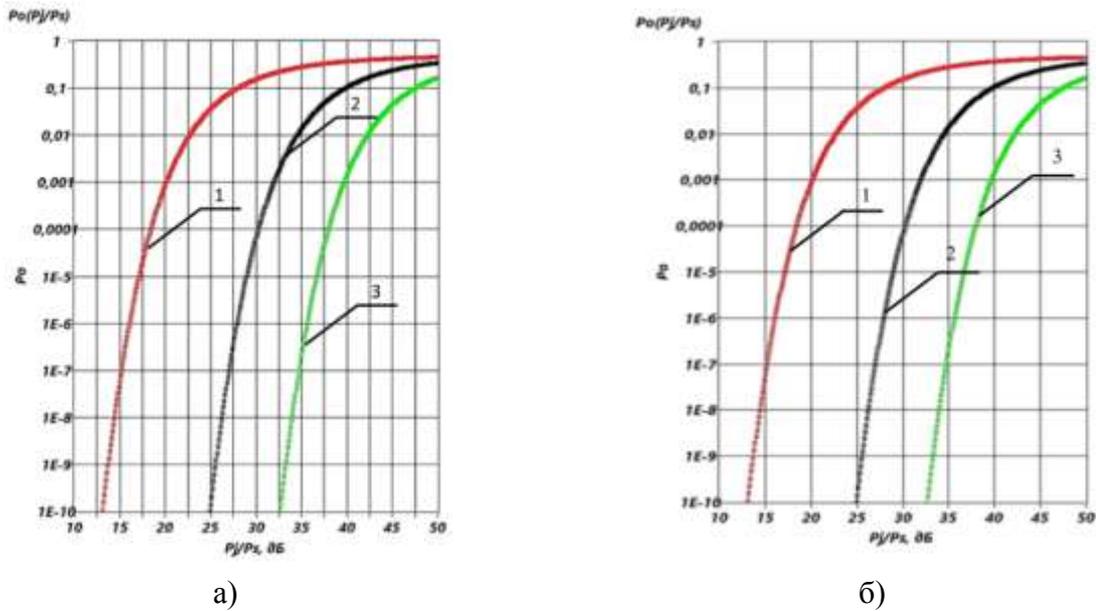


Рис.11. Зависимости вероятности ошибки приема информационного символа от отношения мощности преднамеренных помех к мощности сигнала при воздействии узкополосной шумовой помехи (а) и гармонической помехи (б)

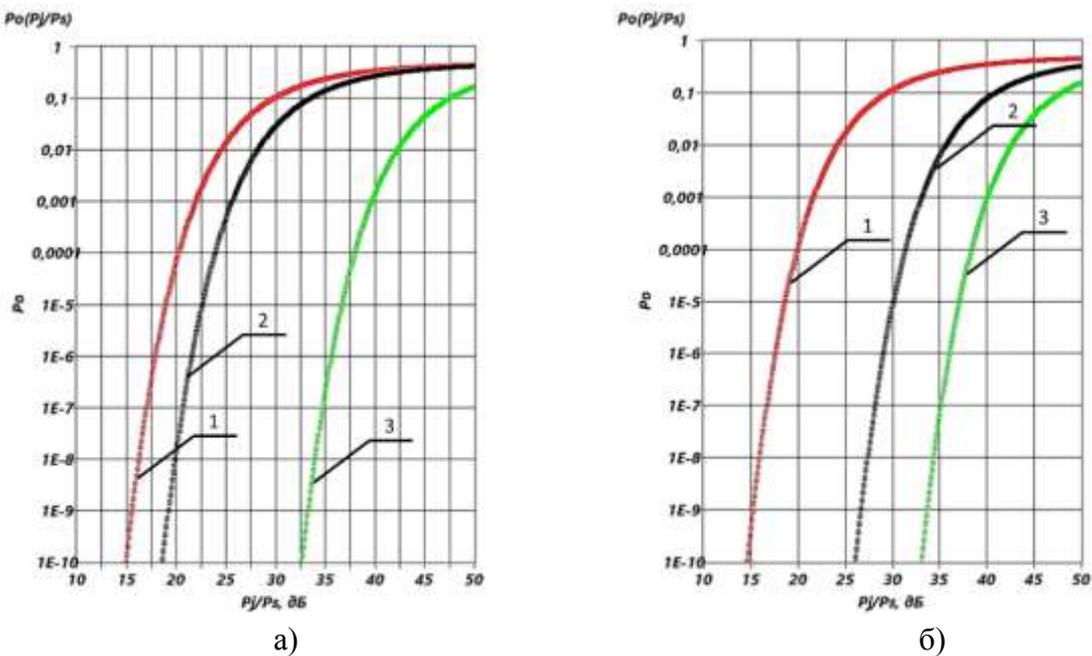


Рис. 12. Зависимости вероятности ошибки приема информационного символа от отношения мощности преднамеренных помех к мощности сигнала при воздействии скользящей по частоте помехи (а) и полигармонической помехи (б)

В результате теоретических расчетов и имитационного моделирования исследования вероятности ошибки приема информационного символа от отношения мощности помех к мощности сигнала при воздействии различных видов узкополосных гармонических помех, которые аппроксимируются моделью дискретного марковского процесса первого порядка через коэффициент, учитывающий неравномерность спектральной плотности средней мощ-

ности помех в полосе спектра сигнала, можно сделать вывод о том, что полученные данные при имитационном моделировании с достаточной степенью достоверности согласуются с теоретическими исследованиями. Результаты сравнения теоретических исследований с данными имитационного моделирования представлены на рис. 13.

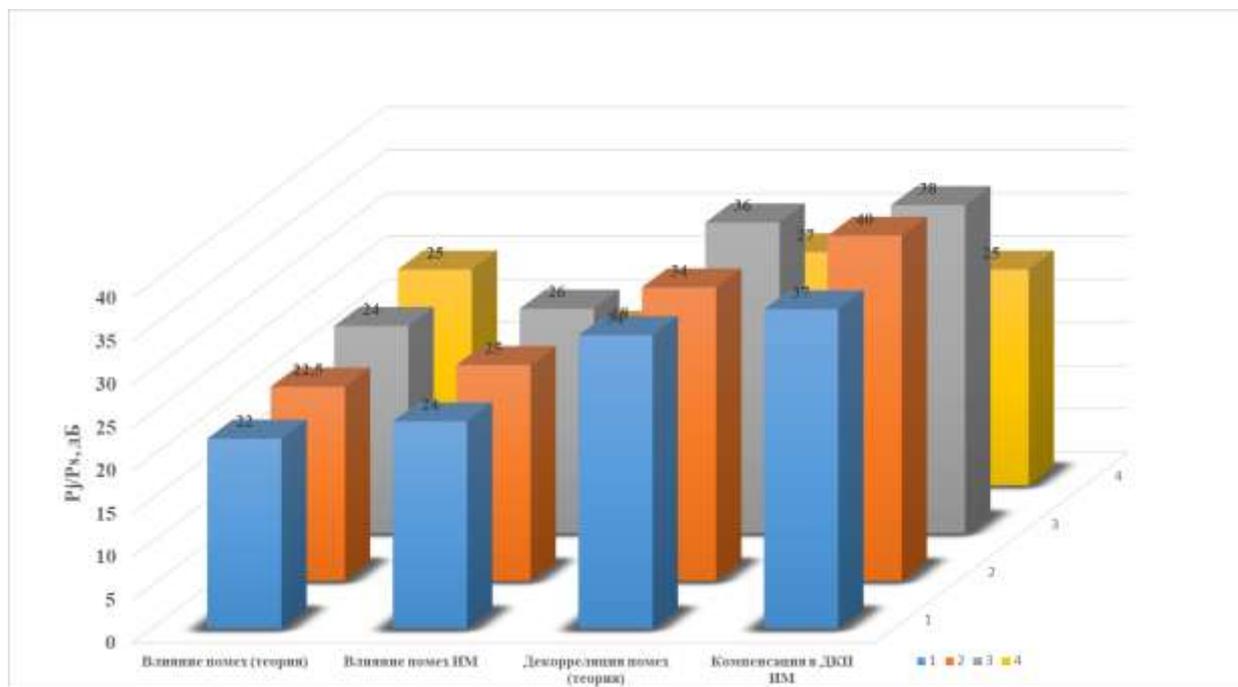


Рис. 13. Диаграмма сравнения коэффициентов подавления при теоретическом расчете и имитационном моделировании:

1 – гармоническая (немодулированная несущая); 2 – узкополосная шумовая помеха;  
3 – полигармоническая (многочастотная) помеха; 4 – скользящая по частоте помеха

В результате имитационного моделирования выявлено, что применение обработки сигналов с компенсацией узкополосных гармонических помех в базе ДКП позволяет достичь вероятности ошибочного приема информационного символа, равной  $10^{-2}$  (уровень достоверности, при котором происходит срыв синхронизации модели) при максимальных отношениях мощности помехи к мощности полезного сигнала, составляющих от 25 до 40 дБ, при коэффициенте расширения спектра сигнала, равном 511. При сравнении теоретических результатов исследований и имитационного моделирования в части функционирования без компенсации помех в большей степени выявлено их соответствие, за исключением скользящей по частоте помехи, так как неравномерность спектральной плотности средней мощности данной помехи в полосе спектра сигнала не всегда одинакова и требует постоянного пересчета коэффициента в теории для учета ее влияния.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов имитационного моделирования следует, что применение дискретных ортогональных преобразований в схемах компенсации помех позволяет локализовать коррелированную помеху для ее последующей компенсации в процессе цифровой обработки.

В радиосистемах передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами выигрыш в отношении помеха/сигнал на входе приемного устройства составляет от 7

до 15 дБ. Таким образом, определяется перспективность использования данной модели для применения в устройствах военной радиоэлектроники, использующих сигналы с расширением спектра и функционирующих в условиях гармонических помех различной структуры.

### Список используемых источников

1. *Борисов В. И., Зинчук В. М.* Помехозащищённость систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. – М. : РадиоСофт, 2008. – 260 с.
2. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития : моногр. / под ред. А. И. Перова. – М. : Радиотехника, 2020. – 1072 с.
3. *Топчий П. Н., Филиппов И. В., Яшков С. А.* Аппаратно-программный макет генератора преднамеренных помех для исследования помехоустойчивости радиоэлектронных систем управления космическими аппаратами // Материалы конференций военно-научного общества Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского : сб. ст. III Всерос. науч.-техн. конф. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – С. 56–59.
4. *Топчий П. Н., Филиппов И. В., Яшков С. А.* Аппаратно-программный комплекс для исследования помехоустойчивости РЭС управления КА // Материалы конференций военно-научного общества Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского : сб. ст. III Всерос. науч.-техн. конф. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – С. 53–56.
5. *Яшков С. А.* Программная модель для исследования помехоустойчивости радиоэлектронных систем управления космическими аппаратами // Юбилейная 70-я Всероссийская научно-техническая конференция : сб. тр. конф. [21–29 апреля 2015 г.]. – СПб. : СПбНТОРЭС, 2015. – Т. 1. – С. 69–71.
6. *Умняшкин С. В.* Основы теории цифровой обработки сигналов. – 4-е изд. – М. : Техносфера, 2018. – 527 с.
7. *Харченко А. В., Яшков С. А.* Алгоритм выбора базиса вейвлет-преобразования для компенсации помех при обработке сигналов в радиосистемах передачи информации // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – С. 44–50.
8. *Харченко А. В., Яшков С. А.* Алгоритм выбора порога при обработке шумоподобных сигналов с компенсацией скользящих по частоте гармонических помех на основе дискретного вейвлет-преобразования // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 102–109.
9. *Харченко А. В., Гарагуля А. С.* Анализ воздействия коррелированных помех на вероятность ошибки различения сигналов // Информация и космос. – 2010. – № 1. – С. 56–58.

В. В. Лавров<sup>1</sup>,  
кандидат технических наук;  
Р. С. Лучкин<sup>2</sup>,  
кандидат технических наук;  
О. И. Немыкин<sup>3</sup>,  
кандидат технических наук;  
М. Е. Прохоров<sup>4</sup>,  
кандидат технических наук;  
Ю. Г. Рындин<sup>5</sup>,  
кандидат технических наук;  
А. В. Тестов<sup>6</sup>  
<sup>1-6</sup>ПАО МАК «Вымпел», г. Москва.

## РОБАСТНЫЙ АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО В ПРОЦЕССЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗВЕЗДНОГО НЕБА

Работа посвящена разработке архитектуры программной реализации робастных алгоритмов верхнего уровня, решающих задачи обработки оптических изображений (ОИ), формируемых в процессе наблюдения техногенных околоземных космических объектов (КО). В основу разработки положен адаптивный байесов подход с использованием аддитивной функции потерь, а для представления структуры ОИ КО применен аппарат булевой алгебры. Такой подход позволил представить процесс обработки ОИ, когда вероятностное описание содержащейся в нем совокупности информационных объектов и фоновой обстановки априори неизвестно, в виде двух этапов. На первом этапе проводится сегментация исходного ОИ (СОИ) без учета особенностей конкретной функциональной задачи (этап первичной обработки). На втором этапе предварительное решение уточняется с учетом структуры априорной информации. В работе на основании предложенного представления структуры СОИ синтезированы соответствующие алгоритмы первичной обработки одиночного ОИ. Приводятся примеры обработки ОИ, полученных в натуральных условиях.

Ключевые слова: адаптивный байесов подход, аддитивная функция потерь, булева матрица, оптическое изображение, сегментация.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросам обработки формируемых телескопами оптических изображений (снимков), созданных в процессе наблюдения техногенных КО, уделяется большое внимание. Это связано с тем обстоятельством, что такая информация является единственной о КО, находящихся в определенных областях околоземного пространства.

В основу синтеза алгоритмов обработки снимков положены две модели – вероятностного описания структур ОИ и функции рассеяния точки (ФРТ). При этом предполагается, что при выборе модели ФРТ обычно учитывают параметры телескопа (например, его чувствительность, время экспозиции, угловую разрешающую способность и т. д.), наблюдаемого КО (положение относительно Солнца и телескопа, его индикатрису рассеяния, динамику движения КО как по орбите, так и относительно центра масс и т. д.), характеристики среды распространения (влияние турбулентности, метеоусловий и т. д.). Перечисленные сведения, а также другие данные следует рассматривать в качестве дополнительной априорной информации, которую можно использовать в процессе обработки исходного ОИ. С точки зрения обработки ОИ основным параметром, характеризующим потенциальные возможности алгоритмов обработки ОИ, является количество значимых пикселей ОИ  $N_{\phi}$ , содержащих ОИ ФРТ. Тогда при выбранном значении количества содержащихся в ОИ КО  $N_{\text{ко}}$  алгоритмы обработки ОИ можно разделить на две группы:

1) алгоритмы обработки ОИ звездного неба (ОИЗН), когда ставится задача выделения на изображении совокупности движущихся «точечных» объектов на фоне звездного неба с оценкой параметров их движения по одиночному снимку или их совокупности. Примеры решения такой задачи рассмотрены в работах [1–4], в которых в рамках статистического подхода предлагаются различные модели вероятностного описания ОИ «полезных» объектов, звезд и фоновой обстановки, учитывающие влияние на оптическое излучение турбулентностей атмосферы, и синтезируются соответствующие алгоритмы обнаружения треков (совокупности угловых измерений движущихся КО);

2) алгоритмы анализа внутренней структуры КО, решающие задачи фильтрации ОИ, ее сегментации и идентификации основных конструктивных элементов КО и объекта в целом. Примеры синтеза таких алгоритмов можно найти в работах [5–7].

Физическими предпосылками решения поставленных задач являются возможность преобразовать исходное ОИ как функцию интенсивности двух переменных в совокупность булевых матриц с их дальнейшей сегментацией путем целенаправленного построчного анализа и определение связных областей при анализе соседства значимых пикселей. Идентификация осуществляется с учетом максимального уровня интенсивности, площади сегмента, ее отношения к площади обрамляющего прямоугольника и показателя компактности как отношения площади к квадрату периметра.

В данной работе ставится задача разработки архитектуры программной реализации верхнего уровня робастного алгоритма первичной обработки ОИ в условиях, когда вероятностное описание структур ОИ фона, мешающих и информационных (КО) объектов априори неизвестны. В основу разработки положены результаты синтеза алгоритма распознавания многофункциональных объектов с одновременной оценкой их информативных параметров, синтезированного в рамках байесового подхода с использованием аддитивной функции потерь [8–10] и аппарата множества булевых матриц [11].

Цель работы – найти архитектуру алгоритма и представление исходной информации, которые позволят разрабатывать эффективные быстродействующие алгоритмы, способные в перспективе вести обработку информации в реальном масштабе времени.

### **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РАМКАХ БАЙЕСОВА ПОДХОДА ПРИ ВЫБРАННОЙ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ**

В работах [8–10] для синтеза алгоритма распознавания многофункциональных объектов с одновременной оценкой их информативных параметров при наличии параметрической неопределенности относительно вероятностного описания анализируемой обстановки в рамках адаптивного байесового подхода предложено использовать аддитивную функцию потерь, слагаемое которой для  $u$ -го объекта из  $N$  возможных задается выражением

$$g(\lambda, d(u, x), \hat{\beta}, n) = \sum_{i \in \lambda} a_i(\beta_i) + \sum_{j=1}^M d_j(u, x) [g_j(\hat{\beta}_j) - \sum_{i \in \lambda} a_i(\beta_i) b_{i,j}(\beta_i, \hat{\beta}_j)] * c(j, u).$$

Дадим пояснение его структуры. Слагаемое  $a_i(\beta_i)$  учитывает потенциальный ущерб, если  $u$ -й объект выполняет  $i$ -ю задачу из  $M$  возможных в ситуации  $\lambda$  при наличии у него вектора  $\beta_i$  информативных параметров. Ситуация  $\lambda$  характеризует многофункциональность  $u$ -го объекта, который может решать определенный набор задач из  $M$  возможных. Для учета этого обстоятельства введен обобщенный символ Кронекера  $K(\lambda, i)$ , принимающий значение 1, если объект в ситуации  $\lambda$  решает  $i$ -ю задачу ( $i=1, M$ ), а значение 0 – в противном случае. Тогда операцию суммирования по возможным ситуациям  $\lambda$  при наличии  $M$  гипотез можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i \in \lambda} a_i = \sum_{j=1}^M a_j K(\lambda, j).$$

Коэффициент  $g_j(\hat{\beta}_j)$  характеризует затраты, которые требуются для принятия решения по  $j$ -й гипотезе с одновременной оценкой вектора информативных параметров  $\hat{\beta}_j$ , а коэффициенты  $0 \geq b_{i,j}(\beta_i, \hat{\beta}_j) \geq 1$  характеризуют эффективности принимаемых решений.  $M$ -мерный вектор принимаемых нерандомизированных решений  $d(u, x) = \{d_j(u, x)\}, j = \overline{1, M}$  представляет собой совокупность индикаторных функций, которые формируются с учетом доступной априорной информации  $c(j, u)$ .

В работах [8–10] показано, что алгоритм принятия решения сводится к следующей двухэтапной процедуре обработки (заинтересованным читателям: вывод и полученные математические соотношения приводятся там же. – *Прим. авт.*).

На первом этапе независимо для каждой  $j$ -й проверяемой гипотезы и  $u$ -го объекта формируются оценки (в общем случае нелинейные) информативных параметров  $\hat{\beta}_j$ .

Формирование решающего правила по каждой гипотезе сводится к независимому сравнению  $M$  апостериорных вероятностей, вычисляемых по формуле Байеса при найденных оценках  $\hat{\beta}_j$ . Значения порогов принятия решения также вычисляются при найденных  $\hat{\beta}_j$ .

На втором этапе предварительное решение уточняется с учетом структуры априорной информации  $c(j, u)$ .

Архитектура синтезированного алгоритма принятия решений позволяет в рамках адаптивного байесовского подхода при наличии априорной неопределенности осуществить следующую модификацию:

- вводить процедуру обнаружения неизвестного информативного КО;
- использовать «эмпирические» процедуры оценки информативных параметров;
- в процессе реализации алгоритма вводить промежуточную классификацию анализируемой статистики;
- формировать однозначные и неоднозначные решения по каждому информативному КО;
- использовать разный состав признаков для проверки каждой из гипотез о классе КО;
- включать процедуры учета априорной информации об анализируемой обстановке.

Переходя к вопросу реализации выбранного алгоритма обработки информации при решении задачи обработки совокупности ОИ удаленного КО в условиях существенной априорной неопределенности относительно вероятностного описания структуры ОИ  $Y$  рассмотрим ее робастное представление.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ УДАЛЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Полагаем, что поступающее на обработку последетекторное оцифрованное ОИ представляет собой квадратную матрицу  $Y$  порядка  $N$ . Ее неотрицательные элементы интенсивности  $Y_{i,j} = S_{i,j} + Z_{i,j}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$  содержат аддитивную смесь фона  $Z_{i,j}$  и информативной составляющей  $S_{i,j}$ . В свою очередь,  $S_{i,j}$  представляет собой сумму интенсивностей как от основных источников информации, так и от сторонних источников (в частности, звезд). В  $S_{i,j}$  могут присутствовать мультипликативные искажения.

Вероятностное описание структуры  $Y$  априори неизвестно. Если ОИ  $Y$  однородно, то вектор нормированной гистограммы интенсивности  $|H\rangle = |H(Y)\rangle$ ; его размерность  $L$  определяется количеством уровней интенсивности в  $Y$  и является эмпирической оценкой распределения его суммарной интенсивности. Для детального покомпонентного представления структуры  $Y$  введем совокупность булевых матриц  $U_l$  порядка  $N$ ,  $i, j$ , элементы которых вычисляются по условному правилу

$$U_l \Rightarrow \{U_l(i, j) = (Y(i, j) == l? true(1): false(0))\},$$

где  $l$  – выбранный уровень интенсивности. Справедливы следующие соотношения:

$$Y = \sum_{l=1}^L l U_l; U_l \cap U_m = \emptyset \text{ при } l \neq m.$$

Совокупность  $U = \{U_l, l = \overline{1, L}\}$  будем рассматривать в качестве множества булевых матриц [11], мощность каждой из которых  $card(U_l)$  равна количеству значимых элементов  $U_l$ .

Дополнительно введем множество пороговых булевых матриц  $B = \{B_l, l = \overline{1, L}\}$ . Структура  $B_l$  задается соотношением  $B_{l-1} = B_l \cup U_{l-1}$  при  $B_M = U_M$ . Заметим, что справедливо отношение включения  $B_l \in B_{l-1}$ , при этом  $card(B_l) = card(B_{l-1}) - card(U_{l-1})$ . С множеством  $B$  можно сопоставить информационный граф дерева исходного ОИ, который удобно использовать при разработке эффективных алгоритмов решения конкретных функциональных задач. В частности, при наличии априорной информации о динамическом диапазоне изменения интенсивности информативных объектов при их фильтрации широко используются режекторные булевы матрицы  $R(k, K)$ , математическое представление которых задается выражением

$$R(k, K) = \bigcup_{l=k}^K U_l, \text{ при } k < K.$$

Представляет интерес вклад в структуру одиночного ОИ информации от объектов трех классов: фона, информационных и сторонних объектов, вероятностное описание распределения интенсивности которых априори неизвестно. В соответствии с выбранной архитектурой алгоритма, исходное ОИ как функции интенсивности двух переменных следует преобразовать в представление однородных объектов (сегментов) с последующей их идентификацией. Такое преобразование в общем случае нелинейно.

Проверка соответствующих гипотез осуществляется с помощью двухэтапного алгоритма. На первом этапе проводятся предварительная фильтрация и сегментация исходного изображения, при этом информация о функциональных особенностях решаемой задачи не используется. На втором этапе решается задача идентификации (классификации) найденных однородных объектов.

В настоящее время общего критерия для решения задач сегментации не предложено [12]. В работе предлагается сегментацию ОИ реализовать с использованием процедуры построения фактор-множества матрицы  $B_l$  при выбранном пороге. При этом в качестве отношения эквивалентности можно использовать бинарное отношение линейной связности значимых элементов  $B_l$  как транзитивное замыкание отношения соседства элементов матрицы на выбранной строке.

Результатом факторизации  $B_l$ , а значит и исходного ОИ, является его разбиение на совокупность блочных матриц  $TG = \{TG(k), k = \overline{1, \widehat{m}_l}\}$ , обладающих следующими свойствами:  $B_l = \bigcup_{k=1}^{\widehat{m}_l} TG(k)$ ;  $TG(i) \cap TG(j) = \emptyset$  при  $i \neq j$ . Полученное разбиение единственное, а его элементы обладают свойством линейной связности значимых пикселей. Следовательно, множество однородных объектов – это множество линейно связных объектов на плоскости.

На рис. 1 показана структура сегментированного ОИ  $Y$  в выбранном представлении его структуры на различных пороговых уровнях.

В левой области рисунка представлена совокупность пороговых матриц  $B_l$ , расположенных снизу вверх по мере уменьшения порога бинаризации исходного ОИ. Стрелками отображены отношения их включения.

В правой части изображена структура соответствующих им сегментов  $TG$  в виде графа деревьев, в вершинах которого отображены упорядоченные по уровням яркости объекты двупольного списка. При этом «родители» могут содержать несколько «детей» либо могут быть инициализированы при любом уровне интенсивности.

## СТРУКТУРА СЕГМЕНТИРОВАННОГО ОИ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ БУЛЕВЫХ МАТРИЦ

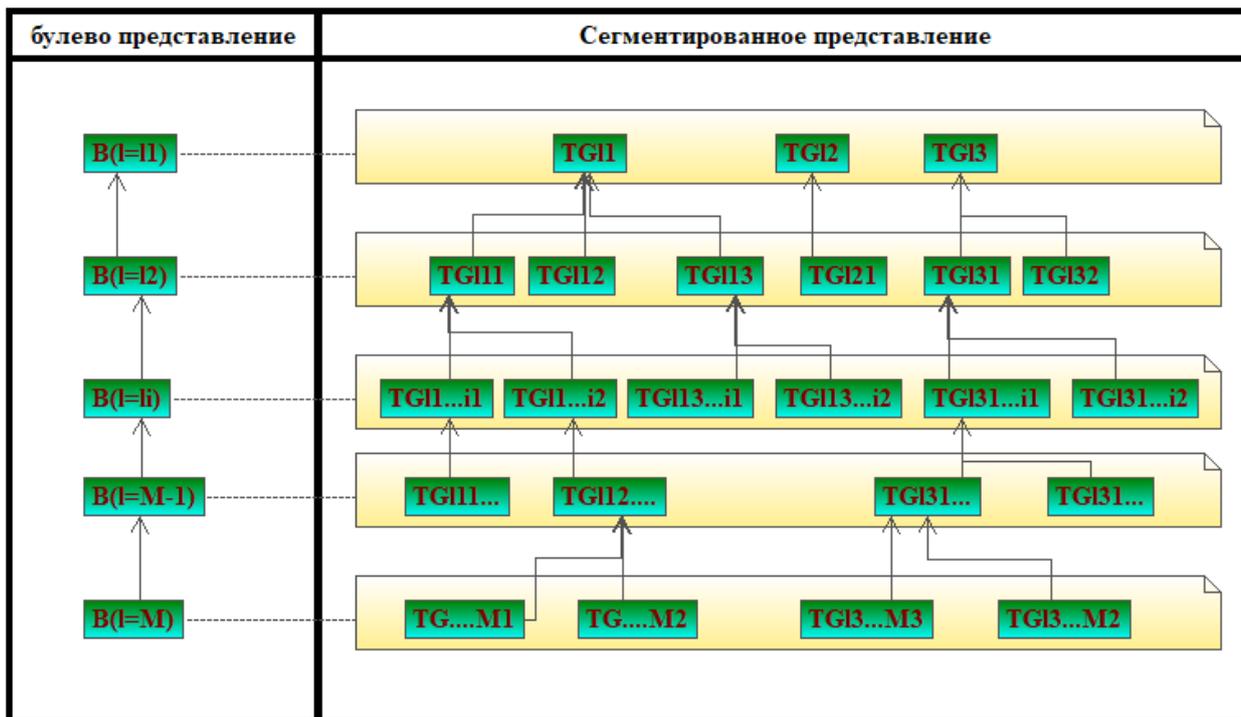


Рис. 1. Структура сегментированного ОИ в представлении булевых матриц

Касаясь робастности алгоритма факторизации, отметим следующее. При выбранной классификации объектов предметной области соответствующие значения вероятностей появления их изображений  $\{p_i(l), i = \overline{1, M}\}$  в структуре матрицы  $B_l$  остаются неизвестными. С другой стороны, эти значения не зависят от детального распределения интенсивностей соответствующих классов по значимым и незначимым элементам матрицы  $B_l$ . В этом отношении предлагаемый алгоритм сегментации следует считать робастным.

Совокупность булевых матриц, их элементов и выделенных на них сегментов является элементами одного и того же множества. С этой точки зрения для характеристики их свойств целесообразно ввести единый набор параметров, которые условимся считать информативными признаками.

### ВЫБОР ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ И ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА СЕГМЕНТИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С совокупностью сегментов бинарного ОИ  $B_l$ , рассматриваемых как элементы линейно связанных областей на плоскости, можно связать три группы информативных признаков.

Первая группа информативна на этапе обнаружения сегментов в структуре  $B_l$ . Она включает в себя обрамляющий сегмент прямоугольник  $R(TG)$  и предпочтительное направление ориентации  $TG$  на снимке  $\alpha$ . Координаты  $R$  в картинной (экранной) системе координат (СК) определяются в процессе сегментации, а  $\alpha$  – с использованием корреляционной матрицы  $K(TG)$ , вычисляемой для значимых элементов  $TG$ .

Вторая группа признаков характеризует внутреннюю структуру выделенного сегмента  $TG$  и может быть использована на этапе предварительной фильтрации и сегментации элементов  $B_l$ . В ее состав входят:  $I_{\max}$  – максимальный уровень интенсивности среди значимых пикселей в сегменте  $TG$ ;  $card(TG)$  – его мощность;  $\mu(TG)$  – нормированный к единице в макси-

муме показатель компактности;  $cond(TG)$  – число обусловленности матрицы  $K(TG)$ ;  $p_{пол}(TG) = card(TG)/S_R$  – показатель полноты, который вычисляется как отношение мощности сегмента к площади обрамляющего его прямоугольника  $R(TG) S_R$ .

Число обусловленности матрицы вычисляется с использованием выражения  $cond(TG) = \sqrt{\lambda_{max}/\lambda_{min}}$ , где  $\lambda_{max}$  и  $\lambda_{min}$  – собственные числа матрицы  $K(TG)$ , и характеризует аппроксимацию структуры  $TG$  ОИ эллипсом.

Безразмерный показатель компактности, значение которого инвариантно к преобразованию поворота, вычисляется по формуле

$$\mu(TG) = C * card(TG)/T^2(TG),$$

где  $C$  – нормировочный коэффициент,  $C = 16$ ;

$T(TG)$  – периметр контура сегмента, вычисляемый с использованием свойств булевой матрицы при наличии внутри значимых элементов совокупности нулевых элементов по формуле

$$T(TG) = card(TG) + n(TG) - iC(TG).$$

Здесь  $n(TG)$  – общее количество односвязных интервалов на строках матрицы;

$iC(TG)$  – количество связных значимых пикселей на ее последовательных строках  $\{tg_i, i = \overline{1, I_0}\}$ , которое вычисляется по формуле

$$iC(TG) = \sum_{i=2}^{I_0} tg_{i-1} \cap tg_i.$$

Значения данной группы признаков можно вычислить для любого элемента факторножества. В частности, для одиночного  $u$  пикселя их значения равны  $\{Y(u), 1, 1, 1, 1\}$ , т. е. информативным признаком является только его интенсивность. Анализ показал целесообразность использования в алгоритмах обработки те сегменты, для которых справедливо следующее условие:  $card(TG) \geq 5$ .

С другой стороны, отдельные  $B_l$  и ОИ  $Y$  в целом обладают дополнительными характеристиками. Например, такой характеристикой является гистограмма интенсивности  $|H(Y)|$ .

Изображение  $Y$  представляет матрицу, элементы которой – оцифрованные значения интенсивности – зависят от двух пространственных координат. В работе [13] было показано, что для характеристики структуры  $Y$  помимо информационного показателя качества необходимо ввести два дополнительных интегральных показателя (качества) и соответствующие им характеристики, отражающие его топологические и метрические свойства. В качестве таких характеристик введем:

1) для описания поведения пространственной структуры  $Y$  – вектор  $|N_0\rangle$ , компоненты которого являются оценками количества линейно связных областей матрицы  $B_l$ ;

2) для описания метрической структуры  $Y$  – вектор  $|T_0\rangle$ , компоненты которого – это значения суммарных периметров совокупности сегментов  $B_l$  с учетом наличия в них возможных внутренних контуров.

Соответствующие значения компонент векторов  $|N_0\rangle$  и  $|T_0\rangle$  вычисляются по битовым изображениям  $B(l)$ , формируемым при выбранных порогах интенсивности  $l = \overline{1, L}$ .

Третья группа признаков формируется при одновременной обработке последовательности ОИ и включает в себя совокупность оценок информативных признаков для решаемой функциональной задачи из числа вышеупомянутых и соответствующих им корреляционных матриц.

## АРХИТЕКТУРА ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ключевым моментом алгоритма первичной обработки ОИ является выбор параметров структуры ОИ в одном канале обработки при реализации многоканальной параллельной обработки. Для проверки гипотезы об однородности и изотропности распределения фона рассмотрим структуру всего ОИ  $Y$ .

В гистограмме интенсивности  $|H\rangle$  аппроксимируем его распределение нормальным  $N_\phi(\mu, \sigma)$ . В действительности распределение интенсивности в  $|H\rangle$  подчинено закону  $\tilde{F}_\beta = (1 - \varepsilon)N_\phi(\mu, \sigma) + \varepsilon G_\alpha$ , где  $p_\phi = (1 - \varepsilon)$  – вероятность появления в ОИ фоновой отметки, а  $\varepsilon$  – вероятность появления в выборке отметок, содержащих и информативную компоненту с гистограммой неизвестного распределения интенсивности  $G_\alpha$  (как правило,  $\varepsilon$  существенно меньше единицы). В таких условиях в качестве точечных оценок  $\hat{\mu}$  и  $\hat{\sigma}$  по совокупности эмпирических данных  $\hat{Y} = \{Y_{ij}, i, j = \overline{1, N}\}$  следует выбирать медианную оценку параметра  $\hat{\mu} = med(\hat{Y})$ , а в качестве оценки его СКО – медиану абсолютных отклонений (MAD оценку)  $s = \hat{\sigma} = c(F)med(|\hat{Y} - \hat{\mu}|)$ , у которых пороговая точка отбраковки  $\varepsilon^* = 0.5$  [14]. Под пороговой точкой понимают максимально возможное отклонение распределения наблюдений, не подчиняющееся опорному (выбранному) закону распределения, при котором оценка параметра остается ограниченной. В частности, при наличии выборки с засорением  $\varepsilon^*$  указывает на допустимую максимально возможную пропорцию ее засорения. В последнем соотношении коэффициент  $c(F)$  зависит от априори выбранной функции распределения выборки  $\hat{Y}$ . В частности, для нормального распределения имеем  $c(F) = 1.483$ .

Проверку справедливости выбранной гипотезы проводим путем деления исходной области ОИ на подобласти (например, методом деления отрезка пополам, т. е. деления ОИ на четыре равные части), нахождения в них оценок соответствующих параметров распределения и сравнения с исходными. При найденных параметрах распределения, исходя из вероятности получения фоновой отметки в пикселе, находим нижний порог формирования булевого ОИ  $l_0$  и проводим преобразование  $Y \rightarrow B = \bigcup_{l=l_0}^L B_l$ .

При отсутствии априорной информации о количестве информационных объектов и вероятностном описании структуры их информативных параметров задачи фильтрации ОИ и сегментации его структуры приходится решать одновременно с использованием робастных алгоритмов обработки информации. Соответствующий алгоритм будет приведен далее.

В качестве алгоритма фильтрации предлагается использовать совокупность алгоритмов бинарной ранговой фильтрации (процентильные фильтры)  $R(\hat{B}(l_0)|k, n)$ . Локальная структура фильтра  $r(i|k, n)$  при выбранном уровне интенсивности  $l \in [l_0, M)$  задается в виде квадратной булевой матрицы порядка  $n$  анализируемых элементов. Вновь формируемое значение интенсивности  $b_i$  в  $i$ -м анализируемом элементе  $B(l)$  вычисляется с использованием условного выражения  $y_i = (k_i > k? true: false)$ , где  $k_i = card(r(i|k, n))$ , а  $k$  – пороговое значение фильтра для принятия положительного значения.

Известно, что процентильные фильтры обладают рядом свойств бинарных морфологических фильтров, реализующих в зависимости от отношения  $k/n$  сжимающие (при  $k > N_m$ ) и расширяющие (при  $k < N_m$ ) преобразования ОИ. Здесь  $N_m$  – положение медианы в отсортированных по убыванию значений элементах в выбранной локальной области.

Сегментацию матрицы  $B_{l_0}$  проводим с использованием алгоритма целенаправленного построчного анализа ее структуры за один проход.

1. В качестве начального приближения выбираем разбиение первой строки  $b_0$  матрицы  $B_{l_0}$  на совокупность односвязных интервалов значимых элементов  $b_0 = \bigcup_{i=1}^{I(0)} b_i(k1, k2)$ , где  $k1, k2$  – граничные положения элементов выделенного интервала, а  $I(0)$  – общее число интервалов.

2. Найденное множество включаем в предварительный состав множества сегментов  $PS = b_0 \in PS$ , которое инициализируется пустым.

3. На последующих шагах алгоритма множество выделенных интервалов  $b_i$  используем для модификации состояния текущих элементов  $ps_j, j = 1, N_{ps}$  множества  $PS$  с помощью введенного отношения соседства. При этом группируем соответствующие элементы  $ps_j$  с включением в их структуру соответствующих интервалов  $\widehat{ps}_j$ .

4. Проводим анализ структуры  $PS$ , переводя в фактор-множество  $T(TG)$  элементы  $PS$ , в структуре которых отсутствуют интервалы  $\widehat{ps}_j$ .

5. Исключаем из  $b_i$  интервалы  $\widehat{ps}_j$ , а оставшиеся интервалы добавляем в  $PS$ .

6. По завершении цикла оставшиеся элементы  $PS$  переносим в фактор-множество  $T(TG)$ .

7. Проводим ранжировку элементов фактор-множества  $T(TG)$  по мощности и разбиваем на два подмножества:  $T_{\min}$ , элементы которого  $TG_i$  удовлетворяют условию  $card(TG_i) < card_0$ , и  $T_{\max}$ , для элементов которого справедливо  $card(TG_i) \geq card_0$  (здесь  $card_0$  – пороговый уровень мощности).

8. Для элементов первой группы в локальных областях их локализации проводится расширяющая ранговая фильтрация с последующей повторной сегментацией.

9. Для элементов второй группы после анализа мощности сегментов, формируемых при пороге, равном  $l_0 + 1$ , принимается решение о возможной сжимающей фильтрации.

На последнем этапе предварительной обработки формируется структура исходной статистики для решения основной функциональной задачи.

При обработке ОИЗН в ее состав входят группы «точечных» объектов, содержащих оценки угловых координат, максимальной интенсивности и соответствующих корреляционных матриц.

Для алгоритмов анализа внутренней структуры КО формируется полный граф сегментированных изображений  $\{B_l, l = \overline{l_0, L}\}$ , для каждого сегмента которого вычислены оценки информативных параметров первой и второй групп в полном объеме.

## ПРИМЕРЫ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Приведем два примера результатов предварительной обработки ОИ удаленных КО.

В качестве обработки ОИ, содержащих ОИ тусклых треков движущегося КО (№ мжд 2020092001), на рис. 2 приведены результаты обработки трех последовательных ОИЗН, сформированных телескопом в одном сеансе наблюдения в режиме обзора (контроля).

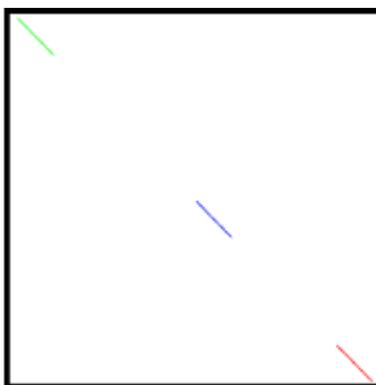


Рис. 2. Изображения выделенных треков КО  
на трех последовательных снимках ОИЗН  
(соответствующие им цвета: зеленый–синий–красный)

Результаты получены с использованием прототипа программной реализации предлагаемого в работе робастного алгоритма предварительной обработки изображений удаленных КО.

Соответствующие исходные оценки параметров для алгоритма обработки координатной информации получены в условиях длительной экспозиции ( $\approx 1$  сек). В данном режиме информативным параметром для обнаружения тусклого флукутирующего трека является значение его компактности. Оценки, вычисленные в экранной СК, начало которой выбрано в верхнем левом углу, приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Параметры выделенных треков

№ п/п	$\tau$ , сек	$\langle x \rangle$	$\langle y \rangle$	$q_{\max}$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\alpha$ , град	$\mu$
1	0	3411	1056	1,36	2,2	1,10	35,0	.042
2	5	3612	1352	1,34	2,1	1,05	34,8	.042
3	9	3770	1585	1,38	2,05	1,3	34,1	.045

Дадим краткое пояснение к данным столбцов в таблице:  $\tau$  указывает на время начала экспозиции по отношению к первому измерению;  $\langle x \rangle$  и  $\langle y \rangle$  – начальные координаты трека в пикселях;  $q_{\max}$  – отношение «сигнал/фон» в точке трека с максимальной интенсивностью;  $\alpha$  – угловое направление трека;  $\mu$  – его показатель компактности. Параметры  $\lambda_x$  и  $\lambda_y$  – собственные числа корреляционной матрицы ошибок, вычисленные в пикселях по данным, в которых проведена компенсация средней скорости движения КО. Последняя сформирована по начальным координатам отдельных треков.

Анализ представленных данных (в частности, оценок параметра  $q_{\max}$ ) позволяет сделать вывод о принципиальной возможности решения рассмотренной задачи.

Анализ внутренней структуры одиночного КО проводится на снимках, которые в большинстве случаев получены в режиме сопровождения КА. При этом доступна следующая априорная информация:

- координаты КО в СК j2000;
- мощность его сегмента ОИ на снимке при пороговом уровне факторизации  $\geq 500$ ;
- динамический диапазон изменения интенсивности ОИ отдельных конструктивных элементов на снимке достаточно велик.

Учет этой априорной информации позволяет достичь достаточно качественной обработки ОИ при решении задачи оценки внутреннего состояния КА уже на предварительном этапе обработки ОИ.

На рис. 3 (слева направо) показаны модельное ОИ КА Gaofen 14, решающего задачу дистанционного зондирования Земли, и соответствующая его положению область снимка, включающая в себя ОИ наблюдаемого объекта.



Рис. 3. Модельное изображение КА и его изображение, полученное в натуральных условиях наблюдения

Проведем простой анализ структуры графа дерева на этапе формирования решающей статистики ОИ внутренней структуры одиночного КА. В процессе анализа сохраним сегменты, содержащие несколько потомков, в выделенной ветви оставим максимально правдоподобный сегмент по отношению к эталонным сегментам. В результате получим структуру графа ОИ КА и соответствующие выделенным углам ОИ, представленные на рис. 4.

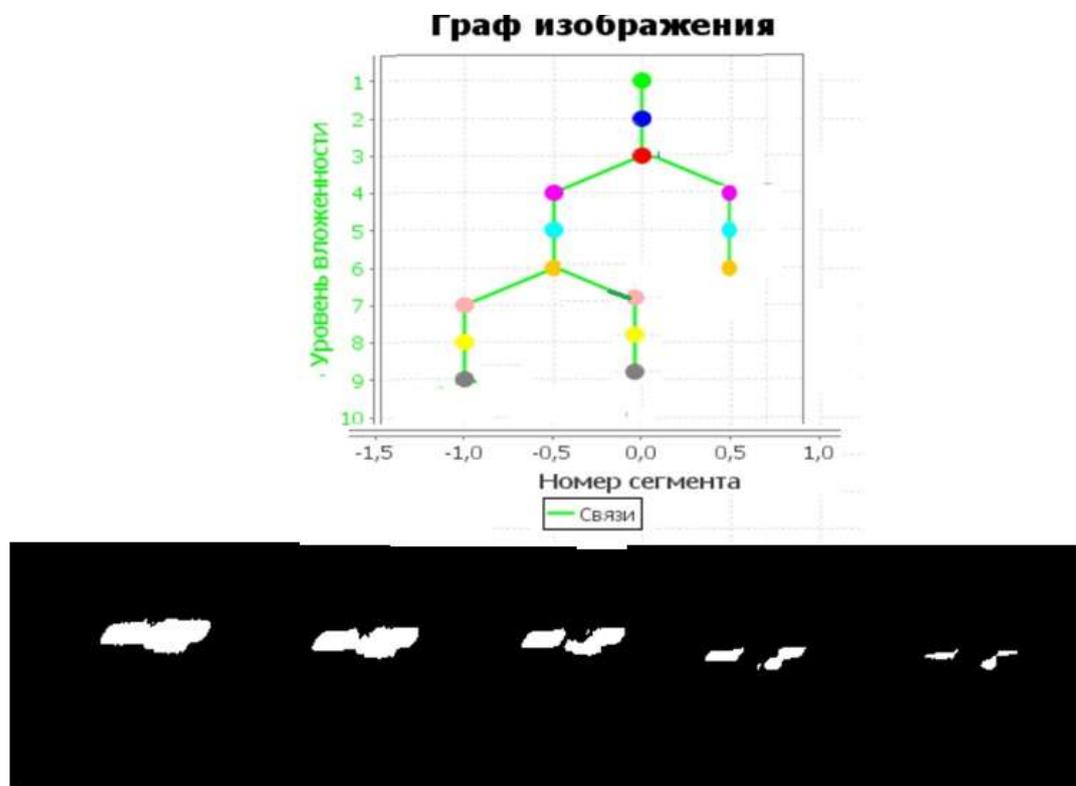


Рис. 4. Сформированный граф дерева ОИ КА Gaofen 14 и локальные ОИ в узлах выделенного дерева

Экспертный анализ представленных на рис. 4 данных позволяет сделать вывод о наличии у КА двух панелей и блока, решающего функциональную задачу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм обработки ОИ удаленных КО в условиях существенной априорной неопределенности относительно вероятностного описания распределения интенсивностей фонового излучения, сторонних источников и информационных объектов. В основу архитектуры алгоритма положена процедура независимой проверки дуальтернативных гипотез с одновременной оценкой соответствующих информативных параметров, обоснование применения которой дано в [9]. В процессе адаптации ее структуры к решению задачи обработки ОИ удаленных КО предложена двухэтапная обработка ОИ. На первом этапе решается задача преобразования ОИ как функции интенсивности в представление однородных объектов (линейно связных областей) с оценкой их информативных параметров. На последующем этапе с использованием полученного представления решается основная функциональная задача.

В статье основное внимание уделено разработке алгоритма первого этапа. С использованием робастных методов анализа данных и теории множеств разработан устойчивый вариант алгоритма первичной обработки ОИ в условиях наличия неоднородного фонового излу-

ния, статистические характеристики распределения интенсивности которого априори неизвестны, в составе следующих частных алгоритмов:

– алгоритма разбиения исходного ОИ на совокупность локальных областей, в которых параметры фонового излучения можно считать локально однородными, с использованием аппроксимации истинного распределения фона нормальным, параметры которого оцениваются робастным алгоритмом;

– алгоритма представления исходного ОИ совокупностью пороговых булевых матриц без потери содержащейся в нем информации;

– алгоритма сегментации ОИ в представлении булевых матриц с использованием процедуры их факторизации с применением бинарного отношения соседства;

– алгоритма процентильной фильтрации, позволяющего решать задачу фильтрации флуктуирующих целей.

Приведены примеры предварительной обработки ОИ предложенным алгоритмом при решении задач выделения тусклых треков на ОИ, сформированных в режиме обзора, и анализа внутренней структуры наблюдаемого объекта, решающих задачу формирования исходных данных для решения основной функциональной задачи.

Приведенные примеры обработки полученных в натуральных условиях искаженных исходных изображений подтверждают возможность решения таких задач с помощью предлагаемых методов.

С практической точки зрения алгоритм может быть положен в основу процедур предварительной автоматической обработки ОИ в реальном масштабе времени, в частности в интересах ККП.

### Список используемых источников

1. Колесса А. Е., Кузовов К. Д. Выделение в цифровом изображении следов тусклых космических объектов с неизвестными орбитами / Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел»; Московский физико-технический институт. – URL: <https://docplayer.ru/37371882-Vydelenie-v-cifrovom-izobrazhenii-sledov-tusklyh-kosmicheskikhobektov-s-eizvestnymi-orbitami.html> (дата обращения: 14.12.2023).

2. Колесса А. Е., Репин В. Г. Робастный адаптивный алгоритм выделения отметок от целей в цифровом изображении / Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел». – URL: <https://docplayer.ru/51026878-Robastnyu-adaptivnyu-algoritm-vydeleniya-otmetok-ot-celey-v-cifrovomizobrazhenii.html> (дата обращения: 14.12.2023).

3. Uney M., Mulgrew B., Clark D. Maximum Likelihood Signal Parameter Estimation via Track Before Detect // Conference: Sensor Signal Processing for Defence. – Edinburgh, 2015. – Vol. 1.

4. Gural P. S., Larsen J. A., Gleason A. E. Matched Filter Processing for Asteroid Detection // The Astronomical Journal. – 2005. – № 130. – P. 1951–1960.

5. Свиридов К. Н. Технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. – М. : Знание, 2005. – 452 с.

6. Новые методы обработки изображений / под ред. А. А. Потапова. – М. : Физматлит, 2008. – 496 с.

7. Методы и алгоритмы полного цикла обработки последетекторного малоконтрастного оптического изображения / В. В. Лавров [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 3. – С. 99–107. – DOI: 10.21778/2218-5453-2018-3-99-107.

8. Бакут П. А., Жулина Ю. В., Иванчук Н. А. Обнаружение движущихся объектов / под ред. П. А. Бакута. – М. : Сов. радио, 1980. – 288 с.

9. Рындин Ю. Г., Тартаковский Г. П., Тюрин В. С. Распознавание объектов, одновременно принадлежащих нескольким классам // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, № 9. – С. 1066–1072.

10. *Тартаковский Г. П.* Теория информационных систем. – М. : Физматкнига, 2005. – 304 с.
11. *Сдвижков О. А., Мацнев Н. П.* Матричное исчисление в алгебре логики. – URL: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.88.10.002> (дата обращения: 14.12.2023).
12. *Харинов М. В.* Обобщение трех подходов к оптимальной сегментации цифрового изображения // Труды СПИИРАН. – 2013. – № 2. – С. 294–316.
13. *Милюкова О. П., Чочиа П. А.* Об оценке сложности изображений с помощью двумерных вариаций // Информационные процессы. – 2012. – Т. 12, № 4. – С. 362–371.
14. *Шуленин В. П.* Робастные методы математической статистики. – Томск : Изд-во НТЛ, 2016. – 260 с.

Д. С. Махов<sup>1</sup>,  
доктор технических наук;

А. В. Шумбар<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Краснодарское высшее военное училище  
имени генерала армии С. М. Штеменко, г. Краснодар.

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОКАНАЛОВ МНОГОЛУЧЕВОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Предложен подход к перераспределению мощности парциальных радиоканалов, формируемых многолучевой фазированной антенной решеткой воздушного робототехнического средства, с целью сравнения устойчивости функционирования системы передачи информации при разных распределениях мощности. Подход позволяет уменьшить вероятность ошибки парциальных радиоканалов с помощью различных методов распределения мощности в зависимости от условий помеховой обстановки. Суть предлагаемого подхода заключается в пропорциональном распределении мощности различными алгоритмами с сохранением без изменения параметров антенны и мощности передатчика. Приведены аналитические выражения показателей для синтеза алгоритма с использованием математического и имитационного моделирования.

Ключевые слова: воздушное робототехническое средство, многолучевая фазированная антенная решетка, система передачи информации, алгоритм перераспределения параметров радиоканалов, парциальный радиоканал.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы повышения эффективности применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) являются актуальной комплексной задачей [1–4]. Для ее выполнения необходимо решить ряд задач, связанных с устранением противоречия между увеличением объема передаваемой информации и временем на ее передачу в процессе выполнения полетного задания, которые, в свою очередь, зависят от качественных и количественных характеристик радиоканалов (РК) [5]. Отдельным вопросом стоит задача организации управления БЛА при изменении помеховой обстановки в процессе выполнения полетного задания. В работах [1–3] предложен подход к синтезу нескольких парциальных РК, что позволяет представить систему передачи информации БЛА в виде системы SIMO (*single input – multiple output*) – системы связи с одним входом на передаче и многими выходами на приеме, а также проводить анализ ее системных характеристик и параметров. Такое представление, с точки зрения системного анализа, дает возможность как применять известные алгоритмы перераспределения параметров, так и разрабатывать новые. Однако разработка новых алгоритмов связана с совершенствованием существующих математических моделей, связывающих между собой параметры и целевые показатели, так как зачастую накладываемые ограничения или добавление новых переменных не позволяют добиться их улучшения.

В связи с этим возникает необходимость разработки новых подходов на основе сравнительного анализа существующих методов перераспределения параметров с целью улучшения системных показателей парциальных РК.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Приведем постановку задачи на основе метода, описанного в работе [1]. Пусть на воздушном робототехническом средстве (РТС) установлена многолучевая фазированная антенная

решетка (МФАР), которая формирует  $k = \overline{1, K}$  лучей диаграмм направленности (ДН) – нисходящих РК. Пусть также имеется  $m = \overline{1, M}$  наземных пунктов приема информации (ПП), расположенных на различных расстояниях от передающего устройства, в состав которых входит один наземный пункт управления (НПУ), формирующий обратную связь, по которой передаются данные о качестве парциальных РК. Следует отметить, что в отличие от задачи, описанной в [1], в данной задаче  $K \neq M$  (рис. 1).

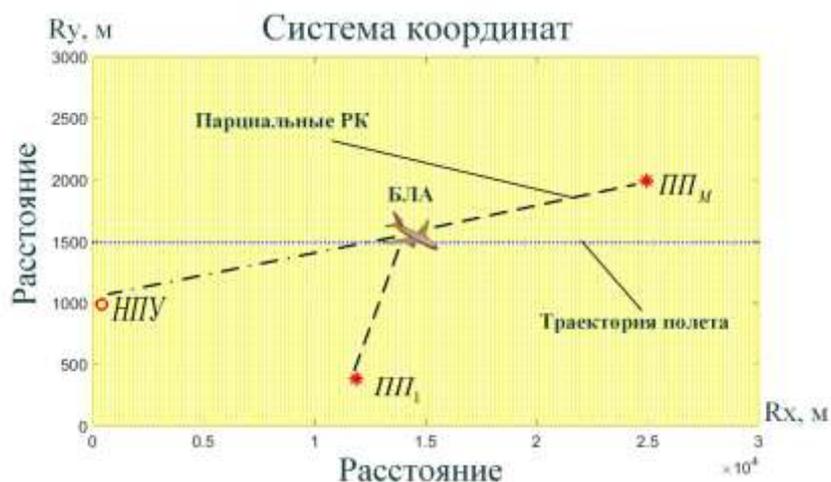


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой задачи

Задача заключается в повышении устойчивости функционирования путем уменьшения вероятности ошибки в параллельных РК  $\rho_{\parallel}$  при передаче информации с РТС на наземные приемные пункты. Ограничениями на задачу являются отсутствие преднамеренных помех, идеальные параметры наземных радиолиний, соединяющих ПП и НПУ, РК передачи информации с аддитивным белым гауссовским шумом.

Целевая функция и требование к ней могут быть описаны выражением

$$\rho_{\parallel} = 0.5 \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\sum_{m=1}^M N_m} \right) \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $N$  – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума на входе приемника;

$$\Phi(x) \text{ – функция Крампа, } \Phi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

При условии того, что МФАР создает возможность синтеза нескольких РК [6], возникает необходимость определить, какую долю мощности необходимо выделить для каждого РК в определенном временном промежутке и при определенной помеховой обстановке, чтобы сохранить требуемую устойчивость функционирования системы передачи информации [7]. Поэтому повышение качества переданной информации на каждый из ПП системы СИМО зависит от правильного перераспределения мощности между РК.

Ограничение на количество РК конкретизируется возможностями МФАР по максимальному числу парциальных ДН [8], которые она способна сформировать.

Ограничение ресурса мощности передатчика может быть выражено условием

$$P_{t\Sigma} = \sum_{m=1}^M P_{tm}. \quad (2)$$

Синтез нескольких РК позволяет добиться уменьшения вероятности ошибки в парциальных РК, что эквивалентно повышению устойчивости системы в целом. Следовательно, задача может быть представлена в виде разработки метода распределения мощности передатчика между парциальными РК, который позволяет добиться минимума вероятности ошибки  $\rho_{\parallel}$ . Для решения задачи проведем моделирование и анализ методов решения распределительных задач, наиболее часто применяемых в системах передачи информации.

Так как накладываются ограничения на мощность передатчика, то необходимо определить параметры, на основе которых она будет распределяться, а также ее зависимость с целевой функцией (1).

Выражение для  $N$  одного из  $m$  парциальных РК описывается формулой [5–7]

$$N = \frac{P_t \eta_t \eta_r D_t D_r \Delta f \lambda^2}{16\pi^2 v R_r^2 q}, \quad (3)$$

где  $P$  – мощность передатчика;  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия;  
 $D$  – коэффициент направленного действия МФАР;  
 $\Delta f$  – диапазон частот сигнала;  
 $\lambda$  – длина волны;  
 $R$  – расстояние от БЛА до приемника;  
 $v$  – скорость передачи информации;  
 $q$  – средняя мощность шума;  
 $t, r$  – отношение параметра к передатчику и приемнику соответственно.

Из формулы (3) видно, что изменение  $N$  во времени определяется изменением расстояния между приемником и передатчиком, а также помеховой обстановкой.

Следовательно, достижение минимального значения целевой функции (1) возможно за счет обеспечения максимума мощности передатчика для каждого парциального РК при ограничении (2).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Проведем моделирование перераспределения мощности между парциальными РК для достижения минимального значения целевой функции (1) методами множителей Лагранжа (ММЛ) и *water-filling* «водозаполнения» [9, 10]. Также рассмотрим равномерное распределение мощности между всеми РК на всей траектории полета:

$$\sum_{m=1}^M P_{tm} = \frac{P_{t\Sigma}}{m}, \quad (4)$$

где  $m$  – количество РК.

Применение данных методов позволяет учесть накладываемые ограничения (2).

Рассмотрим решение задачи ММЛ, который относится к прямым методам решения оптимизационных задач и позволяет находить экстремум нелинейной функции. Данный метод наиболее подходящий, так как задача (1) с условием (2) является задачей нелинейного программирования в силу особенностей целевой функции. Тогда это задача выпуклого программирования, и при соблюдении условий Куна – Таккера можно получить множество  $P_{tm} : \arg \min(\rho_{\parallel})$ :

$$L(P_{tm}) = 0.5 \left[ 1 - \sum_{m=1}^M e^{-\frac{N}{2}} \right] + \alpha \left( \sum_{m=1}^M P_t(m) - P_{t\Sigma} \right). \quad (5)$$

Для этого составим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) из частных производных функции Лагранжа (5) по  $P_i(m)$  и  $\alpha$ :

$$\begin{cases} L'_{P_1} = 0.5N'(P_{11})e^{\frac{-N(P_{11})}{2}} + \alpha, \\ L'_{P_2} = 0.5N'(P_{12})e^{\frac{-N(P_{12})}{2}} + \alpha, \\ L'_{P_3} = 0.5N'(P_{13})e^{\frac{-N(P_{13})}{2}} + \alpha, \\ L'_{\alpha} = P_{11} + P_{12} + P_{13} - P_{t\Sigma}. \end{cases}$$

Решение данной СЛАУ позволяет определить значения параметров и неизвестный множитель Лагранжа  $\alpha$ , а также получить систему равенств. Применение ММЛ пропорционально распределяет мощность в парциальных РК в зависимости от расстояния приемника и передатчика.

Рассмотрим другой подход к решению задачи методом *water-filling* «водозаполнения», который является универсальным методом распределения мощности по каналам связи при отсутствии межканальных помех, и используется для оптимизации мощности в системах сотовой связи. Так как в условиях задачи определено, что в состав ПП входит НПУ, формирующий обратную связь, по которой передаются данные о качестве парциальных РК, то индивидуальная пропускная способность может быть выражена формулой

$$C = \log_2(1 + N).$$

Принимая во внимание ограничение (2), суммарная пропускная способность задается их суммой:

$$C = \sum_{m=1}^m \log_2(1 + N_m(P_m)). \quad (6)$$

Таким образом формируем распределение мощности как проблему максимизации пропускной способности, где максимизируем сумму пропускной способности по каналам с различным коэффициентом усиления РК.

Для решения данной задачи составим уравнение Лагранжа из выражений (6) и (2):

$$L(P_m) = - \sum_{m=1}^M \log_2(1 + N_m(P_m)) + \alpha \left( \sum_{m=1}^M P_m - P_{t\Sigma} \right).$$

Вычислив производные по  $P_m$ , получаем значение распределения мощности по конкретному РК:

$$p_m = P - \frac{q}{g_m}, \quad (7)$$

где  $p_m$  – распределенная мощность для  $m$ -го РК;

$P$  – общая мощность передатчика;

$q$  – средняя мощность шума;

$g_m$  – коэффициент усиления  $m$ -го канала.

Для того чтобы установить связь между параметрами мощности, влияющими на вероятность ошибки (1) парциального РК данными методами, приведем сравнительные графики распределения мощностей (рис. 2). На рис. 2 цифрами 1–3 обозначены значения мощностей, перераспределенных на основе выражений (4), (5) и (7). Кривая 1 показывает распределение мощности методом *water-filling*. Кривая 2 показывает распределение мощности ММЛ. Кривая 3 показывает равномерное распределение мощности.

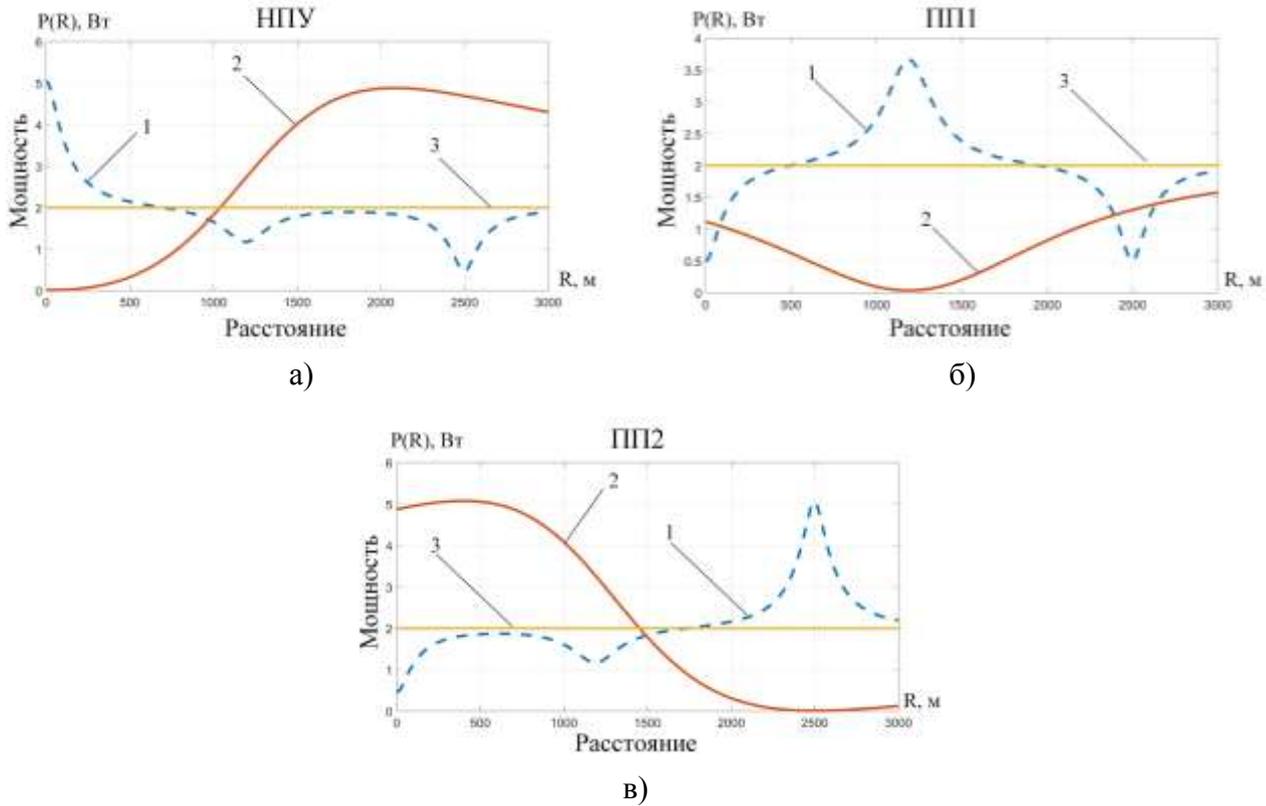


Рис. 2. Зависимость перераспределения мощности в парциальных РК от расстояния: а – зависимость перераспределения мощности сигнала на входе приемника НПУ от удаления БЛА; б – зависимость перераспределения мощности сигнала на входе приемника ПП1 от удаления БЛА; в – зависимость перераспределения мощности сигнала на входе приемника ПП2 от удаления БЛА

При распределении мощности методом *water-filling*, который приблизительно совпадает с равномерным распределением, мощность в РК распределяется быстрее, за счет чего удается уменьшить вероятность ошибки в РК при приближении к конкретному ПП, при этом использование ММЛ дает более точное распределение мощности, но за большее время, так как вероятность ошибки в РК уменьшается при отдалении от конкретного ПП. Результаты представлены на рис. 3.

На рис. 3 цифрами 1–3 обозначены значения вероятности ошибки в РК. Кривая 1 показывает значение вероятности ошибки при распределении мощности методом *water-filling*. Кривая 2 показывает значение вероятности ошибки при распределении мощности ММЛ. Кривая 3 показывает значение вероятности ошибки при равномерном распределении.

Неоднозначность полученных результатов говорит об отсутствии стабильного алгоритма перераспределения параметров парциальных РК для выполнения (1) при ограничении (2). Видимо, это связано с операциями дифференцирования целевой функции (1) при поиске решения. Использование непрямых, численных методов, по всей видимости, даст более точное и устойчивое решение, но за большее время. Однако большое количество параметров делает функцию многоэкстремальной, что увеличивает сложность применения численных методов. Поэтому в качестве альтернативы можно предложить подход на основе теории нечетких множеств [11]. Для этого математическую модель (1) можно представить в виде функции принадлежности (ФП)  $\mu_p(P_i)$  нечеткого множества значений вероятности ошибки  $\tilde{p}$  на универсальном множестве значений параметров мощности в парциальных РК, заменив константы одним коэффициентом (рис. 4).

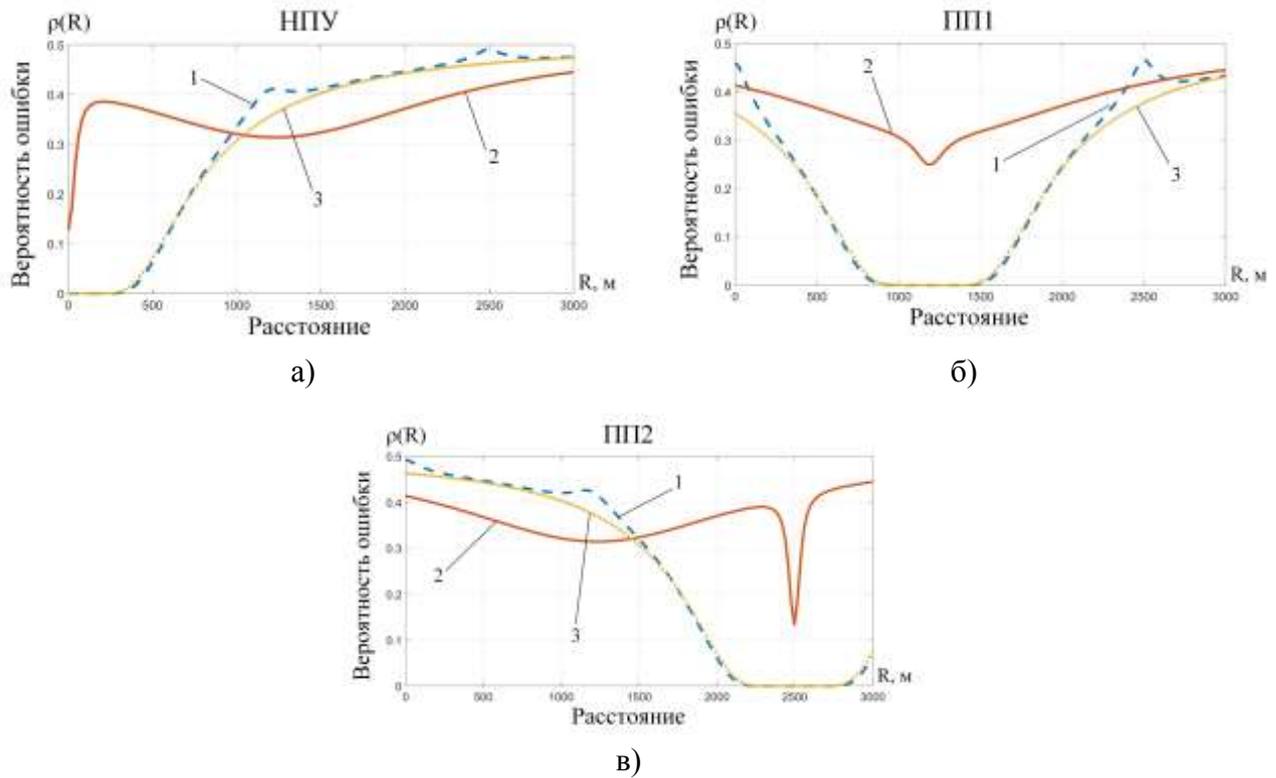


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки в парциальных РК от расстояния: а – зависимость вероятности ошибки от расстояния в РК НПУ; б – зависимость вероятности ошибки от расстояния в РК ПП1; в – зависимость вероятности ошибки от расстояния в РК ПП2

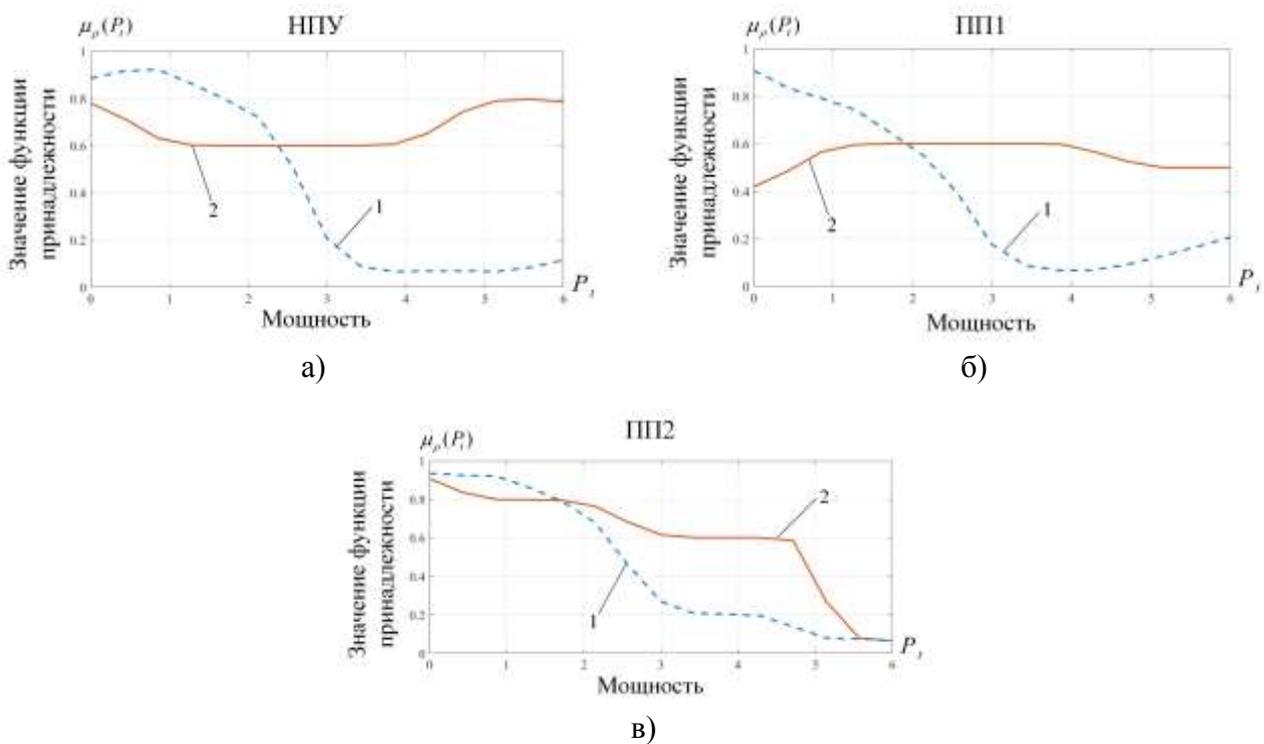


Рис. 4. Функции принадлежности значений вероятности ошибки от мощности сигнала (кривые 1 и 2 означают распределение мощности water-filling и ММЛ соответственно): а – НПУ; б – ПП1; в – ПП2

Использование аппарата теории нечетких множеств позволяет выразить параметры и функции через универсальные ФП, область существования которых находится в пределах  $\{0,1\}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ подходов к перераспределению мощности между парциальными РК, формируемыми многолучевой фазированной антенной решеткой воздушного робототехнического средства с ограничениями на общую мощность, выделяемую для функционирования передатчика, показал неоднозначность их выбора. Различие в целевых функциях, в учете ограничений не позволяет определить лучший из них. В связи с этим необходим новый подход к решению данной задачи, позволяющий учесть нелинейность целевой функции. Такой подход может быть составлен на основе теории нечетких множеств, модели и методы которой позволяют получать более точное решение по сравнению с регрессионными моделями и классическими подходами к решению задач на их основе.

## Список используемых источников

1. *Махов Д. С.* Метод оптимизации энергетических параметров системы передачи информации в парциальных радиоканалах малоразмерных подвижных объектов на основе аппарата теории нечетких множеств // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 27–49.
2. *Макаренко С. И.* Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2. – С. 73–132.
3. *Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б.* Технология ММО: принципы и алгоритмы. – М. : Горячая линия–Телеком, 2014. – 244 с.
4. *Андронов И. С., Финк Л. М.* Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. – М. : Сов. радио, 1971. – 408 с.
5. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
6. *Полынкин А. В., Ле Х. Т.* Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – Т. 2, № 7. – С. 98–106.
7. *Джазовский Н. Б., Орлова Л. В.* Радиоканалы систем передачи информации. – Пенза : Пензенский политехнический институт, 1988. – 64 с.
8. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / В. С. Филиппов [и др.]; под ред. Д. И. Воскресенского. – М. : Радио и связь, 1994. – 592 с.
9. *Yong Soo Cho, Jaekwon Kim* Mimo wireless communications with Matlab. – John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd – Singapore, 2010. – 270 p.
10. *Zhichao Zhou, Dong Wang* Pilot Scheduling based on Water-filling Algorithm in Massive MIMO. – Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University [China], 2016. – P. 2.
11. *Штовба С. Д.* Проектирование нечетких систем средствами Matlab. – М. : Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.

А. П. Доронин,  
*доктор технических наук, профессор;*  
А. В. Новиков,  
*кандидат технических наук;*  
В. М. Петроченко,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
В. В. Филиппёнок

## **МЕТОД СОЗДАНИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ПОЛЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ВЕРХНЕГО ЯРУСА С ЦЕЛЮ РЕГУЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ**

В статье представлены результаты исследований по обоснованию применения метода создания мезомасштабных полей искусственных аэрозольных образований (ИАО) верхнего яруса с целью регулирования условий формирования и развития конвективных облаков за счет изменения температурного режима пограничного слоя атмосферы.

Ключевые слова: конвективные облака, искусственные аэрозольные образования, облака верхнего яруса, конденсационные следы, молнии, лесные пожары.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из серьезных негативных тенденций современной реальности является увеличение объемов материального ущерба и числа человеческих жертв, вызванных стихийными бедствиями природного характера. К числу наиболее значимых природных процессов, приводящих к стихийным бедствиям, можно отнести конвективные облака, способные достигать стадии кучево-дождевых облаков, называемых также грозовыми и градовыми [1]. Так, конвективные облака и связанные с ними опасные явления погоды (ОЯП) могут представлять опасность для многих видов народного хозяйства [2].

Обратимся к конкретным примерам негативного влияния конвективных облаков на хозяйственную деятельность человека.

Одной из первых зарегистрированных трагедий, которая произошла в 1963 году, явилась катастрофа «Боинга-707» авиакомпании PanAmerica, когда в самолет попала молния, спровоцировав детонацию паров горючего. В результате этой катастрофы погиб 81 пассажир [3]. Внезапные порывы ветра, связанные с развитием конвективных облаков, могут стать причиной авиационных катастроф.

Молнии оказывают существенное влияние на работу энергетики. Одной из причин многочисленных аварий на линиях электропередачи являются удары молний в трансформаторные подстанции, что вызывает оплавление внутренних коммуникаций и пожары. Другая причина аварий заключается в мгновенном повышении тока и напряжения в сети, что приводит к авариям в электrorаспределительных системах [4].

Риски для промышленного и гражданского строительства, главным образом, связаны с разрушением объектов строительства и пожарами вследствие ударов молний и порывистого ветра.

Молнии, возникающие в результате развития конвективной облачности до грозовой, являются одними из основных причин возникновения лесных пожаров и наносят колоссальный ущерб лесному хозяйству. По некоторым данным во всем мире молнии вызывают около 50 тыс. лесных пожаров в год.

По данным Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA), в США в период с 1950 по 2002 год, финансовый ущерб государству составил около 2 млрд долл. в год [5].

В научно-технической литературе приводится также немало сведений, касающихся негативного влияния конвективных облаков и связанных с ними ОЯП на различные хозяйственные отрасли и нашей страны. Так, например, согласно [6], в России в среднем ежегодно возникает порядка 15–20 тысяч лесных пожаров, при этом доля пожаров от гроз составляет не менее 15% на территории РФ в целом и до 34% в Сибири [7]. Процент всех случившихся возгораний от молниевых разрядов возрастает до 60–80% с продвижением на север (от 55° до 65° с. ш.) [8]. Материальный ущерб от лесных пожаров в ряде случаев может составлять десятки миллиардов рублей (например, в 2010 году ущерб составил порядка 80–90 млрд руб.) [9].

Лесным пожарам, помимо значительного материального ущерба, сопутствуют также и серьезные экологические проблемы, нередко приводящие к увеличению смертности, особенно в крупных мегаполисах [10].

С помощью приведенных примеров можно заключить, что задача по разработке методов и средств борьбы с ОЯП, связанных с конвективными облаками, является актуальной на современном этапе. Исследования в данной предметной области ведутся как в направлении разработки методов и средств воздействия непосредственно на конвективные облака [11], так и в направлении поиска и обоснования возможности применения методов и средств, с помощью которых можно регулировать и изменять условия формирования и развития конвективных облаков с целью исключения возможности образования кучево-дождевых облаков, в частности, с помощью ИАО [12]. Интерес к ИАО заключается в том, что их создание может явиться одним из возможных способов смягчения воздействия окружающей среды.

В настоящее время с помощью натуральных экспериментов установлено, что существует возможность создания ИАО в следующих видах [13]: туманы и облака, которые можно отнести к волнистообразным, конвективным и перистым.

Применительно к решаемой в настоящей работе задаче регулирования условий формирования и развития конвективных облаков наибольший интерес представляют именно искусственные атмосферные образования верхнего яруса, которые по своим геометрическим размерам могут быть отнесены к классу мезомасштабных облачных образований [14].

Целью публикации настоящей статьи является обоснование метода создания мезомасштабных полей ИАО верхнего яруса для изменения температурного режима в приземном слое тропосферы в районе возможного образования конвективных облаков.

## **СТРУКТУРА МЕТОДА СОЗДАНИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ПОЛЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ВЕРХНЕГО ЯРУСА И ХАРАКТЕРИСТИКА ЕГО ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ**

Ближайшим аналогом мезомасштабных полей ИАО верхнего яруса являются конденсационные следы, образующиеся за самолетами на высотах 6–12 км при выбрасывании в атмосферу горячих газов и продуктов сгорания топлива. При благоприятных условиях (в частности, высоких значениях относительной влажности воздуха) такие следы могут существовать в течение нескольких часов [15]. Поскольку конденсационные следы, образующиеся за самолетами, являются перистыми облаками, то можно полагать, что увеличение их количества может быть осуществлено преднамеренно, т. е. целенаправленно. Это обстоятельство имеет существенное значение, так как целенаправленно созданные в верхней тропосфере мезомасштабные поля ИАО (равно, как и конденсационные следы и перистые облака) могут в значительной мере регулировать радиационный режим атмосферы и подстилающей поверхности, что, в свою очередь, открывает возможности изменения условий фор-

мирования и развития конвективных облаков, вплоть до исключения возможности их образования. Так по оценке авторов работы [15], создание в дневное время поля ИАО площадью от  $104$  до  $5 \times 105$  км<sup>2</sup> не пропускают к земной поверхности от  $2,4 \times 10^{14}$  до  $1,2 \times 10^{17}$  кал/ч тепловой энергии, что приводит к уменьшению средней суточной температуры земной поверхности в континентальных районах (на широтах  $40$ – $60^\circ$ ) на  $3$ – $5^\circ\text{K}$ . Авторы предполагают, что такое понижение температуры днем существенно затрудняет или полностью исключает развитие конвективных явлений, в том числе гроз и града.

Известно, что в атмосфере могут наблюдаться зоны с повышенными значениями относительной влажности, в которых упругость водяного пара  $e$  меньше максимальной упругости над водой  $E_w$ , однако превышает максимальную упругость надо льдом  $E_i$  [15]. Внесение в такие зоны дополнительной влаги в виде мелких капель воды либо хладореагентов (например, твердой углекислоты или жидкого азота), создающих зоны глубокого охлаждения до минус  $80^\circ\text{C}$  (в первом) и до минус  $153^\circ\text{C}$  (во втором случаях), способствующих образованию искусственных кристаллов льда, приводит к возникновению процесса «перекачки» на них водяного пара из окружающего воздуха. В результате роста кристаллов льда образуются искусственные кристаллические облака, которые под влиянием турбулентного обмена увеличиваются в размерах, образуя мезомасштабные поля искусственных атмосферных образований верхнего яруса. Более подробно физические основы создания искусственных облаков верхнего яруса рассмотрены в [16, 17].

Попытки создания искусственных кристаллических облаков в атмосфере были предприняты еще в 1953 году [18]. В одном эксперименте безоблачная атмосфера засеивалась сухим льдом на протяжении  $16$  км с расходом  $450$  реагента на  $1$  км пути самолета. Через  $20$  минут было зафиксировано появление кристаллических облаков шириной до  $3$  км и сохраняющихся до  $3$  часов. В последующих экспериментах расход твердой углекислоты составлял  $1$  кг на  $1$  км. Для создания устойчивого слоя ИАО от одной линии засева по современным представлениям требуется расход твердой углекислоты увеличить до  $5$  кг на  $1$  км линии полета самолета [15].

Приведенные выше данные создают основу для разработки метода создания мезомасштабных полей ИАО верхнего яруса, структура которого представлена ниже.

**Этап 1.** Данный этап связан с анализом и прогнозом синоптических условий, благоприятных для создания мезомасштабных полей ИАО верхнего яруса. Согласно [15], наиболее устойчивыми такие образования будут в передней части циклонов и на периферии антициклонов.

Анализ и прогноз синоптических условий применительно к оцениванию возможности создания ИАО верхнего яруса должен осуществляться для конкретного физико-географического района (ФГР). С учетом современных технических возможностей по созданию ИАО размеры района не должны превышать, как правило,  $100 \times 100$  или  $200 \times 200$  км [15, 16]. Данные о ширине зоны создания ИАО верхнего яруса необходимы для определения количества одновременно применяемых самолетов, а длины зоны – для расчета количества полос засева химическими реагентами.

В случае наличия при анализе прогноза условий, благоприятных для создания ИАО верхнего яруса, принимается решение о порядке проведения мероприятий по их созданию и осуществляется переход к выполнению второго этапа.

**Этап 2.** На этом этапе осуществляется получение и анализ параметров атмосферы, благоприятных для создания мезомасштабных полей ИАО в верхней тропосфере. Так как основным природным фактором для формирования облачного покрова верхнего яруса (а также для образования конденсационных следов и ИАО) являются упорядоченные восходящие движения воздуха во фронтальных зонах при соответствующем температурно-влажностном режиме в верхней тропосфере, то важной задачей является анализ полей влажности и температуры с целью определения зон благоприятных для образования ИАО.

Также необходимо учитывать данные о вертикальном распределении температуры и ветра. Они нужны для установления их связи с условиями образования ИАО, поскольку часто перистые облака (как и конденсационные следы) наблюдаются в условиях значительной неустойчивости и интенсивного турбулентного обмена [15].

При подготовке мероприятий по созданию мезомасштабных полей ИАО особое значение имеют данные о температуре и влажности воздуха в слое от 200 до 400 гПа. Это связано с тем, что, согласно [15], благоприятные условия для создания перистых облаков (а, следовательно, можно полагать, что и для создания ИАО) наблюдаются на изобарической поверхности 400 гПа (22,8%) и выше, до 200 гПа (86,2%), а максимальные значения повторяемости (98,8 и 96,9%) – на изобарических поверхностях 300 и 250 гПа соответственно. Также следует отметить, что приведенные данные относятся лишь к определенным климатическим параметрам. По результатам исследований [15], зимой повторяемость условий, благоприятных для образования ИАО в верхней тропосфере по температурным условиям, близка к 100%, снижаясь летом до 50% и менее.

Следует отметить, что температурные условия в тропосфере являются необходимым, но недостаточным условием для образования ИАО. Основным условием является перераспределение водяного пара над поверхностью льда. Поэтому получение данных о перемещении водяного пара надо льдом в районах создания ИАО верхнего яруса является актуальной задачей. Определенную помощь в данном вопросе могут оказать снимки с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с изображением конденсационных следов в районах предполагаемых работ по созданию ИАО в верхней тропосфере.

Кроме данных о температуре и влажности воздуха необходимы также сведения о характере ветра (скорости и направлении) в верхних слоях тропосферы. Данные о скорости ветра используются для расчета удаления рубежа засева от района формирования мезомасштабного поля ИАО. Направление ветра позволит правильно выбрать схему засева атмосферы химическими реагентами.

Основным источником информации о температуре и влажности воздуха, а также о скорости и направлении ветра в верхней тропосфере являются данные радиозондирования за ближайший срок ко времени проведения мероприятий по созданию мезомасштабных полей ИАО в заданном ФГР.

**Этап 3.** Данный этап связан с обоснованием выбора технических средств для создания мезомасштабных полей ИАО. Исходя из размеров полей ИАО и высот их образования, становится очевидным, что для достижения поставленной цели должны быть использованы авиационные средства, а именно самолеты АН-12 и ИЛ-76, дооборудованные установками для распыления воды или хладореагентов, а также устройствами для отстрела пиропатронов с йодистым серебром. Эшелон полета воздушного судна должен составлять не менее 8–12 км, а полезная нагрузка (вода, химические реагенты) должна рассчитываться, исходя из времени, необходимого для отработки полезной нагрузки на 1 км линии засева.

Возможность использования йодистого серебра для создания искусственных кристаллических облаков в атмосфере рассмотрена в [19]. Более подробные сведения о технических средствах доставки и диспергирования химических реагентов и воды для создания ИАО (включая и искусственные мезомасштабные образования в верхней тропосфере) приведены в [20].

**Этап 4.** На этом этапе на основе данных о площади мезомасштабных полей ИАО верхнего яруса и времени их существования над выбранным ФГР осуществляется выбор схемы засева атмосферы с помощью авиационных средств. При этом необходимо принимать во внимание и технические характеристики конкретного воздушного судна (потолок, скорость полета, радиус и время разворота, полезная нагрузка и др.). С учетом вышеуказанных данных, схемы засева атмосферы химическими реагентами могут быть самыми различными: «змейкой», «восьмеркой» [15] и др. При этом, в зависимости от ширины линии засева, может быть использовано сразу несколько самолетов, выполняющих одну и ту же схему засева.

**Этап 5.** На основе исходных данных о площади мезомасштабных полей ИАО в верхней тропосфере и требуемом времени их существования проводится расчет параметров мероприятий по созданию полей ИАО, например, по схеме «восьмерка», представленной на рис. 1.

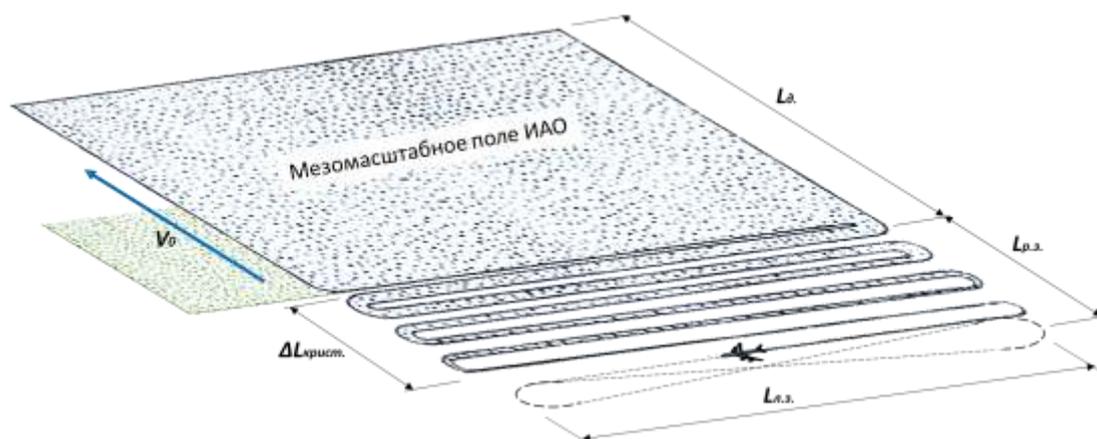


Рис. 1. Тип предполагаемой схемы засева атмосферы «восьмерка»

1. Рассчитывается расстояние рубежа засева ( $L_{р.з.}$ ) от ближнего края мезомасштабного поля ИАО по формуле

$$L_{р.з.} = V_0 \times t, \quad (1)$$

где  $V_0$  – скорость ветра на эшелоне полета воздушного судна, км/ч;  
 $t$  – время расширения зоны кристаллизации в результате засева атмосферы химическими реагентами (приблизительно 30 мин).

2. Определяется длина линии засева химическим реагентом с помощью авиационных средств

$$L_{л.з.} = V_c \times t_{л.з.}, \quad (2)$$

где  $V_c$  – скорость полета самолета;  
 $t_{л.з.}$  – время нахождения воздушного судна на линии засева, ч.

3. Определение интервала времени  $t_{л.з.}$ , в течение которого воздушное судно будет находиться на линии засева, осуществляется на основе данных о распределении зоны образования облачного слоя от одного пролета  $\Delta L_{кр.}$  по ширине и скорости перемещения облачного покрова  $V_0$ . Расчет времени  $t_{л.з.}$  проводится по формуле

$$t_{л.з.} = \frac{\Delta L_{кр.}}{V_0}. \quad (3)$$

4. Рассчитывается длина линии засева с учетом времени на разворот воздушного судна  $t_{разв.}$ :

$$L'_{л.з.} = V_c \times \left( \frac{\Delta L_{кр.}}{V_0} + 2t_{разв.} \right). \quad (4)$$

5. Рассчитывается площадь создания поля ИАО от одной линии засева:

$$S_{з.обл.} = L'_{л.з.} \times \Delta L_{кр.} \quad (5)$$

6. Выполняется расчет расстояния между линиями засева  $L_{л.з.}$ . Применительно к задаче создания ИАО в верхней тропосфере оно будет равно ширине зоны кристаллизации  $\Delta L_{кр.}$ , которая составляет в среднем порядка 6 км.

7. Рассчитывается время, необходимое для создания полосы ИАО от одной линии засева, по формуле

$$t'_{\text{обл.сл.}} = L_{\text{л.з.}} / V_c \quad (6)$$

8. Определяется полное время создания мезомасштабного поля ИАО в верхней тропосфере:

$$t_{\text{ИАО}} = t'_{\text{обл.сл.}} \times N_{\text{л.з.}} \quad (7)$$

Здесь  $N_{\text{л.з.}}$  – число линий засева атмосферы химическими реагентами,

$$N_{\text{л.з.}} = L_d / \Delta L_{\text{кр.}}, \quad (8)$$

где  $L_d$  – длина мезомасштабного поля ИАО, км.

9. Вычисляется общее время нахождения мезомасштабного поля ИАО над требуемым ФГР:

$$T_{\text{ИАО}} = t_{\text{ИАО}} + t_{\text{тр.вр.}}, \quad (9)$$

где  $t_{\text{тр.вр.}}$  – требуемое время нахождения мезомасштабного поля ИАО над заданным районом.

10. Определяется время работы самолета на всю продолжительность мероприятий по созданию мезомасштабных ИАО над заданным ФГР:

$$T_{\text{р.с.}} = t_{\text{взл.}} + t_{\text{пос.}} + T_{\text{ИАО}}, \quad (10)$$

где  $t_{\text{взл.}}$  – время подлета воздушного судна от аэродрома до места создания ИАО, ч;

$t_{\text{пос.}}$  – время полета воздушного судна от места создания ИАО до аэродрома.

11. Определение расхода топлива, необходимого для проведения мероприятий по созданию мезомасштабного поля ИАО:

$$Q_{\text{р.т.}} = q \times T_{\text{р.с.}}, \quad (11)$$

где  $q$  – расход топлива воздушного судна на один час работы, кг/ч.

12. Выполняется расчет расхода химических реагентов, необходимых для создания мезомасштабного поля ИАО в верхней тропосфере:

$$Q_{\text{р.р.}} = q' \times L'_{\text{л.з.}} \times N_{\text{л.з.}}, \quad (12)$$

где  $q'$  – расход реагента на один километр полета воздушного судна, кг/км.

Полученные в ходе выполнения данного этапа результаты исследований могут быть использованы при подготовке и проведении мероприятий по созданию мезомасштабных полей ИАО в интересах регулирования условий формирования и развития конвективных облаков в конкретном ФГР России за счет изменения его температурного режима.

**Этап 6** включает в себя расчет стоимости мероприятий по созданию мезомасштабных полей ИАО. Ввиду важности этого этапа его выполнение может быть предметом самостоятельного исследования.

**Этап 7** содержит мероприятия по проверке готовности привлекаемых сил и средств к проведению мероприятий по созданию мезомасштабных полей ИАО в верхней тропосфере.

**Этап 8** включает в себя проведение мероприятий по созданию мезомасштабного поля ИАО в верхней тропосфере. При необходимости вносятся коррективы, направленные на получение положительного результата. В рамках этого же этапа выполняется контроль результатов выполнения мероприятий в соответствии поставленной задачей. Для осуществления контроля могут быть привлечены средства объективного контроля (фото- и видеосъемка), а также снимки с космических аппаратов метеорологического назначения.

**Этап 9.** На этом этапе осуществляется подведение итогов проводимых мероприятий.

Предлагаемый в настоящей статье метод создания мезомасштабного поля ИАО в верхней тропосфере с целью изменения условий формирования и развития конвективных облаков может быть использован для решения таких задач, как борьба с туманами, заморозками, профилактика возникновения лесных пожаров за счет исключения возможности создания конвективных облаков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в работе анализ негативного влияния связанных с конвективными облаками ОЯП указывает на необходимость разработки и внедрения методов, позволяющих устранить или снизить их негативное воздействие на различные хозяйственные отрасли.

В работе выполнено обоснование практического применения метода создания мезомасштабных полей ИАО в верхней тропосфере с целью изменения условий формирования и развития конвективных облаков до стадии кучево-дождевых, с которыми связаны такие ОЯП, как ливни, шквал, град и грозы. Исключение возможности образования гроз и молний приведет к изменению состояния атмосферного электричества.

Предлагаемый в работе метод может быть использован для профилактики возникновения лесных пожаров за счет исключения возможности возникновения конвективных облаков и их роста до стадии грозовых.

## Список используемых источников

1. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 568 с.
2. Говорушко С. М. Природа и человек: атлас. – М. : Дрофа; ДИК, 2009. – 96 с.
3. Лаговский В. Почему молнии сбивают самолеты. – URL: <https://www.kp.ru/daily/26973.5/4031417/> (дата обращения: 23.08.2023).
4. Беттен Л. Погода в нашей жизни. – М. : Мир, 1985. – 224 с.
5. Спурр С. Г., Барнес Б. В. Лесная экология. – М. : Лесная промышленность, 1984. – 479 с.
6. Снегуров А. В., Снегуров В. С., Щукин Г. Г. К программе построения грозопеленгационной сети Госгидромета // Труды НИЦ ДЗА (ф-л ГГО). – 2004. – Вып. 5(553). – С. 207–222.
7. Грозы и лесные пожары в современных климатических условиях средней Сибири / В. А. Иванов [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 7. – С. 102–113.
8. Иванов В. А., Иванова Г. А. Пожары от гроз в лесах Сибири. – Новосибирск : Наука, 2010. – 164 с.
9. Доронин А. П., Петроченко В. В., Филиппёнок В. В. Облака и туманы естественного и искусственного происхождения в задачах тушения лесных пожаров и профилактики их возникновения // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе : материалы Международной науч.-практ. конф. – СПб., 2022. – С. 320–323.
10. Исследование характеристик конвективных облаков над центральным районом европейской территории России применительно к проблеме профилактики возникновения лес-

ных пожаров и борьбы с ними / А. П. Доронин [и др.] // Ученые записки РГГМУ. – 2018. – № 50. – С. 28–40.

11. *Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М.* Состояние и перспективы развития работ по активным воздействиям в Российской Федерации и за рубежом // Труды VII Всероссийского метеорологического съезда, 7–9 июля 2014 г. – СПб. : ООО «ДАРТ», 2015. – С. 151–174.

12. *Доронин А. П., Подгайский В. Н., Макаров А. В.* Предотвращение лесных пожаров путем создания искусственной облачности // Мониторинг. – 1995. – № 2. – С. 44–45.

13. Искусственные облака и туманы как перспективное средство решения хозяйственных и экологических задач / А. П. Доронин [и др.] // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 23–27 октября 2017 г., г. Нальчик : сб. науч. тр.: в 2 ч. – Уфа : АЭТЕРНА, 2017. – Ч. 2. – С. 141–149.

14. Облака и облачная атмосфера : справ. / под ред. И. П. Мазин и А. Х. Хргиана. – Л. : Гидрометиздат, 1989. – 640 с.

15. *Зайцев В. А., Кудрявцев Б. П., Ледохович А. А.* Возможности и пути создания полей искусственных облаков // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 7. – С. 3–9.

16. Физические основы искусственного образования облачности в верхней тропосфере (обзор) / В. Н. Козлов [и др.] // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 570. – С. 261–273.

17. *Мазуров Г. И., Акселевич В. И., Биденко С. И.* Облачные мезонеоднородности и возможности управления их эволюцией в целях создания локальных благоприятных условий погоды. – СПб. : Технолит, 2013. – 190 с.

18. *Хоббс П. В.* Научные основы, методы и результаты активных воздействий на облака // Изменение погоды человеком. – М. : Прогресс, 1972. – С. 52–53.

19. *Detwiler A., Pratt R.* Clear-air seeding: opportunities and strategies // J. Weather Modif. – 1984. – Vol. 16, № 1. – P. 46–60.

20. Искусственные атмосферные облачные образования: обзор исследований / А. П. Доронин [и др.] // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 71. – С. 231–248.

Н. В. Рыжий,  
кандидат технических наук

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ КРИТЕРИЕВ

Статья посвящена решению многокритериальной задачи выбора земельного участка для размещения объектов различного назначения методом аддитивной свертки критериев. Осуществлена постановка задачи выбора на примере строительства телескопа, предназначенного для наблюдения за космическим пространством. При этом рассмотрены двенадцать показателей качества земельных участков, характеризующих рациональность его размещения. Представлено решение поставленной задачи выбора методом аддитивной свертки критериев, сделаны выводы о достоинствах и недостатках применения данного метода.

Ключевые слова: принятие решения, земельный участок, многокритериальный выбор, метод аддитивной свертки критериев.

### ВВЕДЕНИЕ

При решении задач, связанных со строительством объектов различного назначения, приходится сталкиваться с проблемой выбора наиболее подходящих для этого земельных участков. При этом рассматривается множество показателей качества, характеризующих пригодность земельных участков для размещения конкретных объектов [1]. Данный вопрос можно отнести к многокритериальным задачам выбора, решение которых должно быть рациональным по множеству критериев [2].

Сегодня в практику проведения мероприятий по выбору земельных участков стали повсеместно внедряться методы свертки критериев, в частности метод аддитивной (линейной) свертки [1]. Данный метод является одним из наименее трудоемких среди известных методов решения многокритериальных задач. Он характеризуется высокой вычислительной эффективностью, а также позволяет добиться Парето-оптимальных решений [3]. Учитывая достоинства данного метода, целесообразно на конкретном примере выбора земельного участка рассмотреть особенности его применения. В качестве примера можно решить задачу выбора земельного участка для размещения телескопа, предназначенного для наблюдения за космическим пространством.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ КРИТЕРИЕВ

Согласно классической постановке задачи [4, 5] выбор земельного участка предлагается осуществлять среди отобранных по некоторым критериям участков местности. Такая постановка задачи ограничивает выбор земельного участка и лишает возможности оценки каждого земельного участка предполагаемого района размещения (ПРР) объекта.

В основу альтернативной постановки задачи выбора предлагается заложить *дробление (растеризацию)* заданного ПРР объекта на отдельные прямоугольные участки местности и оценивание каждого из них с помощью специального программного обеспечения. Специальное программное обеспечение может использовать возможности современных геоинформационных систем, предназначенных для обработки цифровых карт местности, что позволит автоматизировать процесс выбора земельного участка.

Таким образом, на карте местности можно задать некую прямоугольную область  $\theta_{(x,y)}$ , стороны которой будут соответствовать допустимой погрешности размещения центра

объекта по осям абсцисс и ординат прямоугольной системы координат  $(\Delta x_{\min}, \Delta y_{\min})$ . В дальнейшем такие дискретные прямоугольные области  $\theta_{(x,y)}$  будем называть *участками размещения*, а множество альтернатив, заданное на множестве участков размещения, которое представляет ПРР объекта, будем обозначать  $\Theta = [\theta_{(x,y)}]$ .

В качестве эксперимента выберем ПРР телескопа с размером  $10 \times 10$  км, и зададим на нем множество участков размещения, соответствующих погрешности размещения в  $\Delta x_{\min} = \Delta y_{\min} = 1$  км так, как это показано на рис. 1.

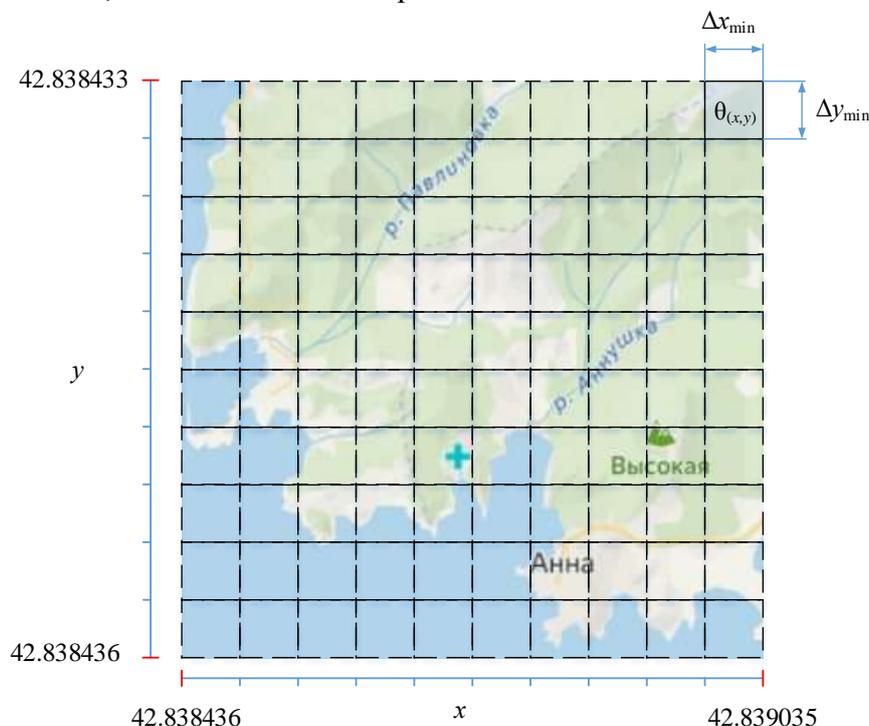


Рис. 1. Потенциальный район размещения объекта и заданное на нем множество альтернатив

Рассмотрим представленную в табл. 1 систему показателей качества земельного участка, отражающих его рациональность для размещения телескопа  $K = \{k_b\}$ ,  $b = 1, 2, \dots, B$ , где  $k_b$  – показатель качества земельного участка,  $B$  – общее их количество.

Таблица 1

### Исходные данные для проведения вычислений

№ п/п	Показатель качества	Параметр земельного участка	Критерий	Браковочное значение	Эталонное значение
1	Наблюдаемый сектор орбиты	Широта, град	min	78,00	0
2	Соответствие по углам закрытия	Угол закрытия, град	max	15,00	360,00
3	Засветка	Уровень засветки, мКд/м <sup>2</sup>	min	17,5	22,0
4	Облачность	Среднегодовая облачность, %	min	75,00	30,15
5	Прозрачность атмосферы	Высота над уровнем моря, м	max	0,00	2000,00
6	Ветровая нагрузка	Среднегодовая скорость ветра, м/с	max	0,30	10,00
7	Категория земель	Пригодность для размещения, %	max	0	100

Окончание табл. 1

№ п/п	Показатель качества	Параметр земельного участка	Критерий	Браковочное значение	Эталонное значение
8	Влажность почвы	Наличие воды в составе почвы, %	min	100	0
9	Кривизна склонов	Угол склона, град	min	45	0,3
10	Транспортная доступность	Расстояние до дорожного полотна автомобильных дорог, км	min	200	0
11	Твердость почвы	Категория грунтов в зависимости от трудности работ по их разработке	min	8	1
12	Лесной покров	Площадь лесного покрова, км <sup>2</sup>	min	1	0

Упорядоченный набор показателей качества земельного участка будет представлять собой *векторный критерий*, оптимизация которого ляжет в основу выбора земельного участка:

$$K_{\text{opt}} = \text{opt } K = [k_{\text{opt},b}], b = 1, 2, \dots, B, \quad (1)$$

где  $K$  –  $B$ -мерный вектор показателей качества земельных участков;  
 $\text{opt}$  – оператор, определяющий критерий оптимальности.

Методы свертки критериев сводят многокритериальную задачу к однокритериальной путем свертывания векторного критерия (1) в один *суперкритерий*, который в дальнейшем и будет подлежать оптимизации:

$$I_{(x,y)} = f_{\text{рез}}(k_{b(x,y)}), \quad (2)$$

где  $I_{(x,y)}$  – интегральный показатель качества, характеризующий суперкритерий, о. е.;  
 $f_{\text{рез}}$  – результирующая целевая функция, отражающая правило свертки выбранного суперкритерия;  
 $k_{b(x,y)}$  – значение  $b$ -го показателя качества для участка размещения  $\theta_{(x,y)}$ .

При *аддитивной свертке* векторного критерия  $K$  результирующая целевая функция представляется в виде средневзвешенной суммы показателей качества [4, 5]:

$$I_{(x,y),\text{opt}} = \max \sum_{b=1}^B \omega_b k_{b(x,y)} \left| \sum_{b=1}^B \omega_b = 1, \quad (3)$$

где  $\omega_b$  – коэффициент важности (весомости)  $b$ -го показателя качества земельного участка, о. е.;  
 $k_{b(x,y)}$  – нормированный показатель качества, о. е.

Для расчета коэффициентов весомости  $\omega_b$  широко применяются методы экспертных оценок. При заданном распределении приоритета между критериями можно использовать формулу расчета относительного рангового показателя, который применяется в экспертном методе ранжирования [6]:

$$\omega_b = (B - b + 1) / \sum_{b=1}^B b. \quad (4)$$

Нормированный показатель качества  $k_{b(x,y)}$  является результатом *нормирования* частного показателя качества  $k_{b(x,y)}$  [4]:

$$\begin{cases} \kappa_{b(x,y)} = \frac{k_{b(x,y)} - k_{бр.б.}}{k_{эт.б.} - k_{бр.б.}}, \text{ при } k_{опт.б.} \rightarrow \max; \\ \kappa_{b(x,y)} = \frac{k_{бр.б.} - k_{b(x,y)}}{k_{бр.б.} - k_{эт.б.}}, \text{ при } k_{опт.б.} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (5)$$

где  $k_{бр.б.}$  и  $k_{эт.б.}$  – браковочное и эталонное значение показателя качества  $k_b$ .

В данном случае *эталонное значение показателя качества*  $k_{эт.б.}$  представляет собой наилучшее его значение, которое может быть достигнуто на момент выбора земельного участка с учетом физических, технических, экономических, социальных и любых других условий. *Браковочное значение показателя качества*  $k_{бр.б.}$  – это наихудшее недопустимое его значение, достижение и превышение которого при критерии минимизации, достижение и уменьшение которого при критерии максимизации приведет к недопустимости размещения объекта на рассматриваемом участке размещения [4].

Стоит отметить, что вычисление нормированного показателя качества по формуле (5) значительно упрощает нахождение его области допустимых значений, что удобно при проведении оценочных расчетов, не требующих повышенной точности проведения вычислений.

Таким образом, наилучшим решением для размещения объекта будет потенциальный участок размещения с максимальным значением интегрального показателя качества:

$$\theta_{опт} = \text{arg max } I_{(x,y)}, \quad (6)$$

где  $\text{arg}$  – оператор выделения конкретного аргумента функции.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ КРИТЕРИЕВ

Решение поставленной задачи выбора земельного участка (6) методом аддитивной свертки критериев представлено на рис. 2,а.

На рис. 2,б совместно со значениями интегрального показателя качества  $I_{(x,y)}$  представлено значение ранга  $R_{(x,y)}$  – порядкового номера участка размещения, отобранного по степени рациональности для размещения телескопа. Значение ранга подбирается в зависимости от выполнения критерия максимизации интегрального показателя качества (3). На рис. 2 для упрощения математических записей реальных координат участков размещения заданного ПРР телескопа используется система условных координат ( $x = 1 \div 10$ ;  $y = 1 \div 10$ ).

Оценка значений нормированных показателей качества для каждого участка размещения  $\kappa_{b(x,y)}$  проведена экспертным методом. В основу экспертных оценок заложено непосредственное определение значений нормированных показателей качества на основе картографических данных о ПРР телескопа. Для этого использовались специальные цифровые карты ПРР телескопа с исходными данными, необходимыми для оценки каждого нормированного показателя качества.

На рис. 2 видно, что в качестве наиболее рациональных участков размещения выбираются участки  $\theta_{(2;10)} \rightarrow \theta_{(1;7)} \rightarrow \theta_{(1;8)}$ . Что интересно, данные участки размещения располагаются вдоль прибрежной линии северо-восточной области ПРР. Выбор данных участков размещения объясняется статистической обработкой результатов расчета нормированных показателей качества для заданного ПРР  $\Theta$ :

$$\kappa_{b(x,y)} = \bar{\kappa}_b [\Theta] \pm s_b [\Theta], \quad (7)$$

где  $\bar{\kappa}_b$  и  $s_b$  – выборочное среднее и стандартное отклонение нормированного показателя качества  $\kappa_b$  для заданного ПРР  $\Theta$ .

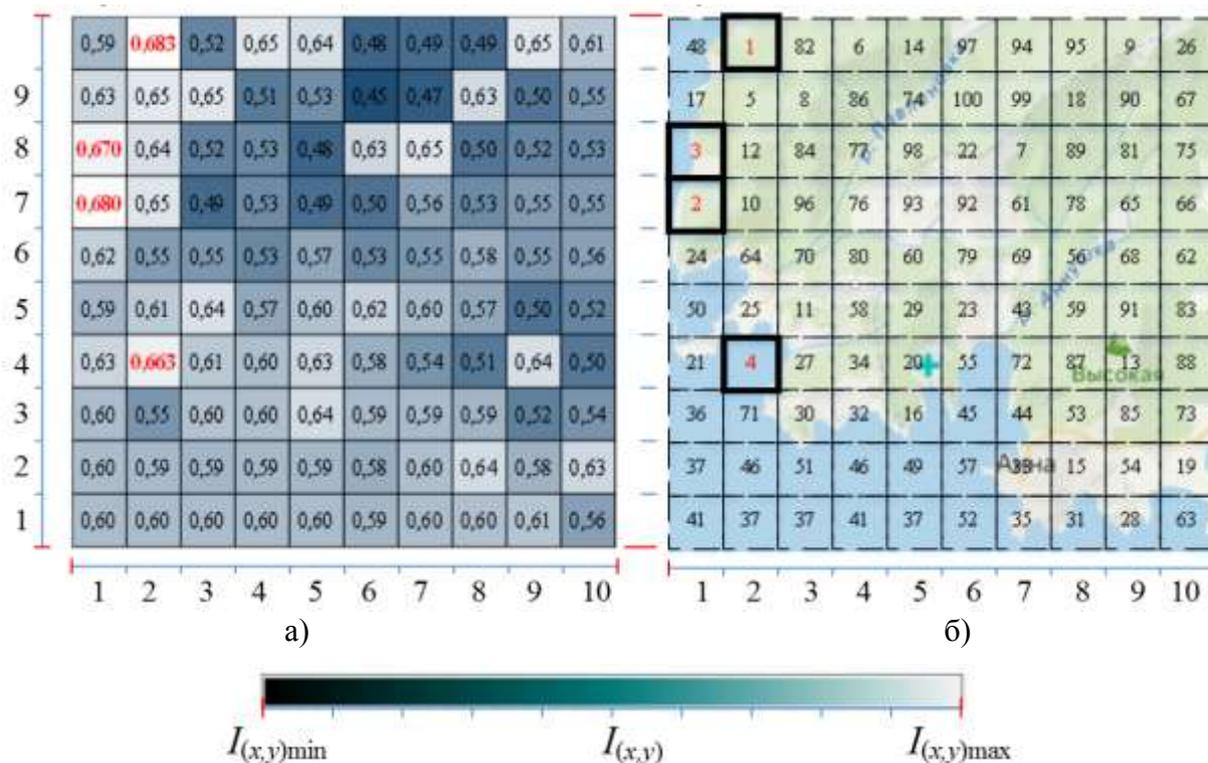


Рис. 2. Результаты проведения вычислений:

а – значения интегрального показателя качества; б – значения рангов участков размещения

Расчитанные таким образом статистические данные будут представлять *характеристику* ПРР, которая позволит сделать выводы о рациональности размещения в нем того или иного объекта. Характеристика заданного ПРР телескопа представлена в табл. 2.

Таблица 2

### Характеристика потенциального района размещения телескопа

№ п/п	Показатель качества	Выборочное среднее, о. е.	Характеристика участка: «размещение телескопа ...»	Стандартное отклонение, %	Характеристика изменения показателя
1	Наблюдаемый сектор орбиты	0,93	Оптимально	0,01	Не значительное
2	Соответствие по углам закрытия	0,57	Допустимо	39,62	Значительное
3	Засветка	0,83	Оптимально	8,75	Не значительное
4	Облачность	0,89	Оптимально	0,05	Не значительное
5	Прозрачность атмосферы	0,05	Не оптимально	5,11	Не значительное
6	Ветровая нагрузка	0,25	Не оптимально	22,04	Значительное
7	Категория земель	0,59	Допустимо	33,68	Значительное
8	Влажность почвы	0,58	Допустимо	35,10	Значительное
9	Кривизна склонов	0,88	Оптимально	5,95	Не значительное
10	Транспортная доступность	0,99	Оптимально	0,62	Не значительное
11	Твердость почвы	0,57	Допустимо	0,02	Не значительное
12	Лесной покров	0,56	Допустимо	36,85	Значительное

Исходя из данных, представленных в табл. 2, можно сделать вывод о том, что заданный ПРР:

- не совсем подходит для размещения телескопа из-за значительной ветровой нагрузки и относительно низкой прозрачности атмосферы (этим объясняется выбор в качестве рациональных участков размещения участков  $\theta_{(2;10)}$ ,  $\theta_{(1;7)}$  и  $\theta_{(1;8)}$ , находящихся на средней возвышенности над уровнем моря, характеризующейся приемлемой ветровой нагрузкой и допустимой прозрачностью атмосферы);

- обладает низкими показателями засветки и облачности, что характеризует его как благоприятный район для наблюдения за космическим пространством;

- характеризуется средней трудностью подготовки участков под строительство телескопа, так как обладает высокой транспортной доступностью, допустимой влажностью почвы, низкой категорией трудности обработки грунта, а также не требует высоких затрат, связанных с вырубкой леса;

- обладает незначительными изменениями значений показателей качества «наблюдаемый сектор орбиты», «засветка», «облачность», «прозрачность атмосферы», «кривизна склонов», «транспортная доступность», «твердость почвы».

Также на рис. 2 можно обратить внимание на некоторое противоречие при выборе четвертого по степени рациональности участка размещения  $\theta_{(2;4)}$ . Очевидно, что данный участок находится в акватории Японского моря, что является недопустимым с точки зрения финансовых затрат на размещение телескопа.

Для того, чтобы понять, почему при аддитивной свертке критериев данный участок при очевидной его недопустимости для размещения телескопа выбирается как четвертый по степени рациональности, рассмотрим распределение вклада каждого показателя качества в интегральный его показатель (рис. 3).



Рис. 3. Распределение значений вклада показателей качества в интегральный показатель участка размещения  $\theta_{(2,4)}$

На рис. 3 видно, что при аддитивной свертке нулевые значения нормированных показателей качества «влажность почвы» и «прозрачность атмосферы» земельного участка  $\theta_{(2,4)}$  компенсируются повышенными значениями нормированных показателей качества «соответствие углам закрытия», «ветровая нагрузка» и «засветка». Таким образом, происходит компенсация значений показателей качества, близких к своим браковочным значениям. Это происходит из-за заложенного в аддитивную свертку критериев принципа справедливой компенсации абсолютных значений нормированных показателей качества, согласно которому

справедливым является то компромиссное решение, при котором абсолютный уровень снижения одного показателя качества не превосходит суммарного уровня увеличения других показателей [7].

Благодаря данному принципу, земельные участки, отобранные методом аддитивной свертки критериев по степени рациональности на первые места, принадлежат области Парето-оптимальных решений.

Стоит отметить, что из-за установленных требований к размещению объекта и ограниченности необходимых для его строительства ресурсов, участок с нулевыми нормированными показателями качества может быть абсолютно непригоден для его размещения. Учитывая, что при обработке исходной картографической информации о ПРР могут быть неточности, вероятность выбора недопустимого решения при низкой чувствительности аддитивного интегрального показателя к нулевым значениям показателей качества может быть высокой. Данный недостаток будет проявляться более заметно при увеличении общего количества критериев.

Также стоит отметить показатели качества с практически неизменными значениями на заданном ПРР телескопа (в первую очередь это касается таких показателей как «наблюдаемый сектор орбиты», «твердость почвы» и «облачность»). Их значения практически неизменны для заданного ПРР телескопа, что на качественном уровне практически никак не влияет на выбор земельного участка. Это говорит о том, что данные показатели не обладают достаточной *критичностью* [8] для заданного множества альтернатив, которым является ПРР телескопа, для того, чтобы их можно было учитывать при выборе земельного участка. Данные показатели могут быть критичны для районов размещения телескопа большего масштаба, чем заданный ПРР.

Критичность показателей качества может требовать и уменьшения масштаба ПРР объекта. Например, показатели качества «соответствие по углам закрытия» и «кривизна склонов» характеризуются значительной изменчивостью значений в пределах участка размером 1x1 км. Использование среднего выборочного значения для оценки данных показателей качества для заданного участка размещения может привести к неточности модели выбора и, следовательно, к нерациональности выбора наилучшего из них. Поэтому проведение вычислений параметров земляных участков, связанных с данными показателями, требует увеличения разрешения карты ПРР телескопа.

Данные наблюдения говорят о необходимости учета критичности показателей качества при применении метода аддитивной свертки критериев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных вычислений можно выделить следующие достоинства метода аддитивной свертки:

- метод аддитивной свертки критериев относительно прост и не требует значительной вычислительной мощности используемых вычислительных устройств;
- с помощью метода аддитивной свертки можно прийти к рациональным Парето-оптимальным решениям, что является необходимым условием для решения прикладных задач выбора земельного участка с целью размещения объектов различного назначения.

К недостаткам применения метода можно отнести:

- низкую чувствительность аддитивного интегрального показателя к нулевым значениям показателям качества земельных участков, возникающим при нарушении границ допустимых значений данного показателя;
- необходимость более тщательной проработки системы критериев, которая заключается в целесообразности проведения дополнительных исследований критичности показателей качества.

### Список используемых источников

1. Анализ современной практики проведения рекогносцировочных изысканий и выбора участка под строительство объектов специального назначения / Р. А. Ситков [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 11, ч. 4. – С. 717–721.
2. *Пиявский С. А.* Метод универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // *Онтология проектирования*. – 2008. – № 3 (29). – С. 449–468.
3. *Никонов О. Я., Подолька О. А., Скакалина Е. В.* Математические методы решения многокритериальной задачи о назначениях // *Вестник «ХНАДУ»*. – 2011. – Вып. 55. – С. 103–112.
4. *Азгальдов Г. Г.* Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании. – М. : Стройиздат, 1989. – 264 с.
5. *Печаткин А. В.* Основы квалиметрии и квалитологии : учеб. пособие : в 2 ч. – Рыбинск : РГАТА, 2002. – Ч. 2. – 109 с.
6. *Коробов В. Б.* Сравнительный анализ методов определения весовых коэффициентов «влияющих факторов» // *Социология*. – 2005. – № 20. – С. 54–73.
7. *Горбунов В. М.* Теория принятия решений : учеб. пособие. – Томск : НИТПУ, 2010. – URL: [https://studylib.ru/doc/172989/teoriya-prinyatiya-reshenij--chast.\\_-1.html](https://studylib.ru/doc/172989/teoriya-prinyatiya-reshenij--chast._-1.html). (дата обращения: 24.05.2022).
8. *Ваннэ Г.* «Критерий оценки» в системном анализе // *SAEC*. – 2019. – № 1. – С. 154–165.

Д. Н. Бирюков,  
*доктор технических наук, профессор;*  
О. О. Захаров;  
И. А. Шестаков

## **ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА**

Рассмотрена проблема комплексного применения различных инструментов (средств), взаимодействующих между собой, для проведения аудита информационной безопасности. Предложен подход к построению многоуровневой системы, координирующей средства аудита при помощи управляющих сигналов в зависимости от внешних возмущений и сигналов обратной связи. Сформированы некоторые предложения по программной реализации предложенного подхода.

Ключевые слова: информационная безопасность, тестирование на проникновение, аудит информационной безопасности, многоуровневые системы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Угрозы информационной безопасности становятся все более опасными, они затрагивают практически все сферы жизни современного человека. Для обеспечения стабильной и безопасной работы современных компьютерных систем разработаны различные средства защиты информации, существенно снижающие риски нарушения работы информационно-технической системы (ИТС), а также любых других объектов. Однако не во всех ситуациях организационные мероприятия и программные комплексы способны помочь в обнаружении и противодействии угрозам.

Для поддержания готовности компьютерной сети к компьютерным атакам необходимо проводить аудит информационной безопасности (ИБ), используя различные подходы (*Pentest, Red Teaming* и другие). В распоряжении специалистов, осуществляющих аудит ИБ, имеется большое количество средств, произведенных различными компаниями. Подавляющее большинство средств являются узкоспециализированными и решающими определенный ограниченный класс задач. Для того чтобы осуществить полный аудит ИБ, необходимо использовать набор средств аудита, причем набор должен быть подобран таким образом, чтобы результаты работы одного средства могли быть использованы другими средствами либо дополняли результаты работы других. Таким образом, специалисты, проводящие аудит информационной безопасности объектов автоматизации, в ходе своей практической деятельности сталкиваются с трудностями комплексного применения имеющихся средств аудита, объединенных в единую систему. Решение проблемы управления различными программными средствами аудита ИБ позволит снизить различные затраты на его проведение и повысить качество результатов.

### **ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Системный подход к комплексному применению средств аудита ИБ повышает его результативность с одной стороны, однако с другой стороны – содержит ряд сложностей, связанных с его реализацией. Так, одной из важных задач, которая должна быть решена при

системном применении средств аудита, является задача их координации. Различные средства аудита и управляющая ими система могут рассматриваться как многоуровневая система. В связи с этим авторами была использована теория иерархических многоуровневых систем [1], которая позволит наиболее подробно описать все аспекты взаимодействующих компонентов.

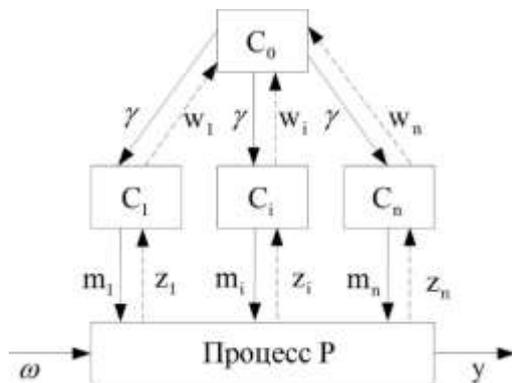


Рис. 1. Пример двухуровневой системы

нисходящие по аналогии с сигналами в центральной нервной системе человека. Восходящие сигналы поступают от нижестоящих управляющих систем  $C_1, \dots, C_n$  к процессу  $P$  (управляющий сигнал  $m$ ,  $m \in M$ , где  $M$  – множество управляющих сигналов), а нисходящие – от вышестоящих систем к нижестоящим управляющим системам (координирующий сигнал  $\gamma$ ,  $\gamma \in \lambda$ ,  $\gamma = \langle \gamma_1, \dots, \gamma_n \rangle$ , где  $\lambda$  – множество координирующих сигналов). Для обмена информацией, получаемой в ходе воздействий на подчиненные системы и процесс  $P$ , используются информационные сигналы  $z_i$  и  $w_i$ . Эти сигналы определяются функциональными зависимостями  $f_i: M \times \Omega \times Y \rightarrow Z_i$  и  $f_0: \lambda \times Z \times M \rightarrow W_i$  соответственно.

Рассмотрим каждую из подсистем подробнее (рис. 2). Процесс  $P$  – это отображение  $P: M \times \Omega \rightarrow Y$ , где  $\Omega$  – множество внешних возмущений, а  $Y$  – множество выходов процесса  $P$ . Управляющие сигналы  $M$ , передаваемые процессу  $P$ , представим как декартово произведение  $n$  множеств  $M = M_1 \times \dots \times M_n$ , поскольку на него воздействуют  $n$  локальных управляющих систем  $C_1, \dots, C_n$ . Локальная управляющая система  $C_i$  генерирует локальное управление  $m_i$ , выбирая его из множества  $M_i$ :  $C_i: \lambda \times Z_i \rightarrow M_i$ , используя координирующий и информационные сигналы от вышестоящей системы и процесса соответственно.

Процесс  $P$  представляет собой набор из  $n$  подпроцессов, у каждого подпроцесса существует собственная управляющая подсистема. Отображение  $P_i: M_i \times U_i \times \Omega \rightarrow Y_i$ , где  $U_i$  – множество (входных) сигналов  $u_i$ , представляет собой любой  $i$ -й подпроцесс.

Внешние возмущения  $\omega$  из множества  $\Omega$  представлены в виде набора из  $n$  компонент:  $\omega = \langle \omega_1, \dots, \omega_n \rangle$ , в котором каждая компонента  $\omega_i$  воздействует только на соответствующий  $i$ -й подпроцесс.

Внешние возмущения  $\omega$  из множества  $\Omega$  представлены в виде набора из  $n$  компонент  $\omega = \langle \omega_1, \dots, \omega_n \rangle$ , в котором каждая компонента  $\omega_i$  воздействует только на соответствующий  $i$ -й подпроцесс.

Для правильного структурного представления системы управления средствами аудита необходимо разделить всю систему на компоненты (подсистемы). В модели, предложенной в работе [1], система разделяется (рис. 1): на систему координации  $C_0$  (вышестоящая управляющая система), которая решает задачу выдачи координирующего сигнала в зависимости от информации, получаемой от управляемых систем; на локальные (нижестоящие) управляющие системы  $C_1, \dots, C_n$ , оказывающие воздействие на процесс, а также сам управляемый процесс  $P$ .

Для взаимодействия подсистем используются два вида сигналов – «командные» и информационные.

«Командные» разделены авторами на восходящие и нисходящие по аналогии с сигналами в центральной нервной системе человека. Восходящие сигналы поступают от нижестоящих управляющих систем  $C_1, \dots, C_n$  к процессу  $P$  (управляющий сигнал  $m$ ,  $m \in M$ , где  $M$  – множество управляющих сигналов), а нисходящие – от вышестоящих систем к нижестоящим управляющим системам (координирующий сигнал  $\gamma$ ,  $\gamma \in \lambda$ ,  $\gamma = \langle \gamma_1, \dots, \gamma_n \rangle$ , где  $\lambda$  – множество координирующих сигналов). Для обмена информацией, получаемой в ходе воздействий на подчиненные системы и процесс  $P$ , используются информационные сигналы  $z_i$  и  $w_i$ . Эти сигналы определяются функциональными зависимостями  $f_i: M \times \Omega \times Y \rightarrow Z_i$  и  $f_0: \lambda \times Z \times M \rightarrow W_i$  соответственно.

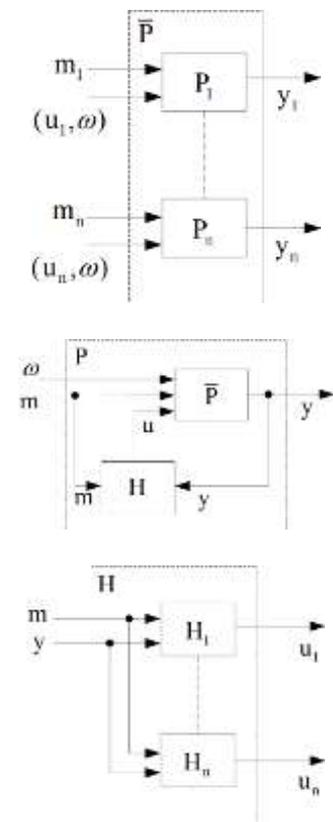


Рис. 2. Декомпозиция процесса  $P$

Отображения, связывающие подпроцессы, обозначим как  $H_i$ :

$$H_i: M \times Y \rightarrow U_i,$$

где  $U_i$  – множество связующих сигналов.

Тогда общее отображение  $H$ , связывающее все подпроцессы

$$H(m, y) = (H_1(m, y), \dots, H_n(m, y)).$$

Обозначим общий процесс  $\bar{P}$ :

$$\bar{P}(m, u, \omega) = (P_1(m_1, u_1, \omega), \dots, P_n(m_n, u_n, \omega)),$$

где  $\bar{P}$  – векторный процесс, состоящий из подпроцессов  $P_i$ .

$H$  связывает компоненты  $\bar{P}$  между собой, процесс  $P$  считается состоящим из связанных между собой подпроцессов, если выполнено условие

$$y = \bar{P}(m, H(m, y), \omega) \Leftrightarrow y = P(m, \omega).$$

Это условие означает, что для любой комбинации управляющего сигнала  $m$ , выходного сигнала  $y$ , внешнего воздействия  $\omega$ , если  $y$  равен результату применения процесса  $\bar{P}$  к  $m, H(m, y)$  и  $\omega$ , то это тоже самое что и применение  $P$  к  $m$  и  $\omega$ .

Если для любой комбинации  $(m, y, \omega)$  из  $M \times Y \times \Omega$  существует решение следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} y &= \bar{P}(m, u, \omega), \\ u &= H(m, y), \end{aligned}$$

то выходной сигнал  $y$  можно выразить через векторный процесс  $\bar{P}$  и отображение  $H$ , связывающее управляющие и связующие сигналы заданного управляющего воздействия  $m$  из  $M$  и возмущающего воздействия  $\omega$  из  $\Omega$ :

$$y = P(m, \omega).$$

На рис. 3 представлено соотношение между процессом  $P$  и подпроцессами  $P_i$ , представленными в совокупности блоком  $\bar{P}$ .

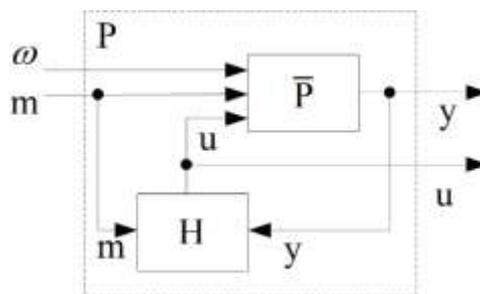


Рис. 3. Взаимосвязь между процессом  $P$  и отдельными независимыми подпроцессами, представленными блоком  $\bar{P}$

Важно отметить, что связующие сигналы  $u = \langle u_1, \dots, u_n \rangle$ , поступающие на вход подпроцессов, могут быть функционально связаны с управляющими воздействиями  $m$  и внешними возмущениями  $\omega$ . Другими словами,  $u$  может быть результатом отображения  $K: M \times \Omega \rightarrow U$ , где  $K(m, \omega) = H(m, P(m, \omega))$ .

Таким образом, процесс  $P$  может быть определен через подпроцессы, а отображение  $K$  может быть определено через соотношение  $P(m, \omega) = \bar{P}(m, K(m, \omega), \omega)$ , как показано на рис. 4.

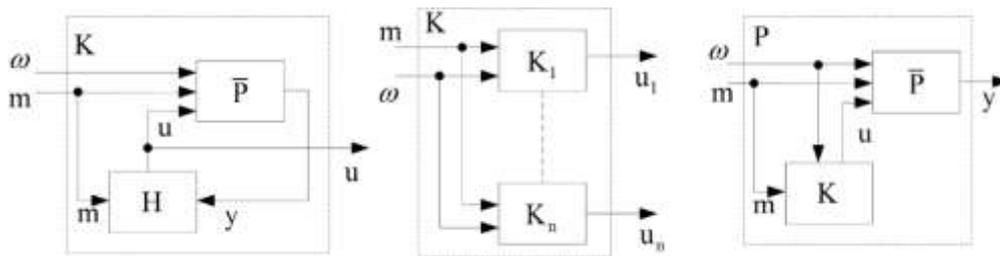


Рис. 4. Связь между  $K$ -функцией взаимодействия subprocessов и объединяющей их  $H$ -функцией

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Для рассмотрения прикладной стороны вопроса, связанного с организацией и применением системы аудита ИБ ИТС, предлагается рассмотреть упрощенный пример такой системы.

Как известно, для того чтобы провести качественный аудит безопасности целевой информационной системы, необходимо взглянуть на нее со стороны атакующего. В настоящее время имеется достаточно большое количество средств (как свободно распространяемых, так и коммерческих), способных осуществлять моделирование атакующих воздействий на различные элементы ИТС.

Пусть процесс  $P$  заключается в проведении аудита информационной безопасности. Без потери общности ограничим ИТС одним хостом с установленной на нем системой управления базами данных (СУБД), доступ к которой осуществляется удаленно по сети.

Весь процесс  $P$  можно разделить на subprocessы:

$P_1$  – subprocess определения операционной системы (ОС), установленной на исследуемом хосте;

$P_2$  – subprocess обнаружения доступных («открытых») сетевых портов;

$P_3$  – subprocess поиска уязвимостей СУБД, установленной на хосте, и баз данных, функционирующих под ее управлением.

Локальными управляющими системами являются программные и/или программно-аппаратные средства, осуществляющие:

$C_1$  – определение типа ОС пассивным и активным методом (например, *NetworkMiner* [1]);

$C_2$  – определение «открытых» сетевых портов (например, *Nmap* [2]);

$C_3$  – определение наличия уязвимости СУБД и функционирующих под ее управлением БД (например, *Scuba Database Vulnerability Scanner* [3]).

Вышестоящей управляющей системой  $C_0$  является программное средство, координирующее деятельность локальных управляющих систем. В настоящий момент такого программного средства нет, хотя потребность в нем очевидна. Предлагается далее под координатором  $C_0$  подразумевать оператора, который будет координировать деятельность подсистем  $C_1, \dots, C_3$  путем передачи координирующих сигналов  $\gamma$  через интерфейс управления программными средствами, а получать информацию  $\omega$  от программных средств – через отображающие интерфейсные элементы.

На рис. 5 приведен пример, детализирующий взаимодействие трех subprocessов, управляемых тремя локальными управляющими подсистемами.

Стоит отметить, что одно и то же внешнее возмущение  $\omega$  из  $\Omega$  может оказывать различное воздействие на каждый из subprocessов, поэтому внешние возмущения представлены как набор компонентов, где каждая компонента  $\omega_i$  воздействует только на соответствующий subprocess  $i$ . Этот подход обоснован, так как если  $i$ -я компонента  $\omega$  влияет на subprocessы отличные от  $P_i$ , то ее влияние может быть передано через сам процесс  $P_i$  и соответствующую

К-функцию. Однако иногда более целесообразно рассматривать комплексное воздействие внешнего возмущения  $\omega$  на каждый из подпроцессов, в зависимости от способности подпроцессов воспринимать и реагировать на внешние возмущения.

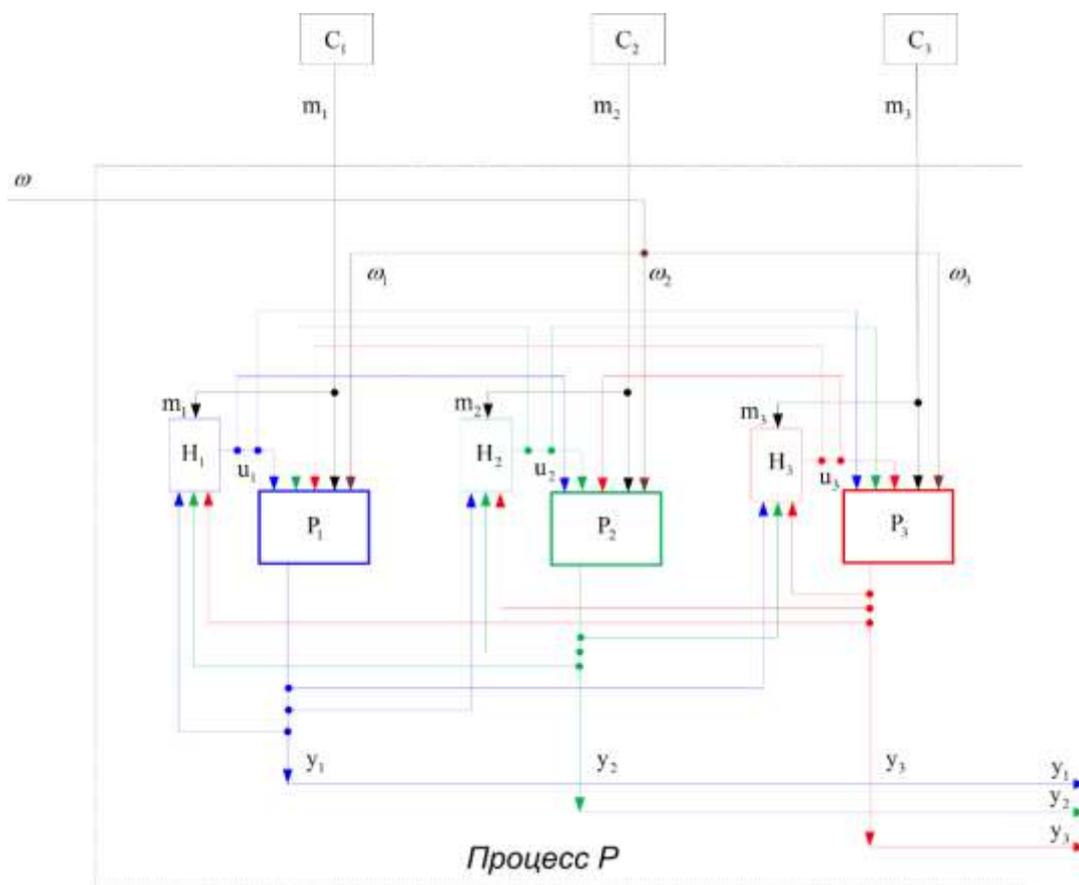


Рис. 5. Декомпозиция процесса P на подпроцессы

Под внешними возмущениями в рассматриваемом примере можно понимать работу средств защиты ИТС. В рассматриваемом примере это могут быть такие средства, как межсетевой экран, антивирусное средство, средство обнаружения и предотвращения вторжений и т. п. То есть, через множество  $\omega$  происходит взаимодействие процессов, обеспечивающих защищенность ИТС, с процессом аудита информационной безопасности.

Далее, в рамках рассматриваемого примера, предлагается не обращать внимание на внешние возмущения на уровне процесса, но учесть их существование на уровне координатора. При проведении аудита ИБ ИТС необходимо учесть, что результативность конкретных аудитов зависит от того, как будет аудит осуществляться. Исходя из сделанного замечания можно определить стратегию поведения координирующей системы, а следовательно, и предположить о множестве координирующих сигналов  $\lambda$ .

Методику проведения аудита ИБ ИТС, рассматриваемого в примере, в общем случае можно представить в виде последовательности действий.

**Этап 1.** Определение ОС исследуемого ИТС:

а) применить пассивный метод определения ОС ИТС:

- осуществить перехват сетевого трафика, передаваемого от объекта или к объекту;
- определить по перехваченному трафику установленную ОС (пассивно).

б) в случае отсутствия сетевого трафика (или отсутствия признаков установленной ОС), применить активный метод определения ОС путем передачи соответствующих сетевых запросов и анализа ответов на них (активно).

**Этап 2.** Обнаружение функционирующей СУБД:

а) если ОС принадлежит семейству Unix, то проверить на доступность сетевые порты, через которые обычно обмениваются данными СУБД, функционирующие под управлением данных ОС;

б) если ОС принадлежит семейству Microsoft Windows, то проверить на доступность сетевые порты, через которые обычно обмениваются данными СУБД, функционирующие под управлением данных ОС;

в) если ОС не определена, то проверить на доступность сетевые порты, через которые обычно обмениваются данными существующие СУБД;

г) если действия а)–в) не позволили определить открытые сетевые порты, то осуществить сканирование всего диапазона портов.

**Этап 3.** Поиск уязвимостей СУБД (аудиты выбирать в зависимости от определенной ОС и предполагаемой СУБД):

а) проверить гипотезу относительно установленной СУБД путем передачи соответствующих запросов к СУБД и анализа ответов на них (если для выдвижения гипотезы не было основания, то определить СУБД путем перебора запросов);

б) определить версии установленной СУБД;

в) выдвинуть гипотезы о возможных уязвимостях СУБД;

г) подобрать необходимые эксплоиты;

д) проверить защищенность СУБД путем применения эксплоитов и проверки результатов их применения.

**Этап 4.** Проверка защищенности БД (путем применения эксплоитов, скриптов и т. д.).

Исходя из анализа предложенной методики, несложно сопоставить ее этапы с подпроцессами  $P_1, P_2$  и  $P_3$ : «Этап 1» –  $P_1$ , «Этап 2» –  $P_2$ , «Этап 3» и «Этап 4» –  $P_3$ .

На рис. 5 отмечено взаимодействие между всеми подпроцессами (в рассматриваемом примере – между тремя), что на практике встречается редко, так как при проектировании многоуровневой системы разработчик, обладая априорными данными, может не устанавливать явно лишние связи. С другой стороны, разработчик (ввиду своей неосведомленности, недостатка опыта и т. п.) может не обеспечить связь между некоторыми процессами, наличие которой могло бы способствовать достижению более качественных результатов.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА

Рассмотренная и адаптированная под задачи аудита ИБ ИТС модель из работы [1] требует некоторых пояснений в части программной реализации, а именно формализации управляющих и информационных сигналов и способа управления сторонними средствами. Рассмотрим прикладную сторону вопроса, а именно описание сигналов для/от средств аудита ИБ, примененных для вышеупомянутого упрощенного примера объекта ИТС.

Взаимодействие между различными инструментами для проведения тестирования защищенности (аудита ИБ) происходит посредством описания входных сущностей (например, IP-адресов, доменов, запросов, потенциально содержащих возможность для SQL-инъекций и др.), а также выходных сущностей. В качестве примера можно привести вышеупомянутый сканер портов Nmap, который возвращает сервисы, получая на вход домен либо IP-адрес целевого компьютера в сети. Для каждой из сущностей имеется описание различных параметров. Они будут преобразовываться транслятором, который при помощи регулярных выражений или других способов извлекает требуемую информацию из «сырого» отчета средства. Инструмент «Сканер портов» может производить сущности «Сервис», которые обладают вышеперечисленными свойствами. Свойствами в случае сервиса, обнаруженного сканером портов (рис. 6), будут являться:

- 1) название сервиса (*SERVICE*);
- 2) порт (*PORT*);
- 3) версия программного обеспечения (*VERSION*);
- 4) статус (*opened, closed, filtered* и др.) (*STATE*).

```
Host is up (0.057s latency).
Not shown: 998 filtered tcp ports (no-response)
PORT      STATE SERVICE VERSION
80/tcp    open  http   nginx 1.14.2
443/tcp   open  ssl/http nginx 1.14.2
```

Рис. 6. Пример результатов сканирования программой Nmap

Транслятор фактически является локальной управляющей системой, принимающей координирующий сигнал (сущности и функции для запуска программных средств) и генерирующей (при помощи средства аудита ИБ) управляющий сигнал процессу, тем самым воздействуя на него. Подобный подход позволяет объединять инструменты в «конвейер», производящий анализ защищенности информационно-телекоммуникационной системы.

В дальнейшем данные о сервисах могут использоваться для поиска подходящих эксплойтов из базы данных, попыток подбора пароля к различным сервисам (SSH, RDP и др.), попыток доступа к общим, сетевым папкам, хранилищам без аутентификации, а также в других воздействиях, имитирующих реального злоумышленника. Эти данные также будут представляться сущностями, а для каждого из средств должен быть написан транслятор.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа проблемы комплексного применения различных средств аудита информационной безопасности был предложен подход к созданию многоуровневой системы, координирующей средства аудита при помощи управляющих сигналов в зависимости от внешних возмущений и сигналов обратной связи. С применением данного подхода проводится наиболее полный аудит ИБ посредством имеющихся у специалистов инструментов, поскольку он позволяет использовать информацию от различных средств и расширять перечень средств аудита при необходимости. Авторами также были рассмотрены некоторые особенности программной реализации, которые необходимо учитывать при разработке подобных инструментов управления средствами аудита ИБ.

## Список используемых источников

1. Мако Д., Месарович М., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
2. NetworkMiner – The NSM and Network Forensics Analysis Tool. – URL: <https://www.netresec.com/index.ashx?page=Networkminer> (дата обращения: 09.11.2023).
3. Nmap: the Network Mapper – Free Security Scanner. – URL: <https://nmap.org/> (дата обращения: 09.11.2023).
4. Scuba Database Vulnerability Scanner | Resource Library. – URL: <https://www.imperva.com/resources/free-cyber-security-testing-tools/scuba-database-vulnerability-scanner/> (дата обращения: 09.11.2023).

Д. Н. Бирюков<sup>1</sup>,  
*доктор технических наук, профессор;*  
С. Л. Лебедев<sup>2</sup>;  
В. Ю. Руссу<sup>3</sup>

<sup>1, 3</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

<sup>2</sup>Войсковая часть 35565, г. Москва.

## **ВЫБОР СПОСОБА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ИСПОЛНЯЕМОГО КОДА ПРОГРАММ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ**

Рассмотрены способы представления функций исполняемого кода программ для формирования качественной обучающей выборки для машинного обучения с целью автоматизации поиска уязвимостей в исполняемых файлах.

Ключевые слова: защита информации, автоматизация поиска уязвимостей, автоматизация распаковки прошивки, информационная безопасность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Анализ двоичного кода (АДК) дает возможность исследовать исполняемые файлы программ без доступа к исходному коду.

Вопрос АДК стал достаточно важным, так как существует большое количество программного обеспечения (ПО), используемого в различных сферах (медицина, промышленность, оборона и т. п.), доступ к исходному коду которого получить невозможно по разным причинам. Например, было подсчитано, что в настоящий момент в мире используется более 20 миллиардов устройств IoT [1]. АДК может повысить безопасность устройств, используемых в критически важных средах.

### **ПРОБЛЕМНАЯ СИТУАЦИЯ**

Порой для анализа безопасности ПО критически важных инфраструктур исполняемые файлы являются единственным источником информации. Компиляция и оптимизация могут привести к тому, что структура декомпилированного кода будет существенно отличаться от структуры исходного кода и представление одной и той же функции в дизассемблированном виде будет сильно отличаться на разных процессорах (x64, MIPS, ARM). Создание платформонезависимого промежуточного представления исполняемого кода рассматривалось в работах [2, 3]. В этих работах исследуются различные фреймворки для извлечения платформонезависимых функций из исполняемых файлов.

Например, уязвимость CVE-2023-20262 имеет разные потоки управления при компиляции в архитектуры x86 и MIPS, как показано на рис. 1, при этом в основе лежит один и тот же код библиотеки OpenSSH.

В традиционных подходах АДК применяются статические методы или частично формализованный анализ (например, посимвольное исполнение). Методы статического анализа фиксируют состояние регистров. При этом велика вероятность пропуска уязвимых путей из-за неполных данных профиля состояния программы. Формальный анализ может гарантировать отсутствие ложных срабатываний, но он не может использоваться для большого по объему ПО, так как для хранения состояний объем задействованных ресурсов компьютера увеличивается по экспоненциальному закону.

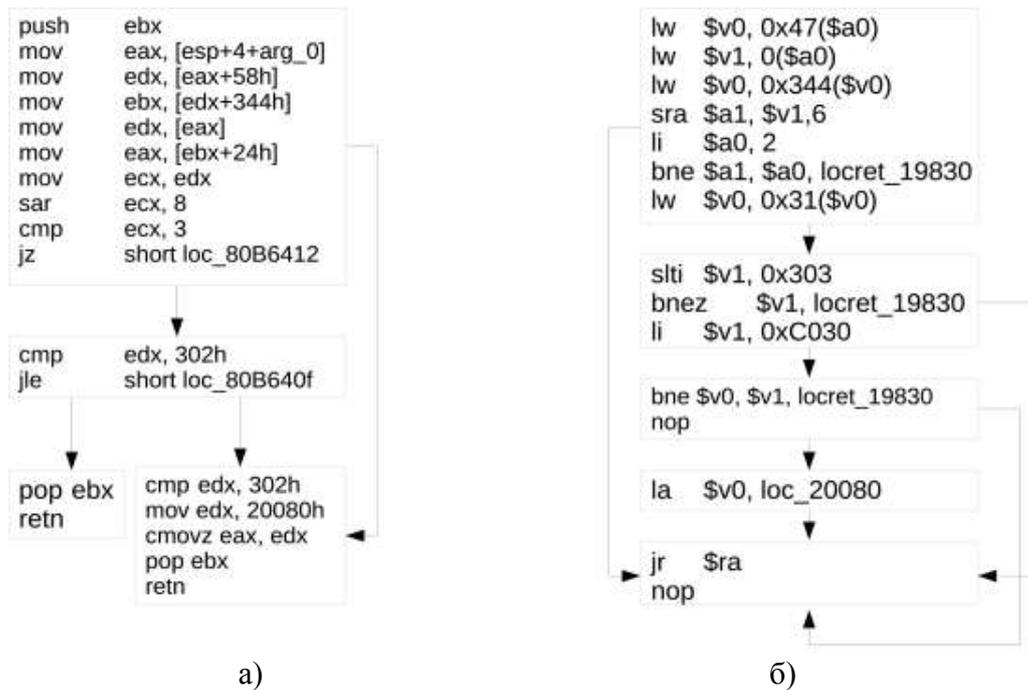


Рис. 1. Сравнение графиков потоков управления для разных архитектур:  
а – x86; б – MIPS

Для преодоления проблем АДК в автоматическом режиме применяются методы машинного обучения. АДК на основе машинного обучения состоит из двух этапов:

- этап обучения;
- этап анализа.

Общая структура показана на рис. 2. На этапе обучения анализируется исполняемый файл и выявляются уникальные особенности. На этапе анализа извлекаются функции путем лексического и синтаксического анализа. Обученная модель может использоваться для классификации функций по различным типам уязвимостей.



Рис. 2. Структура АДК на основе машинного обучения

## ТАКСОНОМИЯ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДВОИЧНОГО КОДА НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

На рис. 3 представлены основные компоненты системы АДК на основе машинного обучения.

Подробно рассмотрим методы представления функций исполняемого файла, так как от этого этапа зависит качество обучающей выборки и в целом качество модели.

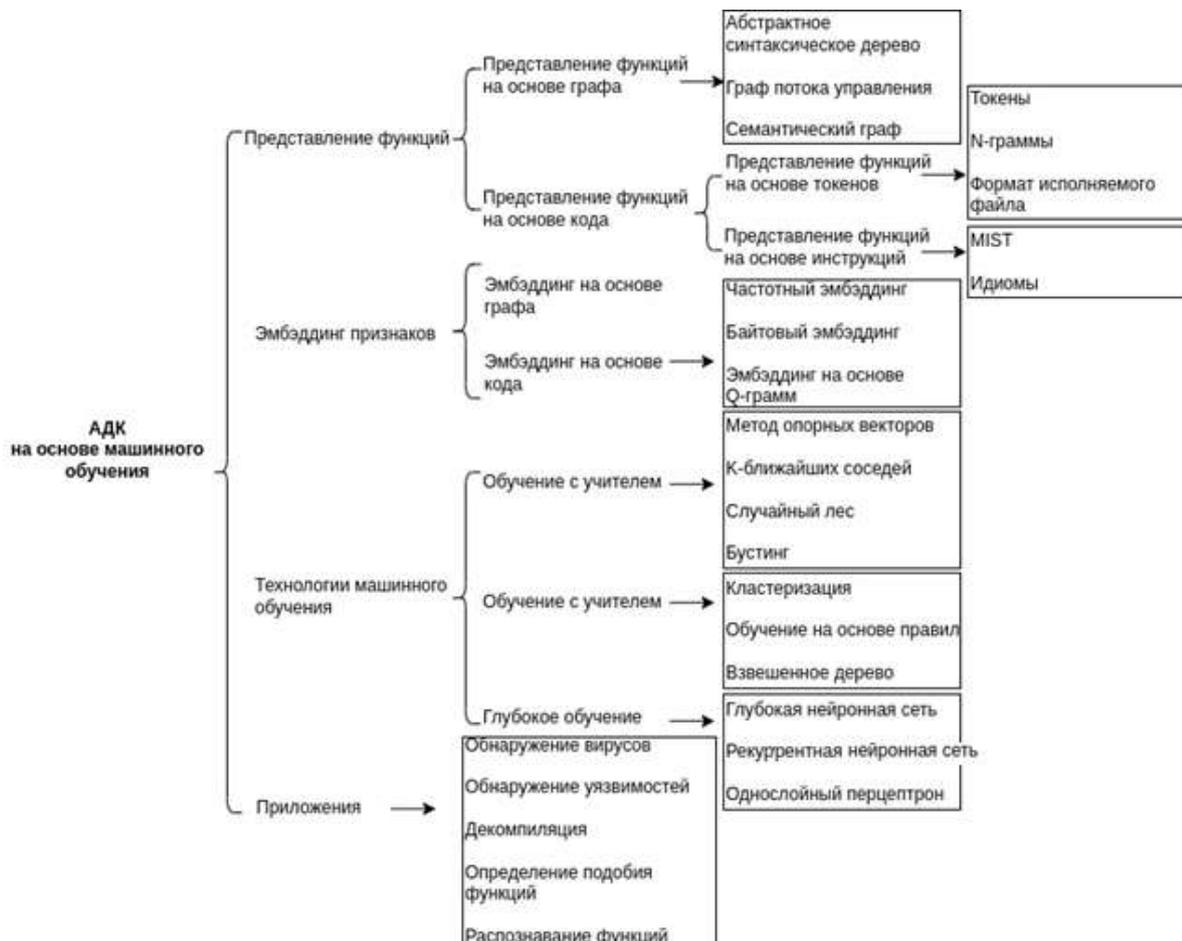


Рис. 3. Структура АДК на основе машинного обучения

### МЕТОДЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ИСПОЛНЯЕМОГО КОДА

В рамках применения машинного обучения в задачах обработки естественного языка (NLP) для исполняемых файлов надо учитывать, что двоичные коды, в отличие от человеческих языков, содержат большое количество словарных (базовых) блоков, которые имеют сложное отношение и малую избыточность. Первой задачей АДК на основе машинного обучения является извлечение объектов из исполняемого кода. Рассмотрим классификацию подходов представления функций исполняемого кода:

1. Представление функций на основе графа: двоичный код можно представить в виде графа потока управления (ГПУ). Способы представления кода в виде ГПУ рассмотрены в работах [4, 5].

2. Представление функций на основе дизассемблерного кода: функции извлекаются напрямую из необработанного двоичного кода. Есть два уровня извлечения функций:

– представление функций на уровне токенов: токены – это слова, символы, полученные в результате преобразования исполняемого кода в промежуточное представление с помощью декомпилирования и дизассемблирования, например применяя IDA Pro, Ghidra, Radare2 и др.;

– представление функций на уровне инструкций: инструкции уровня машинного кода представляют собой наборы маркеров, таких как ссылки на память, регистры и переменные. Комбинации таких инструкций являются функциями. Такой способ представления был рассмотрен в работах [6, 7].

Основная цель представления функций исполняемого кода заключается в том, чтобы связать двоичные шаблоны кода лексического уровня с шаблонами функций синтаксического уровня. Рассмотрим подробно перечисленные способы представления функций.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ НА ОСНОВЕ ГРАФА

Исполняемый код удобно представить в виде графа потока управления или графа зависимости данных, так как основные поля блоков в разных архитектурах остаются примерно одинаковыми. За счет этого свойства решается задача платформонезависимого представления исполняемого кода. Также графовые структуры удобно хранить в памяти компьютера, что делает этот подход удобным для представления функций больших приложений.

### 1. Абстрактное синтаксическое дерево.

Абстрактное синтаксическое дерево (АСД) используется для анализа зависимостей между переменными и операторами. Для представления функций сначала каждая инструкция в базовом блоке преобразуется в формальный вид обмена потоком данных между базовыми блоками. Затем движение данных между регистрами и памятью преобразуется в синтаксическое дерево.

На рис. 4,а показан базовый блок и выполняющиеся в нем операции перемещения данных, такие как копирование регистра, вычисление и др. На рис. 4,б показана передача параметров между вызывающим и вызываемым блоками.

push %ebp	eax = mem1	<c_strcasecmp>	eax = reg1
push %ebx	ebx = reg2	push %ebp	ebx = mem1
push %edi	ecx = reg3	mov %esp, %ebp	ecx = reg3
push %esi	edx = mem2	push %esi	edx = reg4
sub \$0x4c, %eax	esi = mem3	push %ebx	esi = mem2
mov 0x68(%esp), %eax	edi = reg6	sub %0x20, %esp	edi = reg6
mov 0x64(%esp), %edx	ebp = reg7	mov 0x8(%ebp), %esi	ebp = reg8 - 4
mov 0x60(%esp), %esi	esp = reg8 - 92	mov 0xc(%ebp), %ebx	esp = reg8 - 44
mov %edx, %edx		cmp %ebx, %esi	freqR+41 = mem3

а)

б)

Рис. 4. Инструкции и значения регистров после выполнения:

а – установка регистра стека в точке входа функции; б – доступ к памяти и передача управления между процедурами

### 2. Граф потока управления (ГПУ).

ГПУ представляет собой граф всех возможных путей выполнения программы. Построение ГПУ начинается с определения мест входа и выхода функций. Узлы ГПУ – последовательность инструкций, ребра – операции перехода между последовательностями инструкций. С помощью ГПУ удобно отражать внутренние отношения между основными блоками. Данный способ представления функций рассмотрен в работах [8, 9].

Для описания поведения двоичного кода вводятся неизоморфные подграфы ГПУ, изображенные на рис. 5, при помощи которых можно декомпозировать ГПУ на N-граммы.

Неизоморфные подграфы используются для представления деталей структуры программы. Также они могут быть использованы для классификации наборов инструкций.

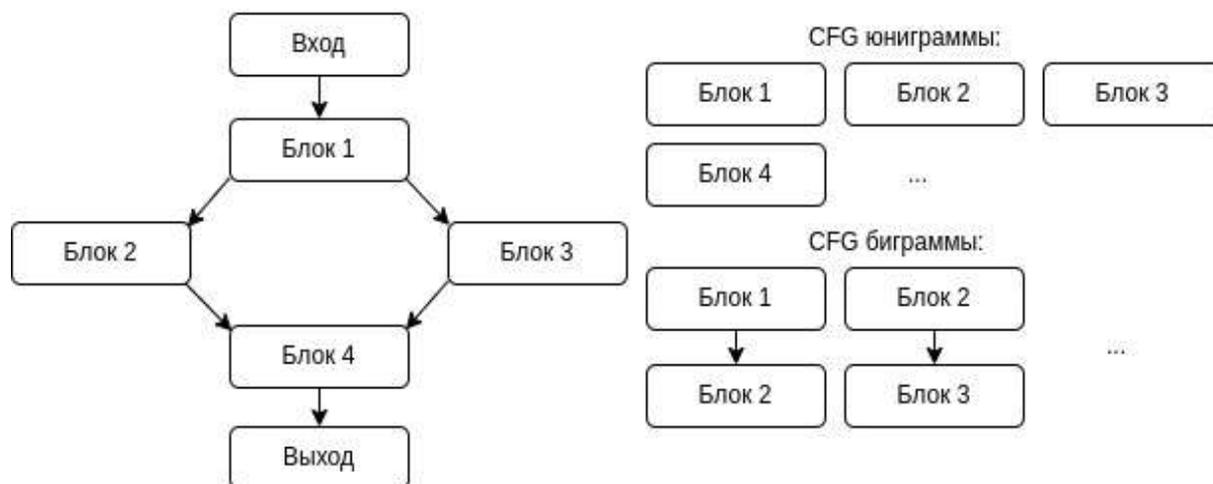


Рис. 5. Граф потока управления

### 3. Граф потока управления с атрибутами.

Граф потока управления с атрибутами (ГПУА) предназначен для решения задач обнаружения уязвимостей и выявления семантически схожих функций. В ГПУА вершины являются базовыми блоками с набором атрибутов. Наиболее часто встречающиеся атрибуты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Список атрибутов ГПАУ

Тип	Класс атрибутов
Блочные атрибуты	Строковые константы Числовые константы Арифметические инструкции Вызовы Инструкции перехода Другие инструкции
Отношения между блоками	Наследование Соседство

На рис. 5 приведен пример ГПУА, который был построен для уязвимости CVE-2023-34039 библиотеки OpenSSH. Каждая вершина представляет собой вектор набора атрибутов в виде списка [0, 1, 1, 0, 3, 0, 5, 0.19], где каждый элемент показывает количество инструкций в блоке определенного класса, например третья по счету единица показывает, что в блоке был только один условный вызов функции. Последнее число в списке указывает степень посредничества (мера центральности) вершине в графе.

### 4. Семантический граф.

Для скрытия процесса функционирования кода применяются различные виды обфускации, которые сильно могут изменить исполняемый файл. Восстановить описание функционирования исполняемого кода практически невозможно вышеперечисленными методами, поэтому был разработан метод представления исполняемого кода в виде семантического графа (СГ) [10]. Процесс преобразования исполняемого файла в семантический граф представлен на рис. 6.



Рис. 6. Процесс формирования семантического графа

Первым шагом является дизассемблирование. Дизассемблированный код содержит набор функций, каждая функция содержит набор инструкций, а каждая ассемблерная инструкция состоит из мнемоники и операндов. Операнды можно разделить на три категории: ссылка на память, ссылка на регистр и постоянное значение. Бывает, что два фрагмента кода идентичны по структуре, но различаются по способу обращения к памяти, например: обращение к одному и тому же участку памяти через разные регистры (ecx, ebx). Чтобы сравнивать такие фрагменты, ассемблерный код надо нормализовать, а именно построить граф потока управления. После нормализации каждая инструкция преобразовывается в тройку

$$V = \langle g, c, d \rangle,$$

- где *g* – группа инструкции (выбирается согласно табл. 2);
- c* – характеристика кода операции (выбирается согласно табл. 3);
- d* – код операции инструкции.

Таблица 2

**Группы инструкций**

Группа	Код	Пример
Стек	s	push
Арифметические инструкции	a	add
Логические инструкции	l	xor
Инструкции сравнения	c	test
Внутренние вызовы	e	call ds:socket
Внешние вызовы	i	call sub:xxx
Условные переходы	cj	je
Безусловные переходы	uj	jmp
Инструкции общего назначения	g	move

Таблица 3

**Характеристика кода операции**

Операнд 1	Операнд 2			
	Без операнда	Регистр	Память	Константа
Без операнда	0	1	2	3
Регистр	1	11	12	13
Память	2	21	22	23
Константа	3	31	32	33

Семантический граф  $G = (N, V, z, y, u, a, w)$  является ориентированным, здесь  $N$  – множество узлов,  $V = (N \times N)$  – набор ребер,  $z$  – функция маркировки ребер, которая каждому ребру устанавливает метку  $y$ ,  $z \rightarrow y$ ,  $u$  – функция, показывающая направление отношения между вызываемой и вызывающей функциями,  $w$  – функция, показывающая направление зависимости данных. На рис. 7 показан процесс построения СГ.

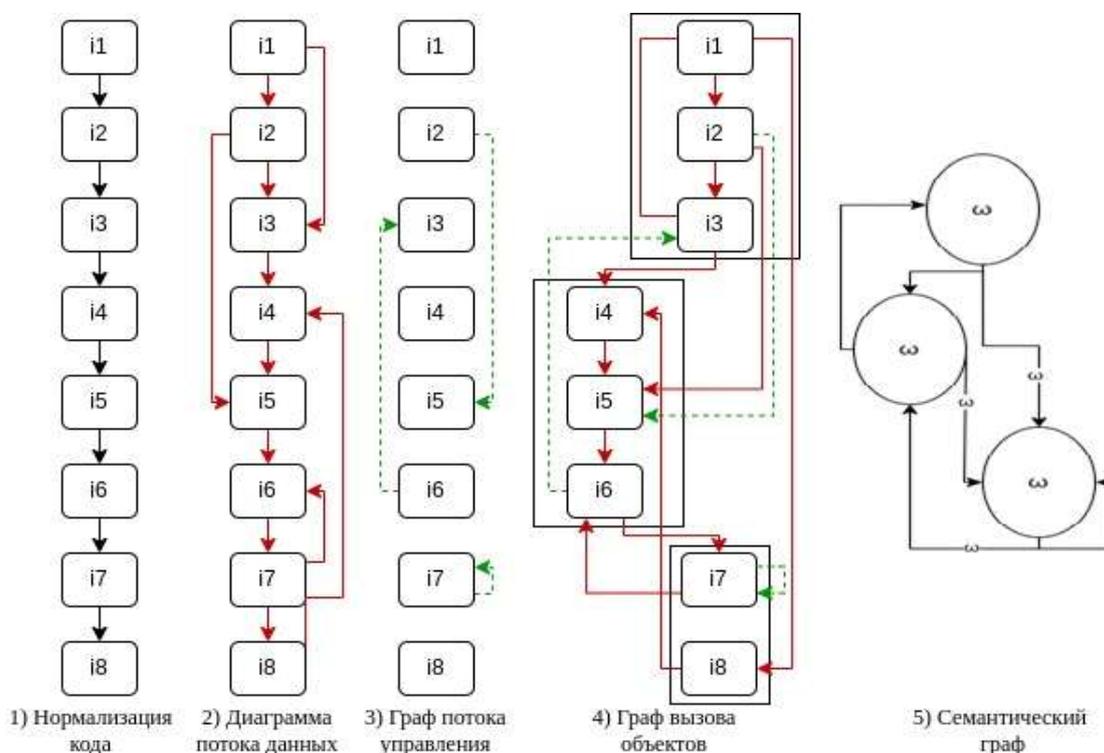


Рис. 7. Пример построения СГ

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ НА ОСНОВЕ ДИЗАССЕМБЛЕРНОГО КОДА

### 1. Представление функций на основе токенов.

Токены представляют собой слова, символы, полученные в результате дизассемблирования и декомпилирования. Преимущество данного способа представления над графовым способом заключается в том, что последовательность токенов достаточно легко извлекать из исполняемого кода и такая последовательность будет содержать достаточно информации для представления синтаксиса и структуры кода. Последовательности токенов удобно преобразовывать в другие виды представления функций. Такой метод подходит для анализа крупномасштабных программ.

$N$ -грамма представляет собой последовательность из  $N$  объектов (инструкций, байт), последовательно извлеченных из исполняемого кода. Полученные  $N$ -граммы заносятся в таблицу (табл. 4). В дальнейшем такую таблицу можно использовать для задач выявления схожести между файлами, функциями и т. д. Данный подход рассмотрен в работе [11].

Формат исполняемого файла (PE) содержит важную информацию по загрузке программы, динамических библиотек, API операционной системы и т. д. Эта информация в заголовках PE может быть использована для формирования признаков. Например, в работе [12] для выявления вредоносных программ устанавливались следующие признаки: размер файла, имена функций в динамически загружаемых библиотеках, извлекаемых из заголовков PE с помощью утилиты libBFD, API Windows, таблица импорта.

Таблица 4

Таблица наборов N-грамм объектов

Функция	Термы (N-граммы)					
$F_1$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_9$	...	...
$F_2$	$t_3$	$t_4$	$t_6$	$t_8$	...	...
$F_3$	$t_3$	$t_4$	$t_6$	$t_7$	...	...
$F_4$	$t_3$	$t_4$	$t_6$	$t_8$	...	...
$F_5$	$t_1$	$t_2$	$t_4$	$t_6$	...	...
$F_6$	$t_1$	$t_2$	$t_4$	$t_9$	...	...
$F_7$	$t_2$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	...	...
$F_8$	$t_2$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	...	...
$F_9$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_8$	...	...
...	...	...	...	...	...	...
$F_n$	$t_i$	...	...	...	...	$t_k$

## 2. Представление функций на основе инструкций.

Для представления функций на основе инструкций могут применяться идиомы. Идиома – это шаблон для фиксации последовательности инструкций. Последовательности инструкций, удовлетворяющие шаблону, извлекаются для дальнейшего представления исполняемого файла. Есть два типа идиом: префиксные и внутренние. Примером внутренней идиомы может быть  $u_1 = (\text{push ebp} \mid * \mid \text{mov esp, ebp})$ , где вместо знака «\*» может быть любая последовательность инструкций. Префиксная идиома:  $u_2 = (\text{PRE} : \text{ret} \mid \text{pop bp})$ , где вместо PRE может быть любая последовательность инструкций, предшествующая POP BP.

Для представления поведения программного кода также используют список инструкций MIST (набор инструкций вредоносного ПО) [13]. В формате MIST фиксируются последовательности инструкций, которые затрагивают системные вызовы, полученные в результате трассировки программы.

Попытка замены системной библиотеки сторонним файлом в синтаксисе MIST будет описываться следующим образом:

```
<move_file srcfile=c:\my_dll.exe dstfile=c:\windows\Ntdll.dll file_type=file distribution=CREATE>.
```

Используя соответствие атрибутов MIST из табл. 5 данное выражение можно закодировать в виде 03 05 | 01 000000 01 00006ce5 000066fc ... Такой подход был применен в разработке инструмента мониторинга поведения программы CWSandbox[14].

Таблица 5

Таблица кодирования MIST, количество операций

Категория	#системные вызовы	Категория	#системные вызовы
01 Windows COM	4	0B Windows Services	11
02 DDL Handling	3	0C System	2
03 Filesystem	14	0D Systeminfo	7
04 ICMP	1	0E Thread	3
05 Inifile	5	0F User	8

## СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ИСПОЛНЯЕМОГО КОДА

Сравнение способов представления функций исполняемого кода может быть проведено по различным параметрам, таким как платформонезависимость, потребление ресурсов, сохранение семантики кода, необходимость предобработки исполняемого кода, возможность деобфускации, наличие программных реализаций. Выбор способа представления функции зависит от конкретной задачи и доступных данных. При выборе представления следует учитывать, что нужно сохранять не только структуру блоков ассемблерного кода и связи между ними, но и информацию о значениях переменных и результатах выполнения операций. Это позволяет точно воспроизвести работу программы и определить возможные уязвимости.

Семантика кода определяется набором правил, которые определяют, какие операции можно выполнять, какие регистры можно использовать и как результаты операций сохраняются в памяти.

В табл. 6 приведен сравнительный анализ способов представления исполняемого кода.

Таблица 6

Сравнительный анализ способов представления исполняемого кода

Способ представления функции	Код/Граф	Платформонезависимость	Ресурсы	Семантика	Предобработка	Деобфускация	Реализация
АСД	граф	–	среднее	–	–	–	+
ГПУ	граф	–	мало	–	–	+	+
ГПУА	граф	–	мало	–	+	+	+
СГ	граф	+	много	+	+	+	+
N-граммы	код	+	мало	–	–	–	+
PE	код	–	средне	–	–	–	+
Идиомы	код	–	мало	–	–	–	–
MIST	код	+	средне	–	+	–	+

Рассмотрев табл. 6, можно сделать вывод: СГ полностью сохраняет семантику кода, что дает возможность создания платформонезависимого представления исполняемого кода, а это является ключевым фактором для формирования качественной обучающей выборки. Деобфускацию можно реализовать на СГ при помощи применения правил машины логического вывода. Перечень этих правил находится на данный момент в разработке. Таким образом, для создания обучающей выборки предлагается выбрать представление кода в виде семантического графа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы представления функций двоичного кода можно использовать для анализа двоичных исполняемых файлов без доступа к исходному коду. Эти методы также применяются для обнаружения схожести функций, выявления вредоносного кода, тестирования ПО и т. д. С помощью методов машинного обучения АДК может быть значительно усовершенствован и ускорен, что позволит повысить защищенность ПО.

В данной статье были рассмотрены некоторые основные аспекты и проблемы АДК, а также способы представления функций для АДК. Результаты сравнительного анализа будут учитываться в дальнейшем при выборе модели машинного обучения АДК.

**Список используемых источников**

1. The internet of things / C. Lee [et al.]. – OECD, 2017. – 56 p.
2. *Eschweiler S., Yakdan K., Gerhards-Padilla E.* Efficient cross-architecture identification of bugs in binary code // NDSS. – URL: <https://nlds.stpi.org> (дата обращения: 23.09.2023).
3. Scalable graph-based bug search for firmware images / Qian Feng [et al.] // Conference on Computer and Communications Security. – ACM SIGSAC, 2016. – P. 480–491.
4. *Hosfelt D. D.* Automated detection and classification of cryptographic algorithms in binary programs through machine learning. – URL: <https://arxiv.org> (дата обращения: 23.09.2023).
5. Neural network-based graph embedding for cross-platform binary code similarity detection / Xiaojun Xu [et al.] // Conference on Computer and Communications Security. – ACM SIGSAC, 2017. – P. 363–376.
6. Lime: A framework for debugging load imbalance in multithreaded execution / Jungju Oh [et al.] // Proceedings of the 33rd International Conference on Software Engineering. – ACM, 2011. – P. 201–210.
7. Flexitaint: A programmable accelerator for dynamic taint propagation / Guru Venkataramani [et al.] // 14th International Symposium on High Performance Computer Architecture. – IEEE, 2008. – P. 173–184.
8. *Theiling H.* Extracting safe and precise control flow from binaries // In Real-Time Computing Systems and Applications. 7th International Conference. – IEEE, 2000. – P. 23–30.
9. *Kinder J., Zuleger F., Veith H.* An abstract interpretation-based framework for control flow reconstruction from binaries // International Workshop on Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation. – Springer, 2009. – P. 214–228.
10. BinGold : Towards Robust Binary Analysis by Extracting the Semantics of Binary Code as Semantic Flow Graphs (SFGs). – Concordia University, Canada, 2016. – P. 5–7.
11. *Liangboonprakong C., Sornil O.* Classification of malware families based on n-grams sequential pattern features // Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 8th IEEE Conference. – IEEE, 2013. – P. 777–782.
12. *Rosenblum N. E., Miller B. P., Zhu X.* Extracting compiler provenance from program binaries // Proceedings of the 9th ACM SIGPLAN-SIGSOFT workshop on Program analysis for software tools and engineering. – ACM, 2010. – P. 21–28.
13. A malware instruction set for behavior-based analysis / P. Trinius [et al.] // ResearchGate. URL: <https://researchgate.net> (дата обращения: 23.09.2023).
14. Automatic analysis of malware behavior using machine learning / K. Rieck [et al.] // Journal of Computer Security. – 2011. – № 19(4). – P. 639–668.

Д. В. Нагибин,  
 А. А. Платонов,  
*кандидат технических наук;*  
 Т. Р. Сабиров,  
*кандидат технических наук*

## МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕАЛИЗОВАННЫХ В ЗАКАЗНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНЫХ СПЕЦИФИКАЦИЙ

В статье рассмотрен вопрос автоматизации процесса идентификации функционально-структурных спецификаций заказных интегральных схем. Предложенный авторами подход основан на онтологическом представлении знаний и реализован с помощью разработанных правил для машины логического вывода. Предложена структура уровней детализации элементов, образуемых в процессе восстановления функционально-структурных спецификаций заказных интегральных схем.

Ключевые слова: заказные интегральные схемы, машина логического вывода.

### ВВЕДЕНИЕ

Особенности построения функционально-структурных спецификаций архитектуры заказных интегральных схем (ЗИС) и предложенного подхода [1, 2] к представлению спецификаций позволяют свести задачу формализованного представления слабоструктурированных функционально-структурных спецификаций к трем последовательно выполняемым этапам, к которым относятся:

- 1) трансляция исходных файлов представления элементной базы исследуемой ЗИС в интеллектуальную систему поддержки принятия решений (ИСППР);
- 2) пополнение базы знаний (БЗ) ИСППР;
- 3) построение спецификаций функционально-логических вычислений исследуемой ЗИС.

В результате создается онтологическая модель спецификаций функционально-логических вычислений, аппаратно реализованных в ЗИС.

Отмечается, что получение знаний о технологиях в области информационного взаимодействия, осуществляемого посредством применения заказных интегральных схем, дает возможность развивать отечественные разработки в этой области и способствовать реализации программ по импортозамещению микроэлектронной технической продукции.

Вышеуказанное позволило сформулировать математическую постановку задачи идентификации [3] функционально-структурных спецификаций ЗИС [4].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дано:

- 1)  $X_{Pr}$  – исходный файл с описанием элементной базы исследуемой ЗИС, представленной в виде помеченного связного графа

$$X_{Pr} = \langle H, S, P \rangle,$$

где  $H$  – множество вершин графа  $X_{Pr}$ , которые являются элементами исследуемой ЗИС (например: инвертор, повторитель, сумматор сигналов и т. п.),  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ ;

$S$  – множество ребер графа  $X_{Pr}$ , которые являются связями (сигналами) между элементами исследуемой ЗИС (элементами  $h_i \in H$ ),  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ ;

$P$  – множество функций, реализуемых элементами  $h_i \in H$ , связанными (соединенными) элементами  $s_j \in S$ ,  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_b\}$ . Например, функция элемента из множества  $h_i \in H$  «сумматор трех сигналов» –  $p_k \in P: p_k(in1, in2, in3) = in1 + in2 + in3$ , где  $in1, in2, in3$  – входные параметры функции  $p_k$ , которые посредством аппаратных «связей» (элементов  $s_j \in S$ ) подаются на «вход» рассматриваемого элемента  $h_i \in H$  с других элементов множества  $H$ ;

2)  $Z_M = BZ\_Spec\_ZIS$  – база знаний интеллектуальной системы поддержки принятия решений, содержащая знания о спецификациях известных и восстановленных ЗИС;

3)  $U^{SpO} = \{u_1^{SpO}, u_2^{SpO}, \dots, u_e^{SpO}\}$  – множество спецификаций, потенциально реализуемых на знаниях  $Z_M$ .

Ограничения (основаны на экспертных оценках и текущем уровне технического развития отрасли):

– множество элементов  $H$  исследуемой ЗИС конечно, его мощность  $n = |H|$  и  $0 < n \leq 10^8$ ;

– множество связей (сигналов)  $S$  между элементами исследуемой ЗИС конечно, его мощность  $m = |S|$  и  $0 < m \leq 10^9$ ;

– множество типов действий  $P$  исследуемой заказной интегральной схемы конечно, его мощность  $b = |P|$  и  $0 < b \leq 4 \cdot 10^2$ .

Допущения:

– восстановленные функционально-структурные блоки ЗИС, распознаваемые как блоки, реализующие встроенные процессоры, достаточно локализовать;

– при исследовании первой заказной интегральной схемы БЗ ИСППР  $Z_M$  может быть пустой.

Найти:

$U^{SpC} = \{u_1^{SpC}, u_2^{SpC}, \dots, u_c^{SpC}\}$  – множество спецификаций, потенциально реализуемых на основе восстановленной структуры ЗИС.

На начальном этапе необходимо определить порядок трансляции исходных файлов в БЗ интеллектуальной системы. Далее знания, описанные в исходных файлах, представляются в виде онтологии [5], которая формирует информационную среду интеллектуальной системы [6]. Онтология описывает и содержит знания  $Z_M$  о множестве различных известных реализаций заказных интегральных схем. На основе знаний  $Z_M$  строится множество  $U^{SpO}$  потенциально-реализуемых на них спецификаций функционально-логических вычислений. На основе восстановленной структуры исследуемой ЗИС строится соответствующее ей частное множество спецификаций.

## **ЭТАПЫ МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕАЛИЗОВАННЫХ В ЗАКАЗНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНЫХ СПЕЦИФИКАЦИЙ**

Разработанная методика состоит из трех этапов:

- 1) сбор и анализ первичной информации об исследуемой технике и ЗИС;
- 2) обратное проектирование заказной интегральной схемы;
- 3) выявление множества возможных режимов функционирования исследуемой заказной интегральной схемы.

Каждый этап методики состоит из последовательности шагов.

Рассмотрим их подробнее.

**Этап 1.** Сбор и анализ первичной информации об исследуемой технике и ЗИС.

*Шаг 1.* Создание базы знаний функционально-структурных спецификаций исследованных ЗИС  $BZ\_Spec\_ZIS$ .

При исследовании первого устройства БЗ  $BZ\_Spec\_ZIS$  будет пустой. Результаты работы ниже представленной методики пополняют БЗ  $BZ\_Spec\_ZIS$ .

*Шаг 2.* Поиск в БЗ  $BZ\_Spec\_ZIS$  заказной интегральной схемы, по отношению к которой необходимо провести верификационные исследования.

Сравнительный анализ полученных результатов с теми техническими устройствами, результаты исследования которых являются доступными по первичным признакам (например: фирма-производитель, модель, серийный номер, технические характеристики и др. [7, 8]).

**Этап 2.** Обратное проектирование заказной интегральной схемы.

В рамках проведения настоящей работы будем считать, что элементы файл  $X_{pr}$  с описанием структуры исследуемой ЗИС являются исходными данными.

*Шаг 1.* Выделение в структуре исследуемой ЗИС представляющих интерес функционально-структурных блоков.

*Шаг 2.* Работа «Машины логического вывода» с так называемыми тройками «Действие – Действие – Действие».

*Шаг 3.* Создание новых функционально-структурных элементов исследуемой ЗИС, состоящих из базовых элементов исходного файла  $X_{pr}$ , и восстановление логики ее функционирования. В качестве базовых элементов будем считать простейшие логические элементы «И», «ИЛИ», «НЕ» и производные от них.

На первом шаге в структуре исследуемой ЗИС выделяются представляющие интерес функционально-структурные блоки, что соответствует допущениям, представленным в математической постановке задачи исследования. Например, восстановление структуры и логики функционирования встроенных в ЗИС стандартных вычислительных процессоров может не представлять практического интереса, в отличие от функционально-структурных блоков, реализующих специальные вычисления (преобразования).

На втором шаге происходит применение разработанных правил для машины логического вывода, полный перечень которых представлен в табл. 1. Исходный файл  $X_{pr}$  содержит восстановленные аппаратные связи между объектами – простейшими логическими элементами. Однако аппаратные связи не в полной мере отражают логические связи между функционально-структурными блоками. Правила логического вывода позволяют дополнять связи между элементами и проводить укрупнение восстанавливаемых структурных блоков [2].

Машина логического вывода работает с так называемыми тройками «Действие – Действие – Действие». В работах [2, 9] рассмотрены следующие связи между элементами в этих тройках:  $F_{13}$  – аппроксимирует,  $F_5$  – следует за,  $F_7$  – состоит из.

На вход подаются:

- тройки связанных между собой элементов  $A_1, A_2, A_3$ ;
- связи типа  $F_{13}/F_5/F_7$  между элементами;
- направление связи:  $R$  – вправо,  $L$  – влево;
- кванторы с обеих сторон связей: « $a$ » – *all* (каждый) и « $s$ » – *same* (некоторый).

Правила (также строятся с учетом кванторов на обеих сторонах связей) позволяют строить связи между изначально несвязанными между собой напрямую элементами  $A_1$  и  $A_3$ . Если правило невозможно построить, то в таблице напротив этих входных данных в качестве результата помещен символ .

Всего для машины логического вывода было рассмотрено 81 правило, 55 из которых позволяют генерировать новые знания об исследуемом объекте.

Таблица 1

## Правила для машины логического вывода

№ п/п	Входные данные	Результат
1	$\langle A_1, \langle R, \_, \_ \rangle, A_2, \langle R, \_, \_ \rangle A_3 \rangle$	
1.1	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	
1.1.01	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_{13}, aa \rangle, A_3 \rangle$
1.2	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, aa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, as	$\langle A_1, \langle R, F_5, as \rangle, A_3 \rangle$
	aa, sa	
	aa, ss	
1.3	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, aa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, as	$\langle A_1, \langle R, F_7, as \rangle, A_3 \rangle$
	aa, sa	
	aa, ss	
1.4	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, as \rangle, A_3 \rangle$
	as, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, as \rangle, A_3 \rangle$
	sa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, ss \rangle, A_3 \rangle$
	ss, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, ss \rangle, A_3 \rangle$
1.5	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	
1.6	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, aa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, as	$\langle A_1, \langle R, F_5, as \rangle, A_3 \rangle$
	aa, sa	$\langle A_1, \langle R, F_5, sa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, ss	$\langle A_1, \langle R, F_5, ss \rangle, A_3 \rangle$
	as, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, as \rangle, A_3 \rangle$
	as, as	$\langle A_1, \langle R, F_5, as \rangle, A_3 \rangle$
	as, sa	
	as, ss	
	sa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, sa \rangle, A_3 \rangle$
	sa, as	$\langle A_1, \langle R, F_5, ss \rangle, A_3 \rangle$
	sa, sa	$\langle A_1, \langle R, F_5, sa \rangle, A_3 \rangle$
	sa, ss	$\langle A_1, \langle R, F_5, ss \rangle, A_3 \rangle$
	ss, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, sa \rangle, A_3 \rangle$
	ss, as	$\langle A_1, \langle R, F_5, ss \rangle, A_3 \rangle$
	ss, sa	
	ss, ss	
1.7	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, as \rangle, A_3 \rangle$
	as, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, as \rangle, A_3 \rangle$
	sa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$

Продолжение табл. 1

№ п/п	Входные данные	Результат
	ss, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$
1.8	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	
1.9	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, aa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, as	$\langle A_1, \langle R, F_7, as \rangle, A_3 \rangle$
	aa, sa	$\langle A_1, \langle R, F_7, sa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, ss	$\langle A_1, \langle R, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$
	as, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, aa \rangle, A_3 \rangle$
	as, as	$\langle A_1, \langle R, F_7, as \rangle, A_3 \rangle$
	as, sa	
	as, ss	
	sa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, sa \rangle, A_3 \rangle$
	sa, as	$\langle A_1, \langle R, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$
	sa, sa	$\langle A_1, \langle R, F_7, sa \rangle, A_3 \rangle$
	sa, ss	$\langle A_1, \langle R, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$
	ss, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, sa \rangle, A_3 \rangle$
	ss, as	$\langle A_1, \langle R, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$
	ss, sa	
	ss, ss	
2	$\langle A_1, \langle R, \_ \rangle, A_2, \langle L, \_ \rangle A_3 \rangle$	
2.1	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	
2.2	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle L, F_5, aa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, as	
	aa, sa	$\langle A_1, \langle L, F_5, sa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, ss	
2.3	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle L, F_7, sa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, as	
	aa, sa	$\langle A_1, \langle L, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$
	aa, ss	
2.4	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	Эквивалентно 2.2
2.5	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	
2.6	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	
2.7	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	Эквивалентно 2.3
2.8	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	Эквивалентно 2.6
2.9	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	
3	$\langle A_1, \langle L, \_ \rangle, A_2, \langle R, \_ \rangle A_3 \rangle$	
3.1	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	
3.2	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_5, sa \rangle, A_3 \rangle$

Окончание табл. 1

№ п/п	Входные данные	Результат
	aa, as	$\langle A_1, \langle R, F_5, ss \rangle, A_3 \rangle$
	aa, sa	$\langle A_1, \langle R, F_5, sa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, ss	$\langle A_1, \langle R, F_5, ss \rangle, A_3 \rangle$
3.3	$\langle A_1, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	
	aa, aa	$\langle A_1, \langle R, F_7, sa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, as	$\langle A_1, \langle R, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$
	aa, sa	$\langle A_1, \langle R, F_7, sa \rangle, A_3 \rangle$
	aa, ss	$\langle A_1, \langle R, F_7, ss \rangle, A_3 \rangle$
3.4	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	Эквивалентно 3.2
3.5	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	
3.6	$\langle A_1, \langle \_, F_5, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	
3.7	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_{13}, \_ \rangle A_3 \rangle$	Эквивалентно 3.3
3.8	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_5, \_ \rangle A_3 \rangle$	Эквивалентно 3.6
3.9	$\langle A_1, \langle \_, F_7, \_ \rangle, A_2, \langle \_, F_7, \_ \rangle A_3 \rangle$	

На рис. 1 приведено наглядное представление одного из правил для машины логического вывода на примере пункта 1.4 из табл. 1. Содержание рис. 1 представлено в форме постановки задачи (в верхней части рисунка) и ее решения (в нижней части рисунка).

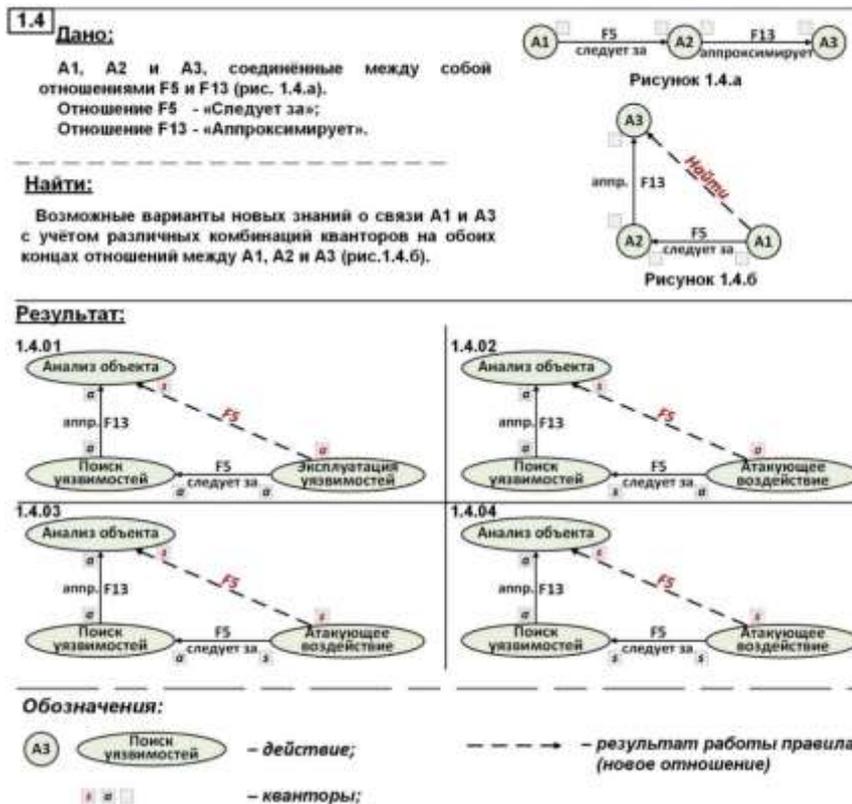


Рис. 1. Пример разработанного правила для машины логического вывода

На третьем шаге 2-го этапа разработанной методики происходит укрупнение функционально-структурных блоков исследуемой ЗИС и восстановление логики их функционирования.

В ходе исследования была разработана структура уровней детализации элементов, образуемых в процессе восстановления функционально-структурных спецификаций ЗИС, представленная на рис. 2.

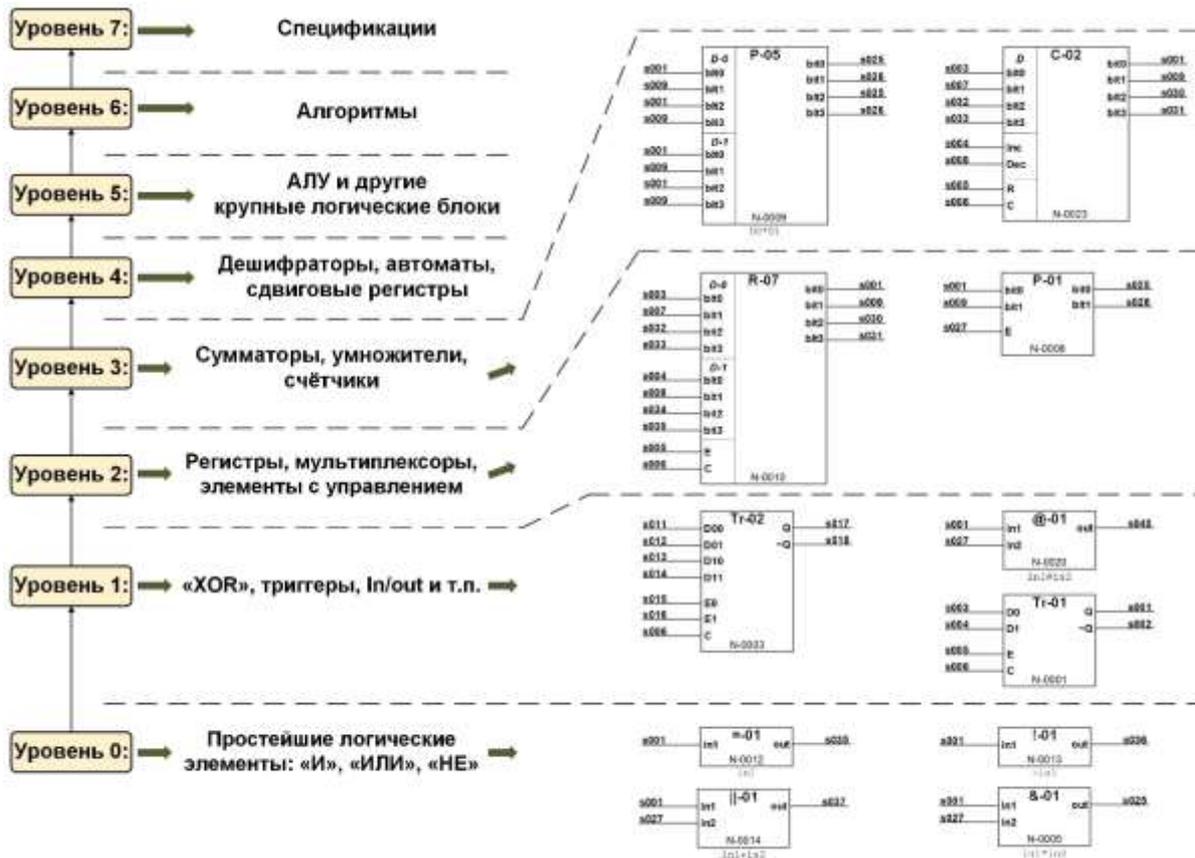


Рис. 2. Уровни детализации элементов, образуемых в процессе восстановления функционально-структурных спецификаций заказных интегральных схем

Методы обратного проектирования описывают исследуемое техническое устройство в виде множества соединенных между собой простейших логических элементов. Поэтому исходный файл  $X_{Pr}$  содержит в себе элементы, соответствующие уровням 0 и 1 (рис. 2). Проведение укрупнения позволяет оператору-исследователю на более высоких уровнях представления понимать, визуализировать и программировать функционально-логические блоки исследуемой заказной интегральной схемы.

**Этап 3.** Выявление множества возможных спецификаций функционирования исследуемой заказной интегральной схемы.

**Шаг 1.** Выявление в структуре исследуемой ЗИС множества сигналов  $Signal\_U$ , отвечающих за реализацию управляющих воздействий.

**Шаг 2.** Первоначальная генерация множества спецификаций  $U^{SpC} = \{u_1^{SpC}, u_2^{SpC}, \dots, u_c^{SpC}\}$ , потенциально реализуемых в исследуемой ЗИС.

**Шаг 3.** Наложение на  $U^{SpC}$  ограничений, связанных с подключенными сигналами управления  $Signal\_U$  и аппаратной конфигурацией исследуемой ЗИС.

На первом шаге выявляются управляющие сигналы  $Signal\_U$ . Восстановленные (распознанные) на предыдущем этапе функционально-структурные блоки соединены этими сигналами управления, которые играют роль ограничений в их взаимосвязях, так как на аппаратном уровне функционально-структурные блоки соединены не «каждый с каждым».

На втором и третьем шагах формируется множество спецификаций исследуемой ЗИС  $U^{SpC} = \{u_1^{SpC}, u_2^{SpC}, \dots, u_c^{SpC}\}$  с учетом подключенных сигналов управления  $Signal\_U$ . Спецификации предлагается представлять в виде функций ( $f$ ) и функциональных форм ( $f \circ g$ ), применение последних позволяет строить новые функции из уже существующих и представленных в онтологии. Подобная способность присуща формальным системам для функционального программирования, предложенным и обоснованным Дж. Бэкусом [10], которые могут создавать новые функциональные формы и сохранять их для последующего применения [9].

Стоит отметить, что сами функциональные формы представляются последовательностями концептов, где первый элемент последовательности определяет какую форму она представляет, тогда как остальные элементы являются параметрами формы. Например,  $(f \circ g)$  – функциональная форма – композиция  $f$  и  $g$ , тогда для любого концепта  $x$  –  $(f \circ g): x = f:(g:(x))$ .

Предположим, что существуют функции:  $A, V$  и  $C$ , каждая из которых состоит из соответствующих последовательно выполняющихся функций (рис. 3).

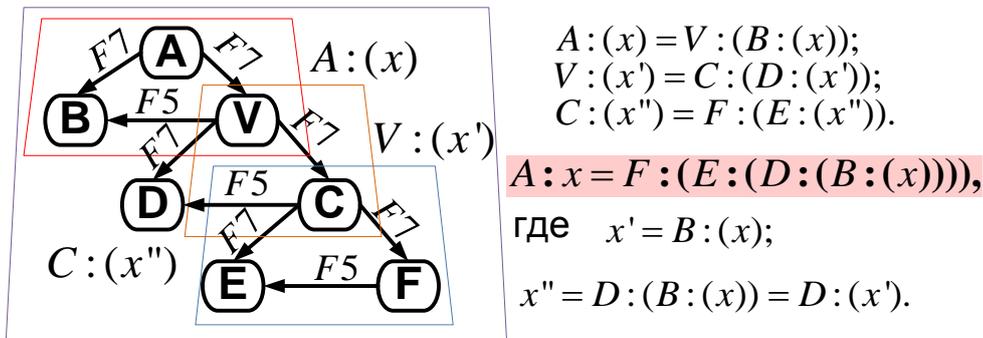


Рис. 3. Пример представления спецификаций описываемых процессов

Необходимо применить функции  $A, V$  и  $C$  к параметру (концепту)  $x$ . Тогда в виде спецификаций данные функции записываются следующим образом: для  $A$  –  $V:(B:(x))$ , для  $V$  –  $C:(D:(x))$ , для  $C$  –  $F:(E:(x))$ . При этом существует возможность «развернуть» функцию  $A$  на составляющие ее функции:  $A = F:(E:(D:(B:(x))))$ . Именно в таком виде предлагается представлять спецификации для осуществления верификации описываемых ими режимов функционирования исследуемой ЗИС, которые в дальнейшем могут способствовать выявлению ошибок проектирования и реализации.

Верификация функционально-структурных спецификаций ЗИС может производиться частично с целью локализации структурных блоков ЗИС, полный анализ которых проводить не требуется (например, процессорная часть). Это становится возможным при применении представленной на рис. 2 структуры уровней укрупнения функционально-структурных блоков исследуемых ЗИС. Такая локализация существенно снижает временные затраты на проведение всего процесса верификации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика идентификации реализованных в заказных интегральных схемах функционально-структурных спецификаций, позволяющая строить полное множество возможных вариантов функционирования исследуемой ЗИС.

Разработаны правила порождения знаний для «Машины логического вывода» с учетом всех комбинаций кванторов на обоих концах отношений между рассматриваемыми семантическими звеньями. Представлен пример правила порождения знаний для «Машины логического вывода».

Предложен вариант выделения уровней детализации элементов, образуемых в процессе восстановления функционально-структурных спецификаций ЗИС, который позволяет производить укрупнение логических элементов исследуемой ЗИС через их объединение и создание новых элементов.

В качестве дальнейшего развития полученных результатов рассматриваются:

- апробация разработанной методики идентификации реализованных в заказных интегральных схемах функционально-структурных спецификаций;
- разработка методики верификации функционально-структурных спецификаций заказных интегральных схем.

### Список используемых источников

1. *Нагибин Д. В.* Подход к описанию субъектно-объектных отношений в ходе обеспечения информационной безопасности // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации: материалы 29-й научно-технической конференции 28-30 сентября 2020 года. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2020. – С. 44–47.
2. *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.
3. *Сейдж Э.П., Мелса Дж. Л.* Идентификация систем управления. – М. : Наука, 1974. – 248 с.
4. *Зинкевич А. В.* Исследование методов и разработка устройств обработки информации в системах на кристалле : дис. ... канд. техн. наук. – Хабаровск, 2014. – 150 с.
5. *Бирюков Д. Н., Ломако А. Г.* Денотационная семантика контекстов знаний при онтологическом моделировании предметных областей конфликта // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 5(42). – С. 155–179.
6. *Бирюков Д.Н., Ломако А. Г., Ростовцев Ю. Г.* Облик антиципирующих систем предотвращения рисков реализации киберугроз // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 2(39). – С. 5–25.
7. *Нагибин Д. В.* Модель нарушителя информационной безопасности на основе руководящих документов в области защиты информации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 676. – С. 156–160.
8. *Нагибин Д. В., Потернеев Г. Ю., Нефедов В. С.* Подход к универсальной классификации внешнего нарушителя информационной безопасности на основе выделения перечня угроз объектам информационно-телекоммуникационных систем // Молодые ученые России : сб. ст. XII Всерос. науч.-практ. конф., Пенза, 07 апр. 2022 г. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2022. – С. 28–32.
9. Верификация нормативных документов / Т. Р. Сабилов [и др.] // Защита информации. Инсайд. – 2018. – № 5(83). – С. 54–58.
10. *Бэкус Дж.* Можно ли освободить программирование от стиля фон Неймана? Функциональный стиль и соответствующая алгебра программ / пер. с англ. В. В. Мартынюка // Лекции лауреатов премии Тьюринга за первые двадцать лет 1966-1985 / под ред. Р. Эшенхерста. – М. : Мир, 1993. – С. 84–158.

М. А. Александров<sup>1</sup>,

кандидат технических наук;

Е. П. Минаков<sup>2</sup>,

доктор технических наук, профессор;

А. В. Мищеряков<sup>3</sup>;

С. В. Мищеряков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

<sup>4</sup>Войсковая часть 13991, г. Мирный.

## МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПРОЛЕТА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НАД ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМИ ОБЛАСТЯМИ

Работа посвящена оцениванию вероятности пролета орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли над пространственно-временными областями. Адаптирована модель расчета вероятности потенциального пролета орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли над пространственно-временной областью. Разработан новый метод оценивания вероятности пролета орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли над пространственно-временными областями с использованием метода наклонных проекций и метода расчета параметров невозмущенного движения объектов в рамках Кеплеровой теории. Разработана модель определения границ наклонных проекций пространственно-временных областей, сформирован алгоритм оценивания среднего времени пролета орбитальной группировки над этой областью. Приводятся оценки использования орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для мониторинга пространственно-временных областей с целью своевременного обнаружения объектов, находящихся в этих областях.

Ключевые слова: наклонная проекция, вероятность потенциального пролета.

### ВВЕДЕНИЕ

Широкомасштабное использование различными странами орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА) различного целевого предназначения делает необходимым поиск путей преятствовать применению этих средств. В условиях априорной неопределенности времени начала применения, времен включения бортовой аппаратуры (БА) и характеристик применения ОГ КА по заданной пространственно-временной области (ПРВО) показательными становятся оценки вероятностей пролета этих средств над ПРВО на заданном интервале времени [1].

Основными характеристиками применения ОГ КА по заданной ПРВО являются:

- 1) вероятность потенциально результативных пролетов ОГ КА над ПРВО в любой момент времени;
- 2) средняя продолжительность пролета заданного количества КА над ПРВО;
- 3) интервал времени, когда над ПРВО не пролетает ни один КА из заданной ОГ.

Это делает актуальным разработку и апробацию метода оценивания вероятности пролета ОГ КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) над ПРВО.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть считаются заданными:

- 1) геометрическое место точек (ГМТ) границ ПРВО  $\{\psi_k, \lambda_k\}_K$ , где  $\psi_k$  – геоцентрическая широта,  $\lambda_k$  – геоцентрическая долгота  $k$ -й точки,  $k = 1(1)K$  – номер точки (требование равномерности расположения точек отсутствует);

2) интервал времени оценивания вероятности применения ОГ КА ДЗЗ по ПРВО  $\Delta T$  (начало применения ОГ КА ДЗЗ по заданной ПРВО не определено, является случайным);

3) КА ДЗЗ, по каждому из которых известен вектор баллистических и технических характеристик  $B_j = \langle n_j, a_j, e_j, i_j, \omega_j, \gamma_j, \alpha_j \rangle$ , где  $n_j$  – идентификатор (номер)  $j$ -го КА,  $a_j$  – большая полуось,  $e_j$  – относительный эксцентриситет,  $i_j$  – наклонение орбиты,  $\omega_j$  – аргумент широты перигея,  $\gamma_j$  – угол полураствора бортовой аппаратуры (БА)  $j$ -го КА,  $\alpha_j$  – предельный угол ее отклонения по углу крена.

К решению задач в ПРВО предлагается привлекать гражданские КА, принадлежащие коммерческим организациям и различным странам. Пусть известно общее количество таких КА –  $n$ . В условиях случайности момента времени начала применения ОГ КА ДЗЗ по ПРВО к случайным факторам могут быть отнесены долготы и моменты времен пролетов ими восходящих узлов орбит.

Считается, что пролет ОГ КА ДЗЗ над ПРВО является потенциально результативным, если полоса его обзора покрывает хотя бы часть этой области.

Требуется оценить вероятность потенциально результативных пролетов заданной ОГ КА ДЗЗ над ПРВО в любой момент времени, на заданном интервале времени оценивания вероятности применения ОГ КА ДЗЗ  $P_n$ .

Для решения поставленной задачи введем ряд допущений:

- 1) случайные события пролетов ОГ КА ДЗЗ над ПРВО независимы;
- 2) события пролета над ПРВО на восходящих и нисходящих витках траектории независимы;
- 3) движение КА моделируется в рамках Кеплеровой теории [2];
- 4) модель поверхности Земли – сфера;
- 5) освещенность ПРВО Солнцем не учитывается.

### **МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ПРОЛЕТА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАД ЗАДАННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТЬЮ**

При случайном времени начала применения ОГ КА ДЗЗ по ПРВО (при заданном положении и продолжительности существования) для любого КА с априорно известными параметрами движения его пролет над этой областью может считаться случайным событием. Это объясняется тем, что для случайного времени начала применения КА ДЗЗ по ПРВО случайным является относительное положение КА и ПРВО, что эквивалентно случайным значениям аргумента широты КА на этот момент времени и долготы восходящего узла орбиты на соответствующем витке этого КА. В свою очередь, случайное значение аргумента широты КА эквивалентно случайному времени пролета восходящего узла орбиты. Имея ввиду, что одной и той же долготе восходящего узла орбиты КА могут соответствовать различные времена пролетов (и наоборот), уместно считать независимыми случайные события пролета восходящего узла орбиты, задаваемого соответствующей долготой, и положения КА вдоль орбиты, задаваемой аргументом широты КА. Следовательно, при случайном времени начала применения КА ДЗЗ по ПРВО пролет им восходящего узла орбиты, задаваемого соответствующей долготой, и время его пролета могут рассматриваться как независимые случайные события.

В этой связи вероятность потенциально результативного пролета  $j$ -го КА ДЗЗ над ПРВО на одном витке может быть оценена по формуле [3]

$$P_{Bj} = P_{1j} \cdot P_{2j}, \quad (1)$$

- где  $P_{1j}$  – вероятность случайного события, состоящего в том, что при случайном времени начала применения КА ДЗЗ по ПРВО координаты подспутниковых точек будут располагаться в пределах этой области;
- $P_{2j}$  – вероятность случайного события, состоящего в том, что при случайном времени начала применения КА ДЗЗ по ПРВО значение времени пролета восходящего узла орбиты будет находиться в пределах интервала времени отводимого на применение КА ДЗЗ.

Для  $j$ -го КА  $P_{1j}$  может быть оценена геометрическим способом по формуле

$$P_{1j} = \frac{\Delta\lambda_{Bj} + \Delta\lambda_{Hj}}{2 \cdot \pi}, \quad (2)$$

- где  $\Delta\lambda_{Bj}$  – угловой размер наклонной проекции ПРВО для восходящего витка траектории  $j$ -го КА;
- $\Delta\lambda_{Hj}$  – угловой размер наклонной проекции ПРВО для нисходящего витка траектории  $j$ -го КА.

Для  $j$ -го КА  $P_{2j}$  может быть оценена геометрическим способом по формуле

$$P_{2j} = \frac{\Delta t_{\text{cp } j}^B}{T_j}, \quad (3)$$

- где  $\Delta t_{\text{cp } j}^B$  – средняя продолжительность пролета  $j$ -го КА над ПРВО на одном витке;
- $T_j$  – период обращения  $j$ -го КА [4].

$$T_j = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{a_j^3}{K_3}}, \quad (4)$$

где  $K_3 = 398600,44 \text{ км}^3/\text{с}^2$  – гравитационная постоянная Земли.

Средняя продолжительность пролета  $j$ -го КА над ПРВО на восходящих витках траектории определяется по формуле

$$\Delta t_{\text{cp } j}^B = \frac{1}{\Delta t_{Bj}} \cdot \int_{\lambda_{Bj}^{\text{II}}}^{\lambda_{Bj}^{\text{I}}} t(\lambda_{Bj}; B_j) d\lambda_{Bj}, \quad (5)$$

где  $\Delta t_{Bj}$  – продолжительность движения  $j$ -го КА от левой до правой границы ПРВО на восходящем витке орбиты.

В рамках постановки задачи должна оцениваться вероятность пролета каждого КА хотя бы над частью ПРВО, что соответствует внешнему касанию их полосами обзора ПРВО (рис. 1).

За отводимое время  $\Delta T$   $j$ -й КА выполнит  $N_j$  витков, оцениваемое по формуле

$$N_j = E \left[ \frac{\Delta T}{T_j} \right] + 1, \quad (5)$$

где  $E[\cdot]$  – символ операции выделения целой части числа.

Вероятность пролета  $j$ -го КА над ПРВО на восходящих или нисходящих витках траектории хотя бы на одном витке на интервале времени  $\Delta T$  может быть оценена по формуле

$$P_j = 1 - (1 - P_{Bj})^{N_j}. \quad (7)$$

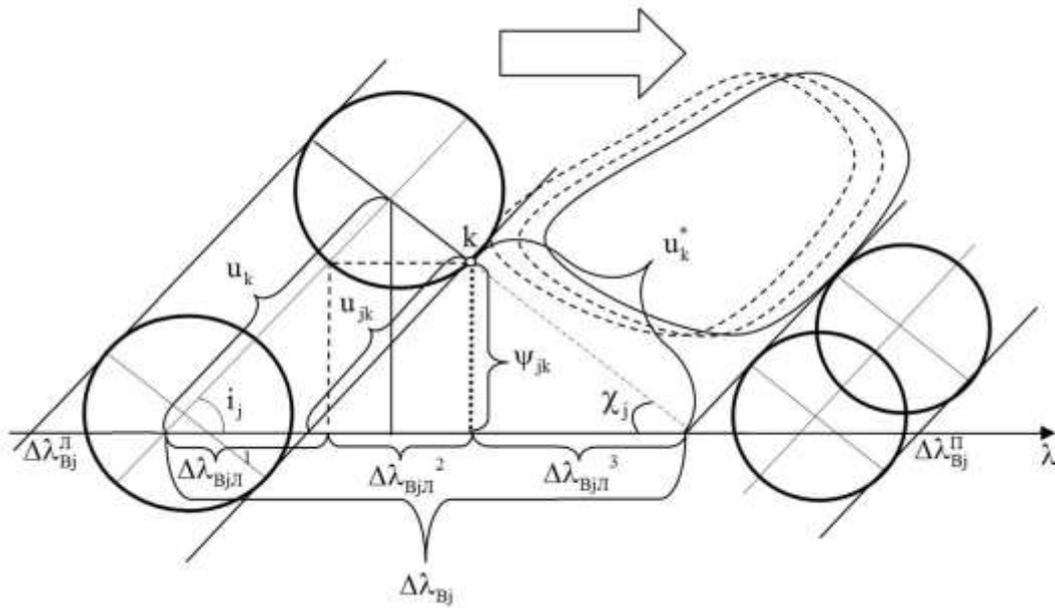


Рис. 1. Касание полос обзора КА ПРВО (плоское изображение)

На рисунке использованы следующие обозначения:

$k$  – точка ПРВО;

$u_{jk}$  – аргумент широты точки касания полосы обзора  $j$ -го КА  $k$ -й точки ПРВО;

$u_k$  – аргумент широты подспутниковой точки  $j$ -го КА, зона обзора которой касается ПРВО в точке  $k$ ;

$\gamma_j$  – угол между плоскостью, нормальной к плоскости орбиты  $j$ -го КА и проходящей через точку  $k$ , и плоскостью экватора Земли;

$u_k^*$  – дуга в плоскости между экватором Земли и точкой  $k$ ;

$\psi_{jk}$  – угол касания полосой обзора  $j$ -го КА ПРВО в точке  $k$ ;

$\Delta\lambda_{Вj}$  – величина угла между направлением на восходящий узел орбиты  $j$ -го КА и линией пересечения экватора Земли плоскостью, нормальной к плоскости орбиты  $j$ -го КА и проходящей через точку  $k$ ;

$\lambda_{ВjЛ}$  – долгота левой точки наклонной проекции ПРВО на экватор Земли для  $j$ -го КА на восходящих витках траектории;

$\lambda_{ВjП}$  – долгота правой точки наклонной проекции ПРВО на экватор Земли для  $j$ -го КА на восходящих витках траектории.

Вероятность пролета хотя бы одного КА из ОГ, состоящей из  $n$  КА, над ПРВО  $P_n$  может быть оценена по формуле

$$P_n = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_j). \quad (8)$$

Формула позволяет оценивать величину вероятности пролета хотя бы одного КА из заданной ОГ над ПРВО в любой момент на заданном интервале времени  $\Delta T$ .

Из формулы видно, что  $P_n = 1$  только при  $n = \infty$ . Поскольку всегда  $n \ll \infty$ , то это означает, что всегда существуют разрывы в пролетах КА над ПРВО.

## МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ НАКЛОННЫХ ПРОЕКЦИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Для определения величин  $\Delta\lambda_{Вj}$ ,  $\Delta\lambda_{Hj}$  необходимо рассчитать аргумент широты точки касания полосы обзора  $j$ -го КА  $k$ -й точки ПРВО  $u_{jk}$  по правилу Непера с использованием соответствующего пятиугольника [5]:

$$\sin u_{jk} = \frac{\sin \psi_{jk}}{\sin i_j}. \quad (9)$$

По правилу Непера с помощью этого же пятиугольника можно рассчитать величину дуги  $\Delta\lambda_{ВjL}^1$ , используя следующую формулу:

$$\sin \Delta\lambda_{ВjL}^1 = \text{ctg} i_j \cdot \text{tg} \psi_{jk}. \quad (10)$$

Радиус орбиты  $j$ -го КА, соответствующего указанной точке касания полосой обзора ПРВО в точке  $k$ , и радиус его орбиты в восходящем узле орбиты определяются по уравнению траектории [6]

$$r(u_{jk}) = \frac{a_j \cdot (1 - e_j^2)}{1 + e_j \cdot \cos(u_{jk} - \omega_j)}. \quad (11)$$

Вычисление половины углового размера полосы обзора  $j$ -го КА в восходящем узле орбиты  $\phi_{зПj}$  (рис. 2) может быть осуществлено по формуле [7]

$$\phi_{зПj}(r(u_j=0), \gamma_j, \alpha_j) = \frac{\pi}{2} - (\alpha_j + \gamma_j) - \arccos\left(\frac{r(u_j=0)}{R_3 \cdot \sin(\alpha_j + \gamma_j)}\right), \quad (12)$$

где  $R_3$  – средний радиус Земли,  $R_3 = 6371$  км.

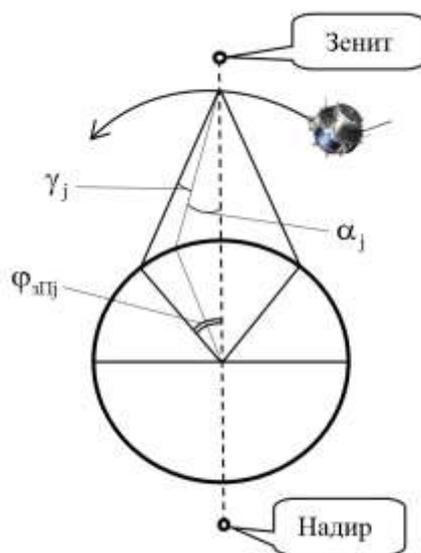


Рис. 2. Угловой размер половины полосы обзора КА  $\phi_{зПj}$ , угол полураствора БА  $\gamma_j$ , предельный угол отклонения БА по углу крена  $\alpha_j$  (плоское изображение)

Вычисление половины углового размера полосы обзора  $j$ -го КА в  $k$ -й точке ПРВО может быть произведено по формуле:

$$\phi_{зПj}(r(u_{jk}), \gamma_j, \alpha_j) = \frac{\pi}{2} - (\alpha_j + \gamma_j) - \arccos\left(\frac{r(u_{jk})}{R_3 \cdot \sin(\alpha_j + \gamma_j)}\right). \quad (13)$$

Угол между плоскостью, нормальной к плоскости орбиты  $j$ -го КА и проходящей через точку  $k$ , и плоскостью экватора Земли  $\chi_j$  (см. рис. 1) определяется по правилу Непера:

$$\operatorname{tg}\chi_j = \frac{\operatorname{ctg}i_j}{\cos u_{jk}}. \quad (14)$$

Дуга  $u_k^*$  в этой плоскости между экватором Земли и точкой  $k$  (см. рис. 1) может быть рассчитана с использованием того же пятиугольника:

$$\cos u_k^* = \frac{\cos i_j}{\sin \chi_j}. \quad (15)$$

Угол касания  $\psi_{jk}$  полосой обзора  $j$ -го КА ПРВО в точке  $k$  (см. рис. 1) вычисляется по правилу Непера:

$$\sin \psi_{jk} = \sin \chi_j \cdot \sin u_k^*. \quad (16)$$

Угол в плоскости экватора Земли  $\Delta\lambda_{ВjЛ}^3$  определяется по тому же пятиугольнику по формуле

$$\cos \Delta\lambda_{ВjЛ}^3 = \frac{\cos u_k^*}{\cos \psi_{jk}}. \quad (17)$$

Величина угла  $\Delta\lambda_{Вj}$  между направлением на восходящий узел орбиты  $j$ -го КА и линией пересечения экватора Земли плоскостью, нормальной к плоскости орбиты  $j$ -го КА и проходящей через точку  $k$  (см. рис. 1) рассчитывается по правилу Непера:

$$\cos \Delta\lambda_{Вj} = \operatorname{ctg}i_j \cdot \operatorname{ctg}\chi_j. \quad (18)$$

Угол между линией пересечения меридианом точки  $k$  экватора Земли и направлением на точку наклонной проекции точки  $k$  без учета вращения Земли определяется по формуле

$$\Delta_{Вj} = \Delta\lambda_{Вj} - \Delta\lambda_{ВjЛ}^3. \quad (19)$$

Аргумент широты подспутниковой точки  $j$ -го КА, зона обзора которой касается ПРВО в точке  $k$ , рассчитывается в соответствии с зависимостью по правилу Непера:

$$\sin u_k = \operatorname{ctg}i_j \cdot \operatorname{tg}(u_k^* + \phi_{зПj}). \quad (20)$$

Эксцентрисическая аномалия  $E_{kj}$  этой же точки определяется как

$$\frac{\operatorname{tg}E_{kj}}{2} = \sqrt{\frac{1-e_j}{1+e_j}} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{u_k - \omega_j}{2}\right). \quad (21)$$

Эксцентрисическая аномалия точки на этой дуге, расположенной на экваторе Земли, вычисляется по аналогичной формуле:

$$\frac{\operatorname{tg} E_{0j}}{2} = \sqrt{\frac{1-e_j}{1+e_j}} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\omega_j}{2} \right). \quad (22)$$

Продолжительность движения  $j$ -го КА между указанными точками определяется по уравнению Кеплера в разностной форме [7]:

$$\Delta t_{Bj} = \frac{T_j}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ (E_{kj} - E_{0j}) - e_j \cdot (\sin E_{kj} - \sin E_{0j}) \right]. \quad (23)$$

Угловой размер половины полосы обзора на экватор Земли вычисляется по правилу Непера:

$$\sin \Delta_{Hj} = \operatorname{tg} \phi_{3\Pi j} \left( r(u_j = 0), \gamma_j, \alpha_j \right) \cdot \operatorname{ctg} i_j. \quad (24)$$

Долгота левой наклонной проекции на экватор Земли  $k$ -й точки ПРВО для  $j$ -го КА определяется зависимостью

$$\lambda_{Bkj}^I = \lambda_k - \Delta_{Bj} - \Delta_{Hj} - \omega_3 \cdot \Delta t_{Bj}. \quad (25)$$

Долгота правой наклонной проекции на экватор Земли  $k$ -й точки ПРВО для  $j$ -го КА определяется зависимостью

$$\lambda_{Bkj}^{II} = \lambda_k - \Delta_{Bj} + \Delta_{Hj} - \omega_3 \cdot \Delta t_{Bj}. \quad (26)$$

Долгота левой точки наклонной проекции ПРВО на экватор Земли для  $j$ -го КА на восходящих витках траектории определяется зависимостью

$$\lambda_{Bj}^I = \min_k \left\{ \lambda_{Bkj}^I \right\}. \quad (27)$$

Долгота правой точки наклонной проекции ПРВО на экватор Земли для  $j$ -го КА на восходящих витках траектории определяется зависимостью

$$\lambda_{Bj}^{II} = \min_k \left\{ \lambda_{Bkj}^{II} \right\}. \quad (28)$$

Угловой размер наклонной проекции ПРВО на экватор Земли для  $j$ -го КА на восходящих витках траектории определяется зависимостью

$$\Delta \lambda_{Bj} = \lambda_{Bj}^{II} - \lambda_{Bj}^I. \quad (29)$$

Аналогичные формулы используются для определения левой  $\lambda_{Bj}^I$  и правой  $\lambda_{Bj}^{II}$  точек наклонной проекции ПРВО на экватор Земли для  $j$ -го КА и углового размера наклонной проекции ПРВО  $\Delta \lambda_{Hj}$  на экватор Земли для  $j$ -го КА на нисходящих витках траектории.

### АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ НАД ЗАДАННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТЬЮ

В соответствии с принятыми исходными данными ПРВО задается как ГМТ, каждая из которых задается геоцентрической широтой  $\psi_k$  и геоцентрической долготой  $\lambda_k$ ,  $k = 1(1)K$ .

Каждая пара смежных точек может быть соединена дугой большого круга, а граница ПРВО аппроксимируется множеством дуг (рис. 3).

Для оценивания средней продолжительности пролета  $j$ -го КА над ПРВО необходимо определить для каждой точки границ ПРВО ее наклонную проекцию без учета вращения Земли. Пусть такой точкой границы ПРВО является точка  $g$  (рис. 3) с долготой  $\lambda_g$ . Пусть соответствующей ей точкой пересечения дуги, аппроксимирующей границу ПРВО, и дуги восходящего витка траектории  $j$ -го КА является точка  $d$ . Пусть смежными с точкой  $d$  являются точки  $k$  и  $k+1$  с долготами  $\lambda_k$  и  $\lambda_{k+1}$  соответственно (рис. 3).

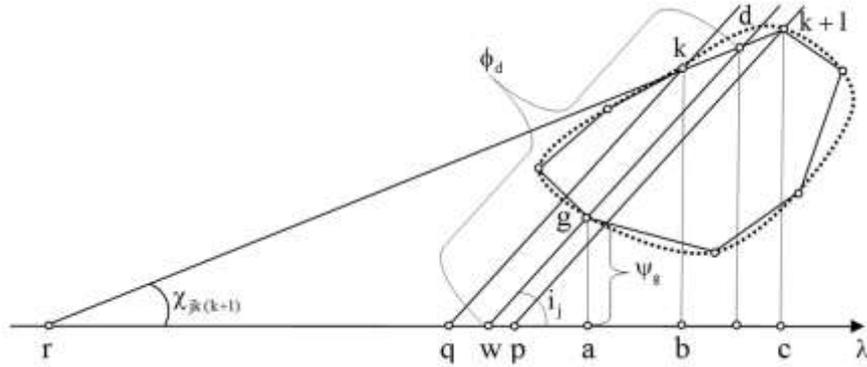


Рис. 3. Аппроксимация границ ПРВО (плоское изображение)

По указанным данным может быть определен угол между плоскостью дуги большого круга, проходящей через точки  $k$  и  $k+1$ , и плоскостью экватора Земли  $\chi_{jk(k+1)}$  для сферического треугольника  $rk b$  (рис. 3) по правилу Непера:

$$\operatorname{ctg} \chi_{jk(k+1)} = \frac{\sin \Delta \lambda_{jrb}}{\operatorname{tg} \psi_k}. \quad (30)$$

По этим же данным может быть определен угол  $\chi_{jk(k+1)}$  для сферического треугольника  $r(k+1)c$  (рис. 3) по тому же правилу:

$$\operatorname{ctg} \chi_{jk(k+1)} = \frac{\sin \Delta \lambda_{jrc}}{\operatorname{tg} \psi_{k+1}}. \quad (31)$$

Приравняв (30) к (31), можно получить формулу, связывающую дуги  $\Delta \lambda_{jrb}$  и  $\Delta \lambda_{jrc}$ :

$$\frac{\sin \Delta \lambda_{jrb}}{\operatorname{tg} \psi_k} = \frac{\sin \Delta \lambda_{jrc}}{\operatorname{tg} \psi_{k+1}}. \quad (32)$$

С другой стороны (рис. 3)

$$\Delta \lambda_{jrc} = \Delta \lambda_{jrb} + (\lambda_{(k+1)} - \lambda_k). \quad (33)$$

Долгота точки  $r$  может быть определена по формуле

$$\lambda_{jr} = \lambda_k - \Delta \lambda_{jrb}. \quad (34)$$

Совместное решение (32) и (33) позволяет определить  $\Delta \lambda_{jrb}$  по формуле

$$\operatorname{tg} \Delta \lambda_{jrb} = \frac{\sin(\lambda_{(k+1)} - \lambda_k)}{\operatorname{tg} \psi_{k+1} / \operatorname{tg} \psi_k - \cos(\lambda_{(k+1)} - \lambda_k)}. \quad (35)$$

Используя (30) можно оценить угол  $\chi_{jk(k+1)}$  в соответствии с зависимостью

$$\operatorname{ctg} \chi_{jk(k+1)} = \frac{\sin \Delta \lambda_{jrb}}{\operatorname{tg} \psi_k}. \quad (36)$$

Для определения дуги  $\Delta \lambda_{jaw}$  может быть использовано правило Непера:

$$\sin \Delta \lambda_{jaw} = \operatorname{ctg} i_j \cdot \operatorname{tg} \psi_g. \quad (37)$$

Это позволяет оценить долготу точки  $w$ :

$$\lambda_{jw} = \lambda_g - \Delta \lambda_{jaw}. \quad (38)$$

Рассчитанные по формуле (34) долгота  $\lambda_{jr}$  и по формуле (38) долгота  $\lambda_{jw}$  позволяют определить величину дуги  $\Delta \lambda_{jrw}$  (рис. 3):

$$\lambda_{jrw} = \lambda_{jw} - \lambda_{jr}. \quad (39)$$

Это, в свою очередь, позволяет определить величину дуги  $\varphi_d$  (рис. 3) по теореме косинусов [8]:

$$\cos \varphi_d = -\cos \chi_{jk(k+1)} \cdot \sin i_j + \sin \chi_{jk(k+1)} \cdot \cos i_j \cdot \cos \Delta \lambda_{jrw}. \quad (40)$$

По теореме синусов могут быть получены формулы для определения аргумента широты точки  $d$  (рис. 3):

$$\sin u_{jwd} = \frac{\sin \Delta \lambda_{jrw} \cdot \sin \chi_{jk(k+1)}}{\sin \varphi_d} \quad (41)$$

и аргумента широты точки  $g$  (рис. 3):

$$\cos u_{jwg} = \cos \Delta \lambda_{jaw} \cdot \cos \psi_g. \quad (42)$$

Эксцентрические аномалии этих точек определяются соответственно по формулам:  
– для точки  $d$

$$\operatorname{tg} \frac{E_{jwg}}{2} = \sqrt{\frac{1-e_j}{1+e_j}} \cdot \operatorname{tg} \frac{u_{jwd} - \omega_j}{2}; \quad (43)$$

– для точки  $g$

$$\operatorname{tg} \frac{E_{jgd}}{2} = \sqrt{\frac{1-e_j}{1+e_j}} \cdot \operatorname{tg} \frac{u_{jwg} - \omega_j}{2}. \quad (44)$$

Продолжительность движения  $j$ -го КА между указанными точками определяется по уравнению Кеплера в разностной форме:

$$\Delta t_{jgd} = \frac{T_j}{2} \cdot \left[ (E_{jwd} - E_{jwg}) - e_j \cdot (\sin E_{jwd} - \sin E_{jwg}) \right]. \quad (45)$$

Приведенные математические формулы позволяют провести оценку средней продолжительности пролета  $j$ -го КА над ПРВО при условии его пролета в границах наклонных проекций ПРВО по алгоритму, основными этапами которого являются:

- 1) определение по формулам для каждой  $k$ -й точки границ ПРВО долготы наклонной (без вращения Земли) проекции  $\lambda_{jk}$ ;
- 2) определение долгот правой и левой точек наклонных проекций ПРВО на экватор Земли;
- 3) выбор для каждой точки границ ПРВО  $g$  ближайших по долготам точек  $k$  и  $k+1$ , для которых выполняется условие  $\lambda_{j\min} < \lambda_{jk} \leq \lambda_{jg} \leq \lambda_{j(k+1)} < \lambda_{j\max}$ ,  $g \neq k \neq (k+1)$ ;
- 4) расчет для каждой точки границ ПРВО  $g$  продолжительности пролета над ПРВО  $\Delta t_{jgd}$  по формулам (30)–(45);
- 5) вычисление суммы времен пролетов над ПРВО по всем точкам  $g$ :

$$\Delta t_j = \sum_g \Delta t_{jgd}; \quad (46)$$

- 6) расчет средней продолжительности пролета:

$$\Delta t_{\text{ср}j} \approx \frac{1}{g \cdot \Delta t_j}. \quad (47)$$

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДА

Основными этапами метода оценивания вероятности пролета ОГ КА ДЗЗ над ПРВО являются:

- 1) задание геоцентрических координат точек границ ПРВО  $\{\psi_k, \lambda_k\}_K$ ,  $k = 1(1)K$ ;
- 2) задание интервала времени оценивания вероятности применения ОГ по ПРВО  $\Delta T$ ;
- 3) задание вектора баллистических и технических характеристик  $B_j = \langle m_j, a_j, e_j, i_j, \omega_j, \gamma_j, \alpha_j \rangle$ ,  $j = 1(1)n$ , для каждого  $j$ -го КА;
- 4) определение левых и правых границ наклонных проекций ПРВО по каждому  $j$ -му КА для каждой  $k$ -й точки границ ПРВО для восходящих и нисходящих витков траектории по формулам (9)–(28);
- 5) расчет угловых размеров наклонных проекций ПРВО для восходящих и нисходящих витков траектории для каждого  $j$ -го КА по формуле (29);
- 6) оценивание для каждого  $j$ -го КА вероятности  $P_{1j}$  по формуле (2);
- 7) вычисление периода обращения  $T_j$  каждого  $j$ -го КА;
- 8) определение средней продолжительности пролетов КА над ПРВО на восходящих и нисходящих витках траекторий по формулам (30)–(47);
- 9) оценивание для каждого  $j$ -го КА вероятности  $P_{2j}$  по формуле (3);
- 10) оценивание числа витков, выполняемых  $j$ -м КА по формуле (6);
- 11) оценивание вероятности пролета каждого  $j$ -го КА из ОГ над ПРВО на восходящем или нисходящем витке траектории хотя бы на одном витке на интервале времени  $\Delta T$  по формуле (7);
- 12) оценивание вероятности пролета  $P_n$  хотя бы одного КА из ОГ, состоящей из  $n$  КА, над ПРВО по формуле (8).

## ПРИМЕР ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПРОЛЕТА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ НАД ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТЬЮ

С целью апробации изложенного метода был рассмотрен пример, в котором ПРВО аппроксимировался четырехугольником с координатами вершин, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

**Координаты вершин четырехугольника**

Номер вершины	$\psi_k$ , град	$\lambda_k$ , град
1	46,71	30,54
2	50,33	30,54
3	50,33	36,27
4	46,71	36,27

Интервал времени оценивания вероятности применения ОГ по ПРВО  $\Delta T = 12, 24, 36, 48$  ч.

Проведенный анализ данных по существующим КА ДЗЗ позволяет сформировать модельные исходные данные по ОГ КА ДЗЗ для проведения вычислительных экспериментов (табл. 2).

Таблица 2

**Исходные данные**

$n_j$	$H_j$ , км	$e_j$	$i_j$ , град	$\omega_j$ , град	$\gamma_j$ , град	$\alpha_j$ , град
Модельный	700	0	90	0	2	10

Помимо данных, указанных в табл. 2, при проведении вычислительных экспериментов использовались долготы и моменты времен пролетов КА восходящих узлов орбит, которые распределены по равномерному закону на всем интервале  $\Delta T$ .

Результаты оценивания вероятностей потенциально результативных пролетов КА ДЗЗ заданной ОГ, состоящей из  $n$  КА, над заданной ПРВО в любой момент времени на заданных интервалах времени  $P_n$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты оценивания вероятностей потенциально результативных пролетов КА**

Количество КА	$\Delta T$ , ч			
	12	24	36	48
1	0,004	0,0080098	0,0117258	0,0159555
2	0,0085415	0,0159555	0,023314	0,0316564
3	0,0127849	0,0238375	0,0347664	0,0471068
4	0,0170101	0,0316564	0,0460845	0,0623107
5	0,0212172	0,0394127	0,0572699	0,077272
6	0,0254063	0,0471068	0,0683241	0,0919946
7	0,0295775	0,0547393	0,0792487	0,1064823
...	...	...	...	...
198	0,5722615	0,7965492	0,9032301	0,9586078
199	0,5740922	0,7981789	0,9043648	0,9592682
200	0,5759151	0,7997954	0,9054862	0,9599181

Соответствующие зависимости приведены на рис. 4.

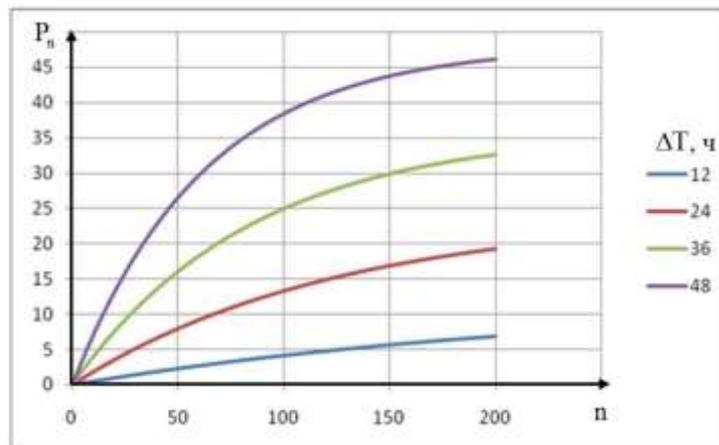


Рис. 4. Вероятности потенциально результативных пролетов ОГ КА над ПРВО

Анализ графиков показывает:

- 1) зависимость  $P_n$  от  $n$  имеет монотонно возрастающий характер;
- 2) с ростом числа КА вероятность  $P_n$  стремится к единице;
- 3) большим интервалам  $\Delta T$  для одних и тех же  $n$  соответствуют большие значения  $P_n$ .

Полученные вероятности позволяют оценивать среднюю продолжительность пролетов ОГ, состоящей из  $n$  КА, над ПРВО по формуле

$$\Delta t = \Delta T \cdot P_n.$$

В свою очередь, интервал времени, когда над ПРВО не пролетает ни один из  $n$  КА, может быть оценен зависимостью

$$\Delta t_H = \Delta T \cdot (1 - P_n).$$

Тренды зависимостей  $\Delta t$ ,  $\Delta t_H$  от  $n$  приведены на рис. 5.

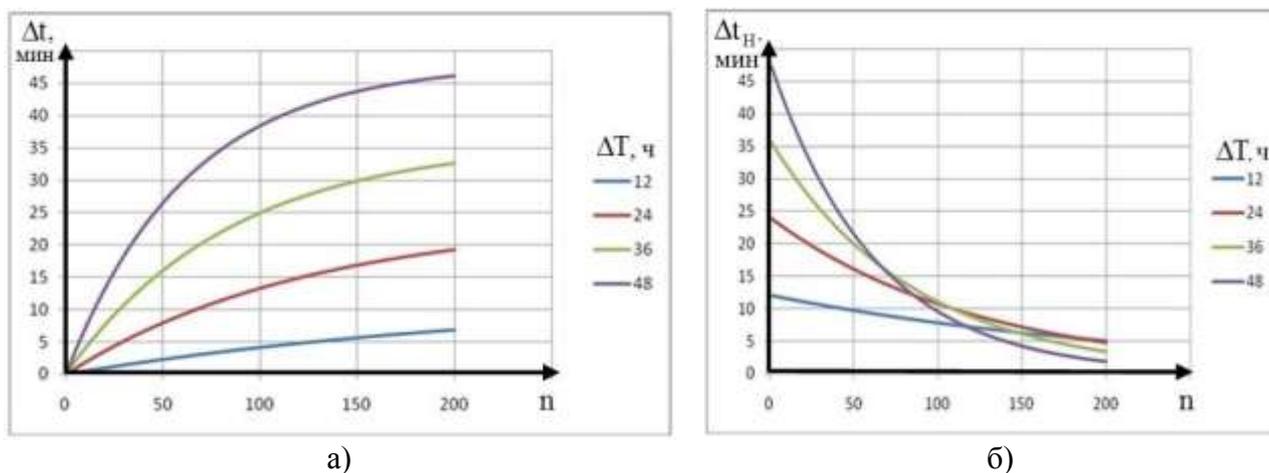


Рис.5. Зависимости времен пролёта ОГ КА над ПРВО

Анализ графика на рис. 5,а показывает:

- 1) зависимость  $\Delta t$  от  $n$  имеет монотонно возрастающий характер;
- 2) с ростом числа  $n$  значения  $\Delta t$  стремятся к соответствующим  $\Delta T$ ;
- 3) большим интервалам  $\Delta T$  для одних и тех же  $n$  соответствуют большие значения  $\Delta t$ .

Из анализа графика на рис. 5,б видно следующее:

- 1) зависимость  $\Delta t_n$  от  $n$  имеет монотонно убывающий характер;
- 2) скорость изменения  $\Delta t_n$  от  $n$  для больших интервалов  $\Delta T$  имеет большие значения;
- 3) с ростом  $n$  продолжительность времен, когда над ПРВО не пролетает ни один из  $n$  КА, стремится к нулю.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный метод позволяет получать результаты, которые могут быть использованы при проведении НИОКР при оценивании вероятности потенциально результативных пролетов КА заданной ОГ над заданной ПРВО в любой момент времени на заданных интервалах времени, продолжительности пролетов КА над ПРВО и интервалов времен, когда над ПРВО не пролетает ни один из КА.

Полученные оценки позволяют сделать вывод, что даже при больших значениях  $n$ , что соответствует складывающейся в околосреднем пространстве обстановке, формируемой КА ДЗЗ, используемыми всеми государствами, интервалы времен, когда над ПРВО не пролетает ни один КА, составляет для рассматриваемых  $\Delta T$  от 1,9 ч при  $\Delta T = 48$  ч до 5,0 ч при  $\Delta T = 12$  ч. Эти оценки можно рассматривать как предельно большие для заданной ПРВО и следует иметь в виду, что учет освещенности заданной области Солнцем понизит вероятности потенциально результативных пролетов КА.

## Список используемых источников

1. Минаков Е. П., Шафигуллин И. Ш., Зубачев А. М. Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения : учебник. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 244 с.
2. Аверкиев Н. Ф., Богачев С. А., Васильков С. А. Основы теории полета летательных аппаратов. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 242 с.
3. Минаков Е. П., Александров М. А., Мищеряков А. В. Алгоритм оценивания осредненного времени пролета орбитальной группировки космических аппаратов над районом эвентуального возникновения чрезвычайных ситуаций // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму. – 2023. – Вып. 183-184. – С. 34–38.
4. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем : учебник / Н. Ф. Аверкиев [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – 302 с.
5. Мамон П. А., Половников В. И. Приложение теорем сферической тригонометрии к решению практических задач : учеб. пособие. – Л. : ВИКИ, 1973. – Вып. 4. – 27 с.
6. Баринов К. Н., Мамон П. А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1975. – 232 с.
7. Беляков А. И. Графоаналитический метод исследования движения космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1973. – 147 с.
8. Минаков Е. П., Александров М. А., Мищеряков А. В. Модель расчета вероятности потенциально результативных пролетов космического аппарата над заданным районом возникновения чрезвычайной ситуации природного или техногенного характера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 11. – С. 152–157.

В. Н. Арсеньев,  
*доктор технических наук, профессор;*  
Е. В. Слатова

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫБОРА ЗАДАННОГО ОБЪЕКТА ИЗ МНОЖЕСТВА НАБЛЮДАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ ОБЗОРА ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Рассматривается задача обоснования требований к точностным характеристикам бортовых измерительных средств космического аппарата обзора околоземного космического пространства из условия обеспечения требуемой вероятности выбора заданного объекта из множества наблюдаемых. Получено ее аналитическое решение, на основе которого разработана методика для определения дисперсий погрешностей измерений частных признаков наблюдаемых объектов в различных областях космического пространства. Предложенная методика позволяет перераспределять требования к точностным характеристикам бортовых измерительных средств и, как следствие, сократить затраты на их модернизацию.

Приведен пример решения поставленной задачи.

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, космический аппарат, измерительные средства, условия наблюдения, точностные характеристики, формирование требований.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время для мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) активно используются наземные средства: автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях [1], объединенная система аэрокосмической обороны США и Канады NORAD и аналогичные системы других стран [2]. Разрабатываются перспективная Международная аэрокосмическая система глобального мониторинга (МАКСМ/IGMASS), в составе которой планируется использовать специализированные космические аппараты (КА), оснащенные оптико-электронными, радиолокационными и другими средствами наблюдения [3]. Имеются и другие проекты построения систем мониторинга космического базирования [4]. Они позволяют решать ряд важных задач, связанных с наблюдением за космическим мусором, отработкой технологий дистанционного обследования космических объектов, предотвращением опасных сближений, обслуживанием, ремонтом, модернизацией функционирующих КА и др. Для решения этих задач используется установленная на борту КА ОКП специальная аппаратура наблюдения (бортовые измерительные средства) за определенными областями космического пространства [5]. Она позволяет проводить измерения значений некоторых частных признаков, характеризующих наблюдаемые космические объекты (КО), попавшие в область наблюдения. На основе полученной информации осуществляется выбор из множества наблюдаемых объектов заданного или целевого космического объекта (ЦКО), частные признаки которого известны.

По очевидным причинам к качеству решения задачи выбора предъявляются жесткие требования: задается требуемое значение вероятности принятия правильного решения о ЦКО. Эта вероятность зависит от многих факторов: совокупностей частных признаков, значения которых могут быть измерены в различных условиях наблюдения; точности и количества измерений отдельных признаков; значений признаков ЦКО и др. В частности, можно найти такие значения характеристик точности бортовых измерительных средств, при которых будет обеспечена требуемая вероятность выбора заданного объекта из множества наблюдаемых космическим аппаратом обзора околоземного космического пространства во всех планируемых областях наблюдения.

Один из подходов к решению этой задачи, основанный на организации итерационного процесса для поиска условного экстремума выпуклой функции, предложен в работе [6]. Его основными недостатками являются необходимость выбора начальных значений переменных для обеспечения сходимости итерационного процесса и сложность исследования влияния весовых коэффициентов в экстремальной характеристике на качество получаемого решения. Предлагаемое в данной работе решение, на наш взгляд, позволяет устранить указанные недостатки и является дальнейшим развитием подхода, рассмотренного в статье [6].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается КА ОКП, предназначенный для наблюдения за космическими объектами, находящимися в некоторых заданных областях космического пространства. Число областей наблюдения равно  $Q$ . Каждый наблюдаемый объект характеризуется кортежем частных признаков  $\mathbf{X} = \langle X_i, i = \overline{1, n} \rangle$ , для измерения которых используются специальные измерительные средства (оптико-электронные, радиолокационные и др.), установленные на борту КА ОКП.

Полагается, что признаки  $X_i, i = \overline{1, n}$ , являются независимыми и распределены по нормальному закону с известными дисперсиями  $D_{X_{0i}}, i = \overline{1, n}$ , и нулевыми математическими ожиданиями погрешностей измерительных средств. Случайные величины для отличия от детерминированных обозначаются прописными буквами.

Состав характеризующих космические объекты признаков, значения которых удастся измерить в различных областях наблюдения, может быть различным. Это связано с отличием условий наблюдения, которые зависят от расстояния до наблюдаемых объектов, их положения относительно центра масс и их характеристик (формы, размеров, характеристик собственных и отраженных излучений и т. д.). Совокупность признаков, которые удастся измерить в  $q$ -й области наблюдения (или в  $q$ -х условиях наблюдения), представлена кортежем  $\mathbf{X}_q = \langle X_j, j \in n_q, j \leq n \rangle$ , где  $n_q$  – множество номеров признаков, измеряемых в  $q$ -х условиях,  $\mathbf{X}_q \subseteq \mathbf{X}, q = \overline{1, Q}$ .

Известны значения  $x_{Цqi}, q = \overline{1, Q}, i = \overline{1, n}$ , признаков, характеризующих целевые космические объекты, которые необходимо определить в каждой наблюдаемой области.

Задано требуемое значение  $P_{тр}$  вероятности выбора ЦКО.

Необходимо определить дисперсии  $D_{X_{тpi}}, i = \overline{1, n}$ , погрешностей измерительных средств КА ОКП, при которых обеспечивается требуемая вероятность решения задачи выбора во всех условиях наблюдения.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Предлагается следующая последовательность действий для решения этой задачи.

1. Рассматриваются  $Q$  различных условий наблюдения КА ОКП.

Полагается, что вероятность правильного выбора целевого космического объекта в  $q$ -х условиях ( $q = \overline{1, Q}$ ) наблюдения будет равна требуемой  $P_{тр}$ , если все частные признаки измерены один раз. При большем объеме измерительной информации вероятность будет больше  $P_{тр}$ , а при меньшем – меньше.

Для характеристики каждого наблюдаемого в  $q$ -й области ( $q = \overline{1, Q}$ ) космического объекта используется комбинированный признак в виде линейной функции, аргументами которой

являются его частные признаки. При предположении, что каждый частный признак измерен один раз, комбинированный признак определяется по формуле [7]:

$$W_q = \frac{w_{\Pi}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\Pi qi}^2}{D_{X_{0i}}}} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_{\Pi qi}}{D_{X_{0i}}} \right) X_i, \quad (1)$$

где  $w_{\Pi}$  – безразмерная величина, значение которой выбирается из удобства представления данных при расчетах.

Как показано в [7] коэффициенты функции (1) обеспечивают минимум дисперсии комбинированного признака  $W_q$  при условии, что правая часть этой функции при подстановке в нее вместо частных признаков соответствующих признаков ЦКО  $x_{\Pi qi}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , равна  $w_{\Pi}$ .

2. По известным значениям частных признаков ЦКО  $x_{\Pi qi}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , и дисперсиям погрешностей измерительных средств  $D_{X_{0i}}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , на основе формулы (1) определяются дисперсии комбинированных признаков:

$$D_{W_q} = D[W_q] = \frac{w_{\Pi}^2}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{x_{\Pi qi}^2}{D_{X_{0i}}} \right)^2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_{\Pi qi}}{D_{X_{0i}}} \right)^2 D_{X_{0i}} = \frac{w_{\Pi}^2}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\Pi qi}^2}{D_{X_{0i}}}}, \quad q = \overline{1, Q}. \quad (2)$$

В общем случае в различных областях наблюдения они будут различными из-за отличий частных признаков целевых космических объектов.

Поскольку в силу сделанного выше предположения полученная по формуле (2) дисперсия  $D_{W_q}$  обеспечивает требуемую вероятность  $P_{\text{тр}}$  правильного выбора целевого космического объекта в  $q$ -х условиях наблюдения, то обозначим ее  $D_{W_{\text{тр}q}}$ .

Из формулы (2) видно, что уменьшить дисперсию  $D_{W_q}$  и, как следствие, увеличить вероятность правильного выбора ЦКО можно путем уменьшения дисперсий погрешностей используемых на борту КА ОКП измерительных средств [6].

3. По заданной вероятности  $P_{\text{тр}}$  и полученным значениям  $D_{W_{\text{тр}q}}$  определяются граничные значения  $w_{qн}$  и  $w_{qв}$  для комбинированных признаков, обеспечивающие выполнение условия  $P(w_{qн} \leq W_q \leq w_{qв}) = P_{\text{тр}}$  во всех наблюдаемых областях ( $q = \overline{1, Q}$ ).

Для этого рассматривается величина, характеризующая отличие наблюдаемого объекта от целевого в  $q$ -й области наблюдения:

$$Z_q = \frac{(W_q - w_{\Pi})^2}{D_{W_{\text{тр}q}}}. \quad (3)$$

Поскольку частные признаки  $X_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , наблюдаемых космических объектов распределены по нормальному закону, то согласно формуле (1) и с учетом выбора коэффициентов линейной зависимости комбинированного признака от частных признаков случайная величина  $W_q$  также будет иметь нормальный закон распределения с математическим ожиданием  $w_{\Pi}$  и дисперсией  $D_{W_{\text{тр}q}}$ . В этом случае величина  $Z_q$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , будет распределена по закону хи-квадрат с функцией плотности распределения [8]:

$$\varphi_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} z^{-1/2} e^{-z/2}.$$

Если ввести обозначение  $\gamma = 1 - P_{\text{тр}}$ , то из уравнения

$$P(Z_q \geq z_\gamma) = \int_{z_\gamma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} z^{-1/2} e^{-z/2} dz = \gamma$$

можно найти критическую границу  $z_\gamma$ .

Тогда событие  $Z_q \leq z_\gamma$ , состоящее в том, что наблюдаемый объект может рассматриваться как целевой, эквивалентно событию

$$\frac{(W_q - w_{\text{Ц}})^2}{D_{W_{\text{ТР}q}}} \leq z_\gamma \text{ или } w_{\text{н}q} \leq W_q \leq w_{\text{в}q},$$

где  $w_{\text{н}q} = w_{\text{Ц}} - \sqrt{z_\gamma D_{W_{\text{ТР}q}}}$ ;  $w_{\text{в}q} = w_{\text{Ц}} + \sqrt{z_\gamma D_{W_{\text{ТР}q}}}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ .

Вероятность последнего события равна  $P_{\text{тр}}$ .

4. Вследствие отличия условий наблюдения совокупности частных признаков, которые удается измерить в процессе наблюдения за космическими объектами в различных областях космического пространства, могут быть различными. Поэтому для каждой области наблюдения рассматриваются наиболее характерные ситуации, когда число измеряемых частных признаков меньше  $n$ , и определяются требуемые значения дисперсий  $D_{X_{\text{ТР}qi}}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , погрешностей измерительных средств, при которых вероятность выбора ЦКО равна  $P_{\text{тр}}$ .

Если обозначить через  $N_{qi}$  число измерений  $i$ -го признака объекта, наблюдаемого в  $q$ -й области космического пространства, которое может принимать значения 1 или 0 в зависимости от того удалось или не удалось измерить значение этого признака ( $i = \overline{1, n}$ ), то формула для определения дисперсии комбинированного признака наблюдаемого объекта примет вид

$$D_{W_q} = \frac{w_{\text{Ц}}^2}{\sum_{i \in n_q} \frac{x_{\text{Ц}qi}^2}{D_{X_{0i}}}} = \frac{w_{\text{Ц}}^2}{\sum_{i=1}^n N_{qi} \frac{x_{\text{Ц}qi}^2}{D_{X_{0i}}}}, \quad q = \overline{1, Q}. \quad (4)$$

Очевидно, что  $D_{W_q} \geq D_{W_{\text{ТР}q}}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ . Поэтому в тех наблюдаемых КА ОКП областях космического пространства, где  $D_{W_q} > D_{W_{\text{ТР}q}}$ , вероятность правильного выбора целевого объекта будет меньше требуемой.

Пусть в некоторых  $q$ -х условиях наблюдения  $D_{W_q} > D_{W_{\text{ТР}q}}$ . В этом случае вероятность  $P(w_{\text{н}q} \leq W_q \leq w_{\text{в}q}) < P_{\text{тр}}$ .

Тогда для обеспечения требуемой вероятности правильного выбора целевого объекта дисперсии погрешностей измерительных средств КА ОКП  $D_{X_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , должны удовлетворять уравнению

$$\frac{w_{\text{Ц}}^2}{\sum_{i=1}^n N_{qi} \frac{x_{\text{Ц}qi}^2}{D_{X_i}}} = D_{W_{\text{ТР}q}}. \quad (5)$$

После введения обозначения  $R_{X_i} = \frac{1}{D_{X_i}}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , уравнение (5) примет вид

$$\frac{w_{\Pi}^2}{\sum_{i=1}^n N_{qi} x_{\Pi qi}^2 R_{X_i}} = D_{W_{TPq}}$$

или

$$\sum_{i=1}^n N_{qi} x_{\Pi qi}^2 R_{X_i} = \frac{w_{\Pi}^2}{D_{W_{TPq}}}. \quad (6)$$

Величины  $R_{X_i} = \frac{1}{D_{X_i}}$ ,  $i = \overline{1, n}$  также могут рассматриваться в качестве точностных характеристик бортовых измерительных средств. Назовем их обратными дисперсиями погрешностей измерительных средств.

Значения обратных дисперсий, удовлетворяющие уравнению (6), будем искать из условия минимума функции

$$J = \sum_{i=1}^n v_i (R_{X_i} - R_{X_{0i}})^2,$$

где  $R_{X_{0i}} = \frac{1}{D_{X_{0i}}}$ ;  $v_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , – весовые коэффициенты.

Для определения обратных дисперсий используется метод неопределенных множителей Лагранжа, в соответствии с которым рассматривается функция

$$L = \sum_{i=1}^n v_i (R_{X_i} - R_{X_{0i}})^2 + 2\lambda \left( \sum_{i=1}^n N_{qi} x_{\Pi qi}^2 R_{X_i} - \frac{w_{\Pi}^2}{D_{W_{TPq}}} \right),$$

где  $\lambda$  – неопределенный множитель.

Необходимые условия минимума  $L$  по переменным  $R_{X_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , и  $\lambda$  имеют вид:

$$\left. \frac{\partial L}{\partial R_{X_i}} \right|_{R_{X_i} = R_{X_{TPqi}}} = 2v_i (R_{X_{TPqi}} - R_{X_{0i}}) + 2\lambda N_{qi} x_{\Pi qi}^2 = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \lambda} \right|_{R_{X_i} = R_{X_{TPqi}}} = 2 \left( \sum_{i=1}^n N_{qi} x_{\Pi qi}^2 R_{X_{TPqi}} - \frac{w_{\Pi}^2}{D_{W_{TPq}}} \right) = 0.$$

Из этих условий получается система уравнений:

$$v_i (R_{X_{TPqi}} - R_{X_{0i}}) + \lambda N_{qi} x_{\Pi qi}^2 = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$\sum_{i=1}^n N_{qi} x_{\Pi qi}^2 R_{X_{TPqi}} - \frac{w_{\Pi}^2}{D_{W_{TPq}}} = 0.$$

Из первого уравнения определяются значения обратных дисперсий:

$$R_{X_{TP\,qi}} = R_{X_{0i}} - \lambda \frac{N_{qi} x_{\Pi qi}^2}{v_i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Подставив их во второе уравнение, получим формулу

$$\sum_{i=1}^n N_{qi} x_{\Pi qi}^2 R_{X_{0i}} - \lambda \sum_{i=1}^n \frac{N_{qi}^2 x_{\Pi qi}^4}{v_i} - \frac{w_{\Pi}^2}{D_{W_{TP\,q}}} = 0,$$

из которой найдем множитель Лагранжа

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n N_{qi} x_{\Pi qi}^2 R_{X_{0i}} - \frac{w_{\Pi}^2}{D_{W_{TP\,q}}}}{\sum_{i=1}^n \frac{N_{qi}^2 x_{\Pi qi}^4}{v_i}}.$$

Его подстановка в правую часть выражения (7) позволяет получить формулу для определения требуемых значений обратных дисперсий:

$$R_{X_{TP\,qi}} = R_{X_{0i}} - \frac{N_{qi} x_{\Pi qi}^2}{v_i \sum_{i=1}^n \frac{N_{qi}^2 x_{\Pi qi}^4}{v_i}} \left( \sum_{i=1}^n N_{qi} x_{\Pi qi}^2 R_{X_{0i}} - \frac{w_{\Pi}^2}{D_{W_{TP\,q}}} \right), \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Нетрудно проверить, что подстановка  $R_{X_{TP\,qi}}, i = \overline{1, n}$ , в уравнение (6) обращает его в тождество, а также, что при  $i \notin n_q$  требуемое значение  $R_{X_{TP\,qi}} = R_{X_{0i}}$ .

Тогда значения дисперсий погрешностей измерительных средств, при которых обеспечивается требуемая вероятность  $P_{TP}$  в  $q$ -х условиях наблюдения, будут определяться по формуле

$$D_{X_{TP\,qi}} = \frac{1}{R_{X_{TP\,qi}}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Из формул (8) и (9) видно, что изменяя весовые коэффициенты  $v_i, i = \overline{1, n}$ , можно перераспределять требования к точностным характеристикам измерительных средств. В частности, увеличение одного из весовых коэффициентов  $v_k$  приводит к уменьшению второго слагаемого в правой части формулы (9) и приближению требуемого значения  $R_{X_{TP\,qk}}$  к  $R_{X_{0k}}$ .

5. После определения требуемых значений дисперсий погрешностей измерений частных признаков  $D_{X_{TP\,qi}}, q = \overline{1, Q}, i = \overline{1, n}$ , для всех  $Q$  условий наблюдения из полученных множеств выбираются минимальные значения дисперсий для каждого признака:

$$D_{X_{TP\,i}} = \min\{D_{X_{TP\,qi}}, q = \overline{1, Q}\}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

### ПРИМЕР, ДЕМОНСТРИРУЮЩИЙ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Гипотетический КА ОКП предназначен для наблюдения за космическими объектами в четырех различных областях космического пространства ( $Q = 4$ ). Установленные на нем измерительные средства позволяют измерить значения четырех безразмерных частных признаков, характеризующих наблюдаемые объекты ( $n = 4$ ).

Известны дисперсии погрешностей измерительных средств  $D_{X_{01}} = 2$ ,  $D_{X_{02}} = 1.5$ ,  $D_{X_{03}} = 1$ ,  $D_{X_{04}} = 0.5$ , а также значения частных признаков целевых космических объектов:

- в первой наблюдаемой области  $x_{11} = 40$ ,  $x_{12} = 30$ ,  $x_{13} = 20$ ,  $x_{14} = 15$ ;
- во второй наблюдаемой области  $x_{21} = 35$ ,  $x_{22} = 30$ ,  $x_{23} = 20$ ,  $x_{24} = 20$ ;
- в третьей наблюдаемой области  $x_{31} = 45$ ,  $x_{32} = 25$ ,  $x_{33} = 20$ ,  $x_{34} = 15$ ;
- в четвертой наблюдаемой области  $x_{41} = 40$ ,  $x_{42} = 35$ ,  $x_{43} = 25$ ,  $x_{44} = 10$ .

Задано требуемое значение вероятности правильного выбора ЦКО  $P_{\text{тр}} = 0.95$ .

Полагается, что  $w_{11} = 20$ .

На основе этих данных по формуле (2) получены требуемые значения дисперсий комбинированных признаков:

$$D_{W_{\text{TP1}}} = 0.1778, D_{W_{\text{TP2}}} = 0.1658, D_{W_{\text{TP3}}} = 0.1755, D_{W_{\text{TP4}}} = 0.1638$$

и при  $z_{\gamma} = z_{0.05} = 3.8415$  определены граничные значения ( $w_{1н} = 19.1736$ ,  $w_{1в} = 20.8264$ ), ( $w_{2н} = 19.2019$ ,  $w_{2в} = 20.7981$ ), ( $w_{3н} = 19.1789$ ,  $w_{3в} = 20.8211$ ), ( $w_{4н} = 19.2067$ ,  $w_{4в} = 20.7933$ ) для комбинированных признаков во всех наблюдаемых областях, при которых выполняются условия  $P(w_{qн} \leq W_q \leq w_{qв}) = 0.95$ ,  $q = \overline{1, 4}$ .

Пусть проведенный анализ условий наблюдения КА ОКП за КО показал, что в первых условиях удастся измерить только 2-й, 3-й и 4-й частные признаки наблюдаемых объектов, во вторых условиях – 1-й, 3-й и 4-й, в третьих условиях – 1-й, 2-й и 4-й, в четвертых условиях – 1-й, 2-й и 3-й признаки. В этом случае дисперсии комбинированных признаков объектов, расположенных в наблюдаемых областях космического пространства, определяются по формуле (4):

$$D_{W_1} = 0.2759, D_{W_2} = 0.2207, D_{W_3} = 0.2129, D_{W_4} = 0.1784.$$

Отсюда видно, что  $D_{W_q} > D_{W_{\text{TP}_q}}$ ,  $q = \overline{1, 4}$ , следовательно, вероятности правильного выбора целевых космических объектов (вероятности попадания комбинированных признаков наблюдаемых объектов в полученные выше интервалы) в случаях, когда не все частные признаки могут быть измерены, будут меньше требуемой  $P_{\text{тр}} = 0.95$ , причем  $P_1 = 0.8844$ ,  $P_2 = 0.9107$ ,  $P_3 = 0.9249$ ,  $P_4 = 0.9396$ .

В этом случае для обеспечения требуемой вероятности решения задачи выбора по формулам (8) и (9) определяются требуемые значения дисперсий погрешностей измерительных средств КА ОКП для всех рассматриваемых условий наблюдения. Выбрав весовые коэффициенты  $v_i = D_{X_{0i}}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , получим:

$$\begin{aligned} D_{X_{\text{TP11}}} &= 2, D_{X_{\text{TP12}}} = 0.7901, D_{X_{\text{TP13}}} = 0.7146, D_{X_{\text{TP14}}} = 0.4083; \\ D_{X_{\text{TP21}}} &= 1.2520, D_{X_{\text{TP22}}} = 1.5, D_{X_{\text{TP23}}} = 0.8368, D_{X_{\text{TP24}}} = 0.4184; \\ D_{X_{\text{TP31}}} &= 1.4972, D_{X_{\text{TP32}}} = 1.3591, D_{X_{\text{TP33}}} = 1, D_{X_{\text{TP34}}} = 0.4820; \\ D_{X_{\text{TP41}}} &= 1.7860, D_{X_{\text{TP42}}} = 1.3740, D_{X_{\text{TP43}}} = 0.9553, D_{X_{\text{TP44}}} = 0.5. \end{aligned}$$

По ним в соответствии с формулой (10) находятся дисперсии погрешностей измерительных средств, обеспечивающие требуемую вероятность правильного выбора целевых космических объектов во всех условиях наблюдения при отсутствии информации об одном частном признаке наблюдаемых объектов:

$$D_{X_{TP1}} = \min\{2, 1.2520, 1.4972, 1.7860\} = 1.2520;$$

$$D_{X_{TP2}} = \min\{0.7901, 1.5, 1.3591, 1.3740\} = 0.7901;$$

$$D_{X_{TP3}} = \min\{0.7146, 0.8368, 1, 0.9553\} = 0.7146;$$

$$D_{X_{TP4}} = \min\{0.4083, 0.4184, 0.4820, 0.5\} = 0.4083.$$

Если в каких-то условиях наблюдения удалось измерить все четыре частных признака наблюдаемых объектов, то при полученных значениях дисперсий погрешностей измерительных средств КА ОКП вероятность выбора целевого объекта будет больше 0.95.

Так, в первых условиях наблюдения она будет равна 0.9859, во вторых условиях – 0.9842, в третьих условиях – 0.9851 и в четвертых условиях наблюдения – 0.9873.

Как уже было отмечено выше, варьируя весовыми коэффициентами  $v_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , можно изменять требования к точностным характеристикам измерительных средств.

Например, при  $v_i = 1$ ,  $i = \overline{1, n}$ , в первых условиях наблюдения получают следующие требуемые значения дисперсий погрешностей измерительных средств:

$$D_{X_{TP11}} = 2, D_{X_{TP12}} = 0.7288, D_{X_{TP13}} = 0.7613, D_{X_{TP14}} = 0.4595.$$

Сравнив их с полученными при  $v_i = D_{X_{oi}}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , можно заметить, что требование к точности измерения 2-го признака повысилось, а требования к точности измерения 3-го и 4-го, наоборот, понизились.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено аналитическое решение задачи обоснования требований к точностным характеристикам измерительных средств КА ОКП и на его основе разработана методика, позволяющая определить дисперсии погрешностей измерений частных признаков наблюдаемых объектов в различных областях космического пространства, обеспечивающие требуемую вероятность выбора целевых объектов из множеств наблюдаемых. При этом рассматриваются наиболее характерные условия наблюдения, в которых число измеряемых частных признаков наблюдаемых объектов может быть различным.

Предложенный подход позволяет перераспределять требования к погрешностям бортовых измерительных средств с целью уменьшения затрат на улучшение их точностных характеристик. На его основе можно сформировать практические рекомендации по рациональному составу и количеству измерительных средств КА ОКП.

Из формулы (4) видно, что в процессе эксплуатации КА ОКП оперативно повысить вероятность правильного выбора целевого объекта можно путем увеличения числа измерений отдельных признаков. При этом целесообразно чаще (если это возможно) измерять те частные признаки, для которых больше отношение  $x_{Цqi}^2 / D_{X_{oi}}$ .

## Список используемых источников

1. Шустов Б. М. О роли науки в изучении и парировании космических угроз // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, № 8. – С. 777–799. – URL: <http://doi.org/10.31857/S0869-5873898777-000> (дата обращения: 20.12.23).

2. *Зберя В. А.* Канада и США: у истоков военно-политического сотрудничества // Россия и Америка в XXI веке. – 2020. – Вып. 4. – С. 15. – URL: <https://rusus.jes.su/s207054760013330-0-1/> (дата обращения: 20.12.23). – DOI: 10.18254/S207054760013330-0.
3. *Menshikov V. A., Perminov A. N., Urlichich Y. M.* The Conception of the International Global Monitoring Aerospace System (IGMASS) // Global Aerospace Monitoring and Disaster Management. – Springer, Vienna. 2012. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0810-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0810-9_4) (дата обращения: 20.12.23).
4. *Малетин А. Н., Глуценко А. А., Мишина О. А.* Исследование возможностей современных космических средств по мониторингу объектов в околоземном космическом пространстве // Труды МАИ. – 2022. – № 127. – DOI: 10.34759/trd-2022-127-21.
5. *Кириченко Д. В., Багров А. В.* Оперативное выявление космогенных угроз с помощью орбитальных средств контроля космического пространства // Радиопромышленность. – 2014. – № 1. – С. 174–184.
6. *Арсеньев В. Н., Ключкин А. К.* Формирование требований к точностным характеристикам измерительных средств системы селекции специального комплекса космического аппарата обзора околоземного космического пространства // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 169–177.
7. *Арсеньев В. Н., Ядренкин А. А.* Выбор заданного космического объекта из множества наблюдаемых специализированным космическим аппаратом // Информационно-управляющие системы. – 2022. – № 2 (117). – С. 11–19. – DOI:10.31799/1684-8853-2022-2-11-19.
8. *Пугачев В. С.* Теория вероятностей и математическая статистика. – 2-е изд., исправл. и доп. – М. : Физматлит, 2002. – 496 с.

А. С. Букирёв<sup>1</sup>,

С. В. Ипполитов<sup>2</sup>,

*кандидат технических наук, доцент;*

А. Ю. Савченко<sup>3</sup>,

*кандидат технических наук, доцент;*

М. И. Яцечко<sup>4</sup>,

*кандидат технических наук*

<sup>1-4</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил

«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж.

## **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННО-ПРЕОБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

В статье приведен анализ существующих методов и средств контроля, применяемых на борту современных воздушных судов. Рассмотрена проблема низкой глубины поиска места отказа бортовыми автоматизированными системами контроля. Обоснована возможность увеличения глубины поиска места отказа за счет применения методов машинного обучения, позволяющих автоматически создавать трудноформализуемые диагностические модели. Разработаны и исследованы функциональная модель, а также алгоритм диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования воздушных судов с целью определения путей реализации предложенного подхода. При этом ожидается повышение коэффициента готовности воздушных судов, интенсивности восстановления исправного состояния, и, как следствие, уровня надежности воздушных судов.

Ключевые слова: функциональная модель, техническое диагностирование, алгоритм, информационно-преобразующие элементы, воздушное судно, машинное обучение, искусственный интеллект.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для обособления в отдельную категорию перечня элементов бортового оборудования (БО), входящих в состав комплекса бортового оборудования (КБО) воздушного судна (ВС), и выполняющих свои функции путем получения, обработки (преобразования) и передачи информации через шину мультиплексного канала информационного обмена магистрального интерфейса системы электронных модулей, введем понятие информационно-преобразующие элементы (ИПЭ).

Глубина поиска места отказа современными бортовыми автоматизированными системами контроля (БАСК) достигает конструктивно-съёмных единиц не для всех информационно-преобразующих элементов бортового оборудования, что в случае их отказа требует дополнительных контрольных операций и влечет за собой увеличение времени восстановления воздушного судна (ВС), оказывающего отрицательное влияние на уровень его надежности. С целью сокращения времени восстановления необходимо обеспечить автоматическое определение отказа в максимально большом количестве конструктивно-съёмных единиц элементов бортового оборудования.

Современные методы создания систем контроля основаны на формализованном описании разработчиком различных технических состояний объектов контроля – составлении диагностических моделей. В случае возникновения проблем с возможностью формального описания данных моделей или их адекватностью соответствующие объекты контролем не охватываются, и глубина поиска места отказа уменьшается. В целом, актуальность работы обусловлена существующим противоречием между низкой глубиной поиска места отказа и необходимостью минимизации среднего времени восстановления ВС.

Большое разнообразие БО ВС по способам применения и условиям эксплуатации, а также значительные расхождения во взглядах на решение задач исследования диагностических моделей привели к тому, что универсальных способов для данных целей до настоящего времени не предложено. В связи с этим разрабатываемые модели во многих практических случаях носят частный характер, т. е. для каждого проектируемого объекта создаются заново [1]. Для автоматического составления диагностических моделей любой сложности целесообразно использовать единый аппарат – методы машинного обучения.

Машинное обучение – это группа методов искусственного интеллекта, которые отличаются от прямого решения задачи и основаны на обучении путем применения решений аналогичных задач. Машинное обучение также включает разработку алгоритмов и статистических моделей для контролируемых объектов, которые формируются без явных инструкций для их описания [1].

В настоящее время существует объективное противоречие в практике между повышением глубины поиска места отказа и минимизацией времени поиска его места и причин. На сегодняшний день встроенные средства диагностирования элементов бортового оборудования имеют широкий спектр алгоритмов работы, построенных на различных методах контроля с применением диагностических моделей. При этом для отдельного перечня элементов бортового оборудования диагностические модели не могут быть построены классическими методами. Данные обстоятельства препятствуют повышению глубины поиска места отказа встроенными средствами диагностирования.

Выявлено противоречие в науке, заключающееся в том, что существующие алгоритмы и методики диагностирования различных элементов бортового оборудования (в том числе с трудноформализуемыми признаками, характеризующими техническое состояние), обусловлены отсутствием унифицированной методической и алгоритмической основой построения и применения соответствующих диагностических моделей.

Таким образом, целью исследования является повышение уровня надежности, достигаемого сокращением среднего времени восстановления за счет применения методов машинного обучения для диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования ВС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить научную задачу, заключающуюся в разработке функциональной модели информационно-преобразующих элементов бортового оборудования ВС, которая в отличие от известных, будет учитывать в комплексе процедуры сбора и обработки формируемой в процессе их функционирования информации, позволяющей определить их техническое состояние.

Проведенный анализ существующих методов и средств контроля, применяемых на борту современных ВС [2–5], позволил определить, что в основе данных систем контроля применяются диагностические модели, представляющие собой формализованное описание различных технических состояний объектов контроля на основе метода логических функций. При этом создание данных моделей является достаточно сложной интеллектуальной задачей и, главное, не всегда имеющей решение, что является причиной низкой глубины поиска места отказа. Бортовое оборудование, не имеющее встроенную систему контроля, проверяется системами контроля в режиме проверки исправности (целостности) соответствующих линий связи между устройствами, а также в режиме проверки правильности структуры передаваемого кода при информационном обмене по МКИО на наличие ошибок бифазного кодирования. Такой алгоритм подразумевает контроль правильности кодирования сигнала, без учета его информационной составляющей, что обеспечивает глубину поиска места отказа до системы, и не позволяет определить отказы конкретных элементов данных систем.

## АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА МАГИСТРАЛЬНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

С целью разработки функциональной модели диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования ВС на основе машинного обучения, необходимо рассмотреть архитектуру построения процесса информационного обмена в рамках магистрального последовательного интерфейса системы электронных модулей, которую регламентирует ГОСТ Р 52070-2003 [6]. Интерфейс функционирует асинхронно, в режиме «команда–ответ». Структурная схема технических средств интерфейса в ее основной (базовой) конфигурации, согласно [6], приведена на рис. 1.

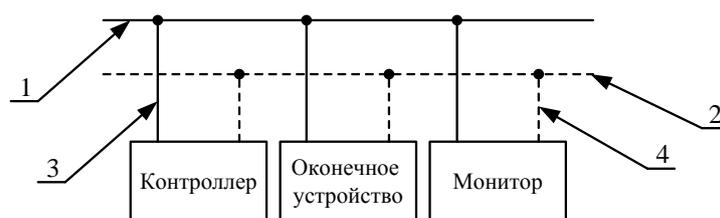


Рис. 1. Структурная схема технических средств интерфейса:  
1 – магистральная шина; 2 – резервная магистральная шина; 3 – ответитель;  
4 – резервный ответитель

Каждое слово данных, участвующее в информационном обмене через последовательный магистральный интерфейс системы электронных модулей, начинается с сигнала словной синхронизации (синхросигнала), а также имеет 17 информационных разрядов, включая разряд контроля четности. При передаче информации данные кодируются с применением кодово-импульсной модуляции «Манчестер II».

Кодировка «Манчестер II» – это метод кодирования данных, при котором каждый бит информации передается в виде двух последовательных импульсов на передающей стороне. Если уровень импульса меняется в первой половине такта, то передается бит «1», а если во второй – то передается бит «0». Таким образом, каждый бит занимает на передачу два временных слота. Декодер «Манчестер II» работает путем обратного преобразования этих двух последовательных импульсов в исходную форму битовой последовательности. Это происходит путем сравнения уровней импульсов в каждом временном слоте и определения, какой бит передается в данном слоте. Затем декодер объединяет полученные биты в исходную битовую последовательность. Декодеры «Манчестер II» широко используются в различных приложениях, таких как протоколы информационного обмена, системы связи, автоматизация процессов, встроенные системы. Отсутствие постоянной составляющей при передаче длинной последовательности единиц или нулей является важным преимуществом манчестерского кода, так как это позволяет легко выполнять гальваническую развязку сигналов, например, с помощью импульсных и согласующих трансформаторов.

## РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ПРЕОБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Проведенный анализ принципов построения и организации процесса информационного обмена в рамках магистрального последовательного интерфейса системы электронных модулей позволяет перейти к исследованию разработанной функциональной модели диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования ВС на основе машинного обучения (рис. 2).

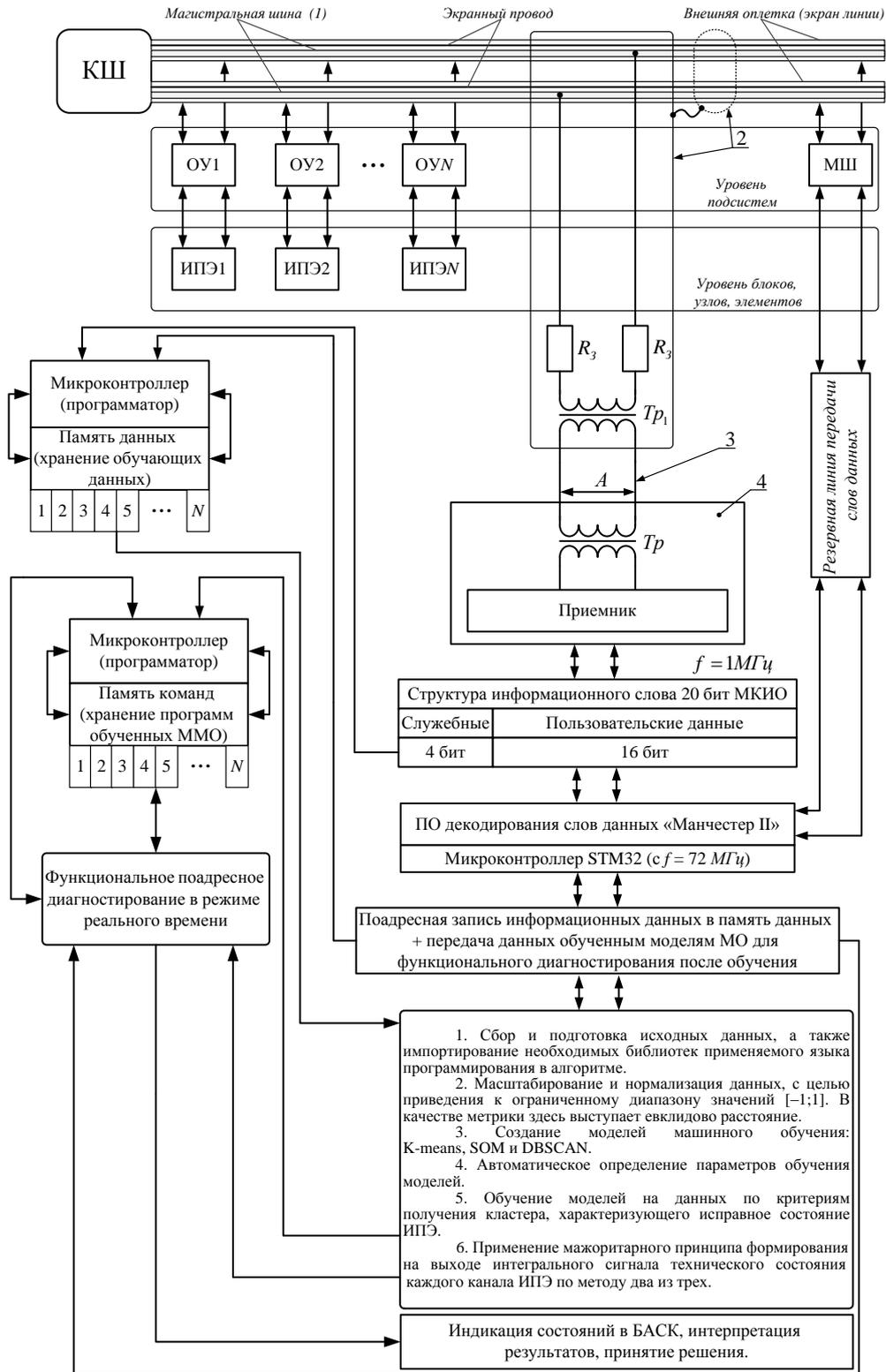


Рис. 2. Функциональная модель диагностирования информационно-преобразующих элементов воздушного судна на основе машинного обучения:

КШ – контроллер шины; ОУ – оконечное устройство; МШ – монитор шины; ИПЭ – информационно-преобразующий элемент; 1 – магистральная шина; 2 – экран; 3 – шлейф; 4 – устройство интерфейса;  $Tr$  – трансформатор гальванической развязки;  $Tr_1$  – согласующий трансформатор;  $R_3$  – защитный резистор; ПО – программное обеспечение; ММО – модели машинного обучения; STM32 – микроконтроллер

В предложенном способе диагностирования реализуется принцип построения трудноформализуемых диагностических моделей информационно-преобразующих элементов бортового оборудования ВС.

В модуле диагностики осуществляется обучение, которое включает формирование кластеров, определяющих исправное техническое состояние каждого информационно-преобразующего элемента. Кластеризация позволит сформировать информационную диагностическую модель в виде ограниченного геометрического пространства признаков в выбранной метрике, с целью последующего анализа поведения данных, а также поиска в них аномалий. Кластер формируется на основе координат входного и выходного сигналов информационно-преобразующего элемента, что автоматически позволяет создать дискретную (по форме зависимости от времени) информационную (по методу представления) диагностическую модель. При рассмотрении модели поведения объекта в виде информационной диагностической модели последний рассматривается как преобразователь информации или представляет информационную оценку изменений, происходящих в состоянии объекта диагностирования. Такой тип диагностических моделей является наиболее универсальным, поскольку не зависит от принципа построения и действия объекта, а характеризует потоки информации о его состоянии или потоки информации, циркулирующие в нем. Также происходит фиксация созданных диагностических моделей эталонного функционирования информационно-преобразующих элементов в базе данных. Данные контроля реального времени относятся к одному из сформированных кластеров состояний, включая предотказное состояние и состояние отказа. Кроме того, осуществляется распознавание образа и распределение текущей информации по кластерам.

Функциональная модель, изображенная на рис. 2, представляет собой последовательный процесс взаимодействия модуля диагностики через магистральную шину МКИО с оконечными устройствами и информационно-преобразующими элементами, входящими в их состав.

Процесс работы функциональной модели, представленной на рис. 2, реализуется следующим способом. Модуль диагностики подключается как унифицированное устройство интерфейса к основной и резервной магистральным шинам 1, которые выполнены из кабеля, содержащего витую экранированную пару проводников в защитной оболочке, через ответвитель, представляющий собой шлейф 3, состоящий из двух защитных резисторов  $R_3$ , экрана 2, а также согласующего трансформатора  $Tr_1$  и трансформатора гальванической развязки  $Tr$ , предназначенных для обеспечения импульсной непрерывной передачи информации электромагнитным бесконтактным способом.

Слова данных (СД) от ОУ, необходимые для обучения модуля диагностики, через микроконтроллер, запрограммированный на декодирование СД «Манчестер II», поадресно записываются в память данных в течение работы бортового оборудования на этапе испытаний. После создания базы обучающих информационных данных в модуле диагностики выполняются следующие команды: прием адресных данных от ОУ из памяти данных; инициализация команды создания алгоритма машинного обучения для конкретного адреса, содержащего в себе данные; формирование алгоритмом кластера, характеризующего исправное состояние каждого адреса и подадреса данных, а также сохранение программ обученных алгоритмов в память команд модуля диагностики.

Для реализации способа диагностирования информационно-преобразующего элемента с одним входом и одним выходом используются двухэлементные векторы входных и выходных данных, которые формируют кластеры различных технических состояний. Пример процесса кластеризации информационных данных представлен на рис. 3. Сформированные кластеры состояний затем используются для индикации технического состояния путем построения и анализа градиентов сдвига текущего распределения контрольных точек в сторону границы кластера. Дальнейший процесс диагностирования описывается работой вышеупомянутой функциональной модели.

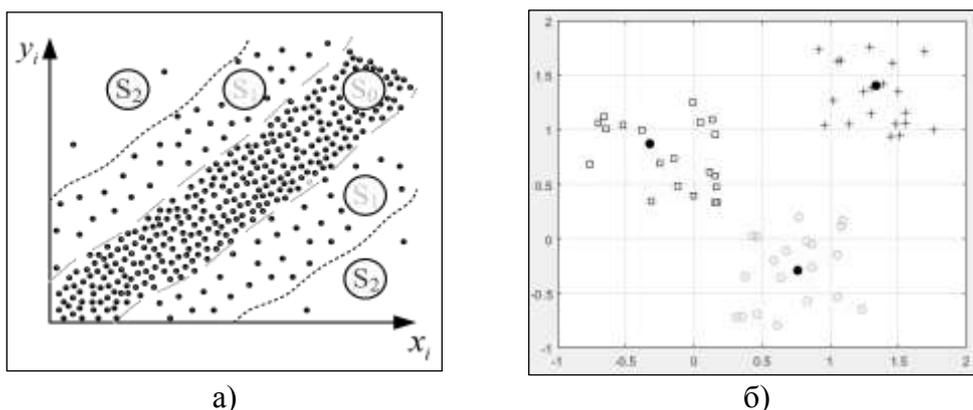


Рис. 3. Процесс кластеризации информационных данных:

а – сформированные кластеры состояний; б – центры группирования классов данных

Разработанная функциональная модель позволила обосновать структуру алгоритма диагностирования ИПЭ БО. При диагностировании через МКИО использовался принцип формирования кластера для каждого адреса данных, участвующих в информационном обмене через МКИО, который описывает исправное состояние каждого ИПЭ, входящего в состав ОУ с собственным уникальным адресом и подадресом.

Согласно [8], на этапе испытаний бортового оборудования осуществляется поадресный сбор обучающих информационных данных от объектов КБО, участвующих в информационном обмене, которые полностью описывают исправное состояние каждого элемента МКИО. При этом в модуле диагностики [8] происходит обучение, которое предполагает формирование кластеров, определяющих исправное техническое состояние каждого ИПЭ. В дальнейшем в модуле диагностики осуществляется фиксация информационных данных, которая предполагает создание базы данных, а также отнесение данных контроля к одному из сформированных кластеров состояний. Последним этапом функционирования модуля диагностики является распознавание принадлежности данных конкретному кластеру в реальном времени с индикацией технических состояний в штатную бортовую автоматизированную систему контроля (БАСК).

Одним из методов, позволяющих эффективно решать задачи кластеризации, является метод  $K$ -средних ( $K$ -means).  $K$ -means – это алгоритм кластеризации, который используется для группирования данных в  $K$  кластеров. Однако, когда  $K = 1$ , алгоритм может быть эффективно использован для поиска аномалий в данных, т. е. данных, соответствующих неисправному состоянию объекта контроля. Для этого алгоритм  $K$ -means с одним кластером применяется к данным, и центр кластера вычисляется как среднее значение всех точек данных. Затем расстояние между каждой точкой данных и центром кластера вычисляется, и точки данных, которые находятся на расстоянии больше определенного порога от центра кластера, считаются аномалиями.

Рассмотрим работу алгоритма  $K$ -means.

**Шаг 1.** Инициализация. Задаем количество кластеров  $K$  и выбираем случайным образом  $K$  точек из набора данных в качестве центров кластеров.

**Шаг 2.** Присваивание. Каждый объект в наборе данных присваивается к ближайшему центру кластера на основе расстояния между объектом и центром кластера.

**Шаг 3.** Обновление. Для каждого кластера вычисляется новый центр, который является средним значением всех объектов, принадлежащих кластеру.

**Шаг 4.** Повторение. Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока центры кластеров не стабилизируются и не перестанут изменяться.

*Шаг 5.* Результат. Когда центры кластеров не изменяются, кластеризация считается завершенной, и каждый объект принадлежит одному из  $K$  кластеров.

Этот метод основан на предположении о том, что аномальные точки будут находиться далеко от остальных точек данных и, следовательно, будут удалены от центра кластера. Недостатком данного метода является то, что не гарантируется достижение глобального минимума суммарного квадратичного отклонения  $J$ , а только одного из локальных минимумов; результат зависит от начального выбора центров кластеров  $\{X_k^{(0)}\}$ , их оптимальный выбор неизвестен; число кластеров  $K$  надо знать заранее.

Для определения порога расстояния можно использовать статистические методы. Например, правило «трех сигм» определяет границу, выше которой находятся точки данных с высокой вероятностью быть аномалиями. Алгоритм  $K$ -means с одним кластером, решающим задачу идентификации принадлежности каждой точки данных, соответствующих входу и выходу ИПЭ, представлен на рис. 4.

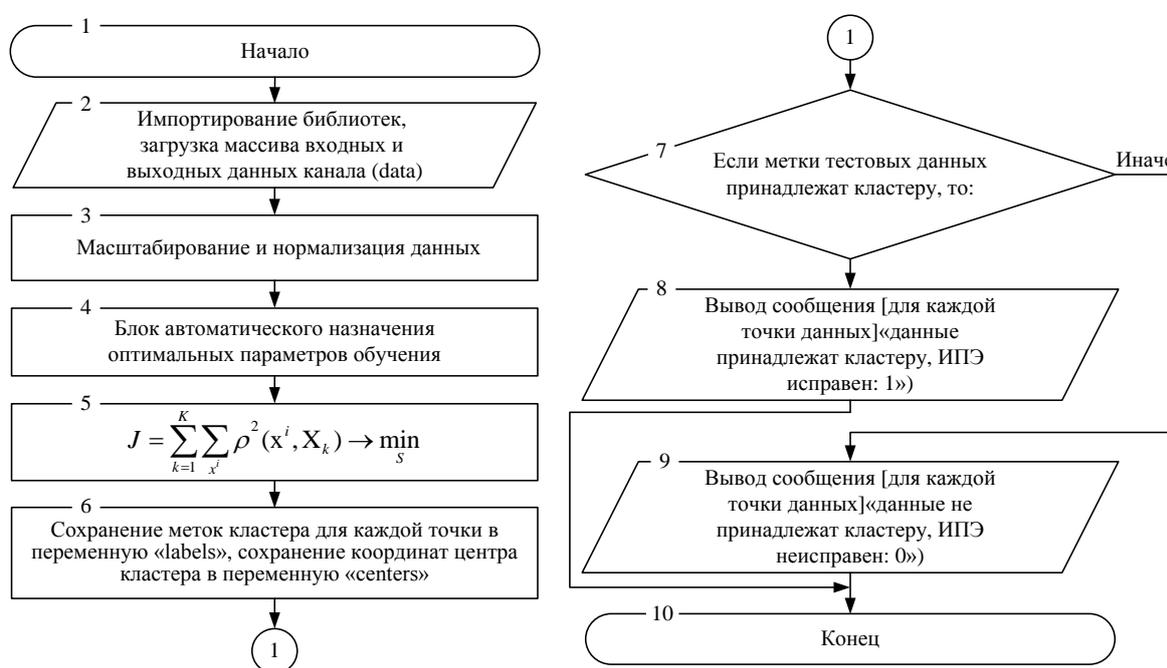


Рис. 4. Алгоритм кластеризации  $K$ -means для диагностирования

Основная идея алгоритма заключается в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек кластера от центра этого кластера, т. е.

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{x^i} \rho^2(x^i, X_k) \rightarrow \min_S, \quad (1)$$

где  $K$  – известное число кластеров.

Идея адаптированного под решение задач диагностирования алгоритма  $K$ -means с одним кластером заключается в проверке декодированных информационных данных в реальном времени. При попадании значений входа и выхода в сформированный кластер исправного состояния, алгоритмом выводится сообщение «Данные принадлежат кластеру, канал ИПЭ исправен: 1». В случае если данные, полученные при информационном обмене между устройствами МКИО, не попадают в сформированный кластер исправного состояния, алгоритмом выводится сообщение «Данные не принадлежат кластеру, канал ИПЭ неисправен: 0».

Второй используемый в работе метод кластеризации – метод DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* – пространственная кластеризация, основанная на

плотности для приложений с шумами). Метод DBSCAN позволяет эффективно обнаруживать кластеры произвольной формы, а также точки-выбросы (шум), проявляя высокую чувствительность к изменению данных. Если дан набор точек в некотором пространстве, алгоритм группирует вместе точки, которые тесно расположены друг с другом, а также помечает как выбросы точки, находящиеся одиноко в областях с малой плотностью (ближайшие соседи которых лежат далеко). DBSCAN не требует спецификации числа кластеров в данных априори в отличие от метода  $K$ -средних. DBSCAN может найти кластеры произвольной формы. Он может найти даже кластеры, полностью окруженные другими кластерами. Алгоритм DBSCAN с одним кластером, решающим задачу идентификации принадлежности каждой точки данных, соответствующих входу и выходу ИПЭ, представлен на рис. 5.

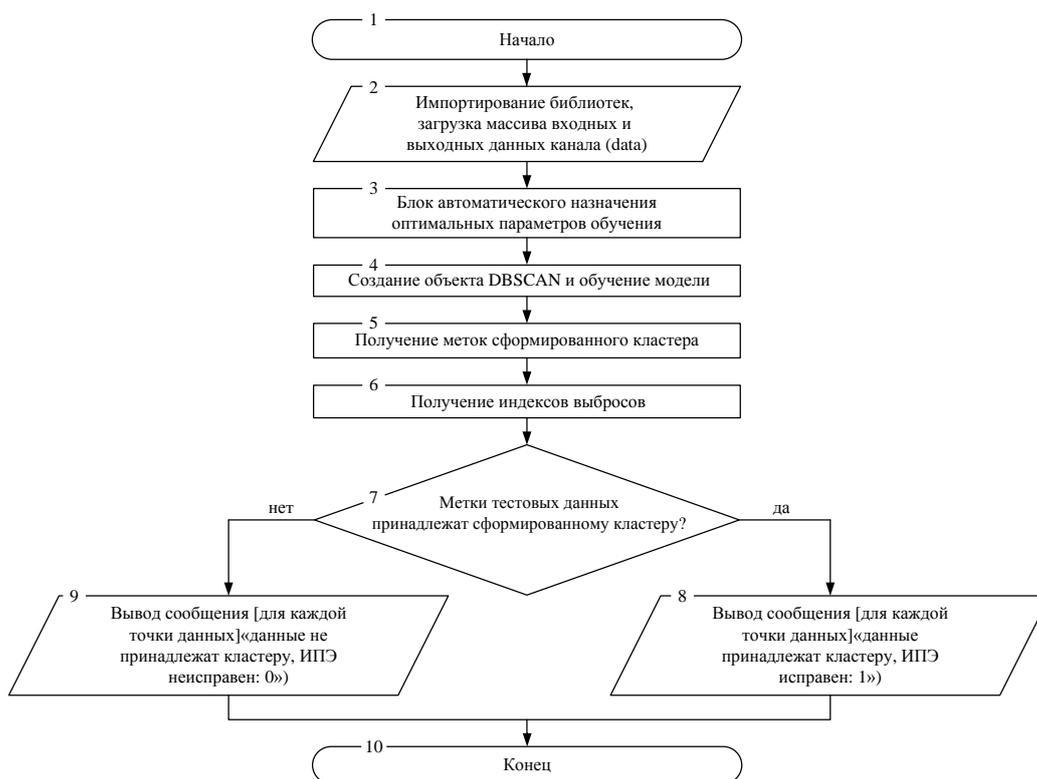


Рис. 5. Алгоритм кластеризации DBSCAN для диагностирования

Алгоритм DBSCAN работает следующим образом:

**Шаг 1.** Производится выбор случайной точки из данных, которая не была еще не помечена.

**Шаг 2.** Определяется, сколько точек находятся на расстоянии эpsilon от выбранной точки. Если число точек больше минимального количества точек, устанавливается новый кластер, иначе точка помечается как шум.

**Шаг 3.** Если точка относится к кластеру, все точки, находящиеся на расстоянии  $\epsilon$  от нее, также добавляются в кластер. Этот процесс продолжается, пока не будут добавлены все точки, находящиеся на расстоянии  $\epsilon$  от выбранной точки.

**Шаг 4.** Переход к следующей непомеченной точке и повторение шагов 2 и 3.

**Шаг 5.** Алгоритм заканчивает работу, когда все точки были помечены.

Недостатки DBSCAN:

1) DBSCAN не полностью однозначен – краевые точки, которые могут быть достигнуты из более чем одного кластера, могут принадлежать любому из этих кластеров, что зависит от порядка просмотра точек;

2) качество DBSCAN зависит от функции измерения расстояния. Наиболее часто используемой метрикой расстояний является евклидова метрика. В случае кластеризации данных

высокой размерности эта метрика может оказаться почти бесполезной, что делает трудным делом нахождение подходящего значения  $\varepsilon$ .

Идея адаптированного под решение задач диагностирования алгоритма DBSCAN с одним кластером заключается в проверке декодированных информационных данных в реальном времени. При попадании значений входа и выхода в сформированный кластер исправного состояния, алгоритмом выводится сообщение «Данные принадлежат кластеру, канал ИПЭ исправен: 1». В случае если данные, полученные при информационном обмене между устройствами МКИО, не попадают в сформированный кластер исправного состояния, алгоритмом выводится сообщение «Данные не принадлежат кластеру, канал ИПЭ неисправен: 0» и эти данные помечаются как выбросы.

Третий используемый в работе метод кластеризации – метод SOM (*Self-Organizing Map*), также известный как нейронная карта Кохонена. SOM – это вид нейронных сетей, используемых для кластеризации и визуализации многомерных данных. SOM представляет собой двухслойную нейронную сеть, состоящую из узлов (нейронов), организованных в виде двумерной сетки. Каждый узел соединен с соседними узлами и имеет вектор весов, который представляет собой многомерный вектор данных. SOM обучается на входных данных путем присваивания каждому входному вектору наиболее близкого узла на сетке. Затем узлы на сетке перемещаются ближе к своим ближайшим соседям, чтобы сократить расстояние между соседними узлами и улучшить качество кластеризации. SOM может использоваться для визуализации многомерных данных, таких как графики, изображения, текстовые документы, звуковые файлы, а также числовые данные, что позволяет исследовать их структуру, свойства и поведение во времени [7].

Для решения задачи диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования ВС используются искусственные нейронные сети Кохонена. Здесь нейроны активного слоя не имеют определенного порядка. В процессе обучения веса только одного победившего нейрона каждой SOM подстраиваются для информационно-преобразующих элементов. Каждый  $i$ -й нейрон 2-го слоя имеет собственный вектор весов  $W_i$ , который сравнивается с входным вектором  $X$ . Сравнение подразумевает вычисление расстояния между  $X$  и  $W_i$ , так что в слое Кохонена появляется нейрон-победитель с номером  $j$ , веса которого имеют минимальное расстояние до входного вектора:

$$j = \arg \min_i \|X - W_i\|. \quad (2)$$

В качестве метрики здесь может выступать евклидово расстояние:

$$\|X - W\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \omega_i)^2}. \quad (3)$$

Если векторы  $X$  и  $W$  нормализованные, то в качестве меры близости можно использовать скалярное произведение, и тогда выход нейрона можно описать формулой

$$y_j = W_j X = \sum_{i=1}^n \omega_{ij} x_i, \quad (4)$$

Выход нейрона  $j$  будет максимальным при одинаковых значениях  $X$  и  $W$ :

$$j = \arg \max_i \|W_i X\|. \quad (5)$$

Нормализация векторов выполняется по формулам:

$$\dot{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2}}, \quad \dot{x}_i = \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_j^2}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где  $\dot{\omega}_i, \dot{x}_i$  – нормализованные векторы, которые приведены к ограниченному диапазону значений  $[-1;1]$ . Когда на входной слой нейросетевого модуля диагностики подается вектор  $X$ , слой конкурирующих нейронов в программной структуре модуля определяет нейрон с наибольшим выходным сигналом  $y_j$  (нейрон-победитель). Этот нейрон обладает весовым вектором  $W_j$ , который наиболее близок к входному вектору. Между нейронами слоя Кохонена существуют соревновательные связи, которые позволяют близким нейронам усиливать сигналы друг друга, а не работать изолированно [7].

SOM является нейросетью, состоящей из двух слоев: входного и сетки. Входной слой содержит данные, которые необходимо кластеризовать, а сетка представляет собой двумерный массив нейронов, каждый из которых соответствует определенному кластеру.

В начале процесса обучения каждый нейрон в сетке инициализируется случайными весами. Затем для каждого входного вектора находится ближайший нейрон в сетке. Этот нейрон и его ближайшие соседи на сетке будут обновлены таким образом, чтобы их веса стали более похожими на входной вектор. Этот процесс повторяется многократно, пока нейроны в сетке не стабилизируются и не сформируют четкий кластер. В результате обучения SOM создает карту, которая позволяет визуализировать данные. Каждый кластер на карте представляет собой группу похожих объектов, а расстояние между кластерами соответствует степени их различия.

Недостатками данного алгоритма являются:

- 1) неэффективность при работе с большими объемами данных. SOM требует много времени и ресурсов для кластеризации больших объемов данных;
- 2) невозможность работы с неструктурированными данными. SOM работает только с числовыми данными и не может обрабатывать данные в виде текста, изображений или звука;
- 3) необходимость предварительной обработки данных. Для работы с SOM данные должны быть предварительно нормализованы и приведены к одному масштабу;
- 4) неоднозначность интерпретации результатов. SOM не всегда дает однозначные результаты, и их интерпретация может быть сложной;
- 5) высокая чувствительность к параметрам. SOM требует правильной настройки параметров, и неправильная настройка может привести к неправильным результатам;
- б) ограниченность в выборе метрик расстояния. SOM может работать только с определенными метриками расстояния, что может ограничивать возможности анализа данных.

Алгоритм кластеризации SOM, решающий задачу идентификации принадлежности каждой точки данных, соответствующих входу и выходу ИПЭ, представлен на рис. 6.

Алгоритм SOM работает следующим образом. В начале работы алгоритма импортируются необходимые библиотеки. Затем данные считываются из файла «ERD.xlsx» в переменную «data» с помощью функции «read\_excel» из библиотеки «pandas». В алгоритме происходит обучение нейронной сети типа SOM на ранее загруженных данных. SOM собирает данные в кластер и присваивает кластеру исправного состояния метку. Затем происходит вывод меток кластера и определение, принадлежат ли новые данные к кластеру или нет. Далее данные разделяются на данные, принадлежащие и не принадлежащие кластеру, с выводом соответствующих сообщений.

В результате модификации вышеуказанных алгоритмов кластеризации под решение задачи диагностирования ИПЭ БО, с целью повышения достоверности технической диагностики и недопущения ложной идентификации данных реального времени (ошибок первого и второго рода), предлагается использовать операцию тройного контроля факта принадлежности (непринадлежности) данных реального времени кластеру, описывающему полностью исправное состояние каждого ИПЭ в отдельности. А также мажоритарный принцип формирования на выходе сигнала о результатах контроля каждого ИПЭ по методу «два из трех» в отдельном блоке принятия решения об исправности (неисправности) ИПЭ. Применение трех алгоритмов кластеризации, решающих одну задачу различными подходами, позволит исключить ошибки

при диагностировании и принятии решения. Общий алгоритм диагностирования ИПЭ БО на основе машинного обучения, решающий задачу идентификации принадлежности каждой точки данных, соответствующих входу и выходу ИПЭ, представлен на рис. 7.

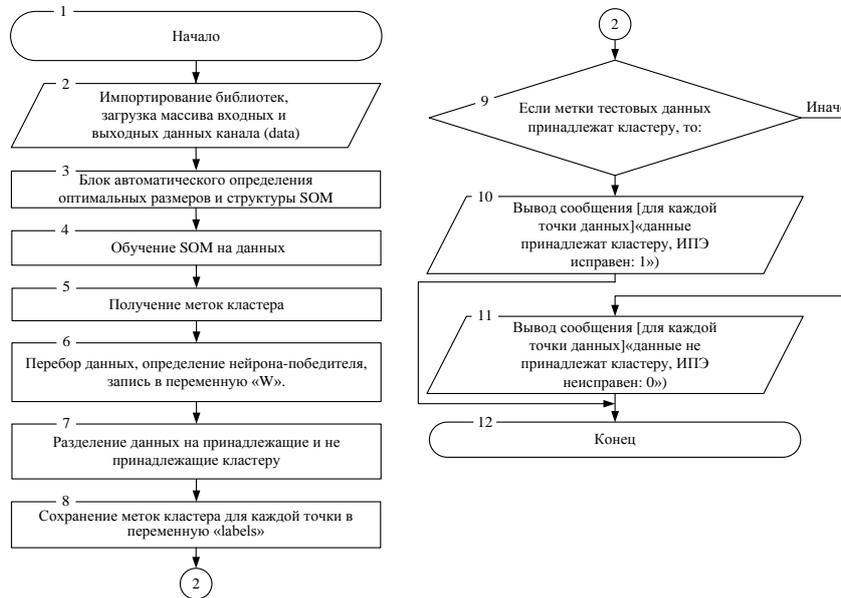


Рис. 6. Алгоритм кластеризации SOM для диагностирования

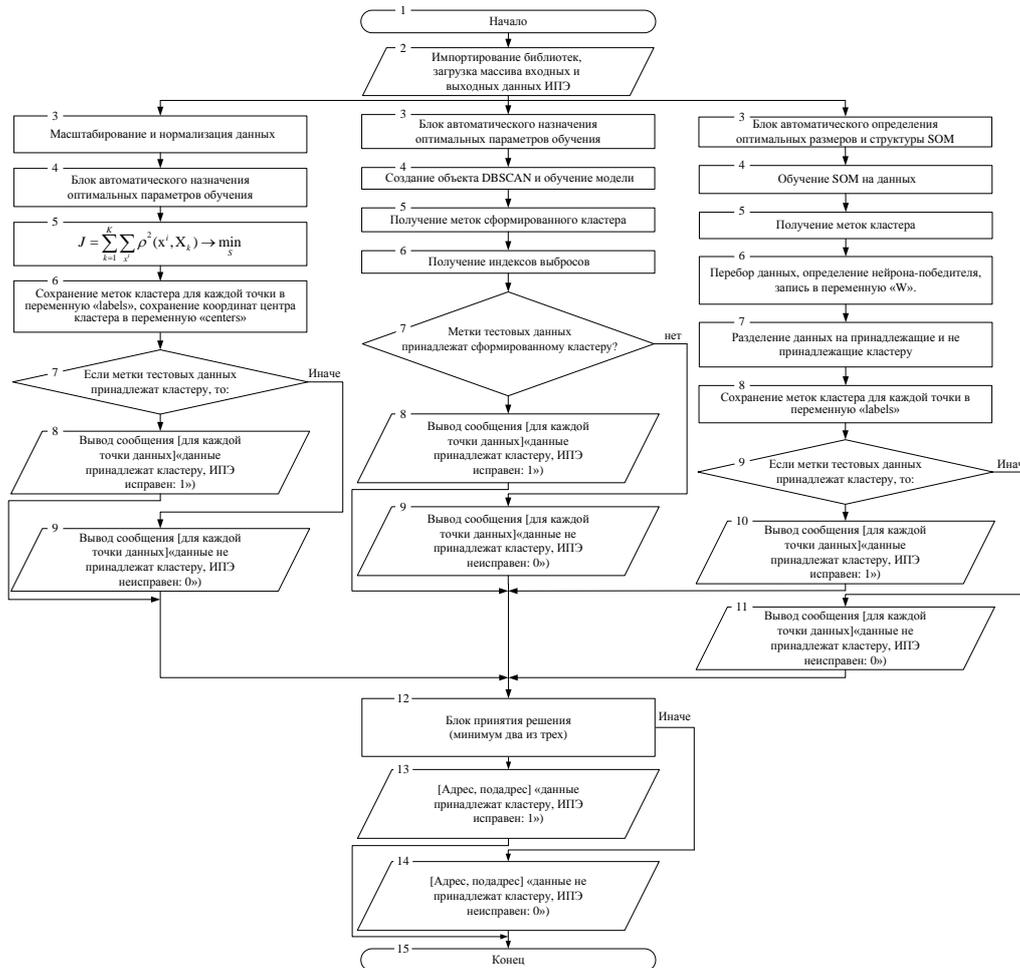


Рис. 7. Алгоритм диагностирования ИПЭ БО на основе машинного обучения

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

С целью реализации способа диагностирования был спланирован и проведен эксперимент по имитации подключения к МКИО, подаче всех входных сигналов в электронный регулятор двигателя ЭРД-3ВМ серии 2, их считывании, а также считывании выходного сигнала на исполнительный механизм ИМ-47 насоса-регулятора НР-3ВМ. Внешний вид электронного регулятора двигателя ЭРД-3ВМ серии 2 представлен на рис. 8.



Рис. 8. Внешний вид электронного регулятора двигателя ЭРД-3ВМ серии 2

Для имитации всех входных воздействий применялись лабораторные генераторы сигналов специальной формы АКПП-3402, а также источник питания постоянного тока GPS-74303А.

При реализации способа диагностирования ИПЭ БО через МКИО использовался принцип формирования единственного кластера для каждого адреса данных, участвующих в информационном обмене через МКИО, который описывает исправное состояние каждого ИПЭ, входящего в состав ОУ с собственным уникальным адресом. В качестве исследуемого канала преобразования информационных сигналов был выбран канал «ДЧВ-2500 – ИМ-47», в котором проводился сбор

оцифрованных сигналов на всем рабочем диапазоне функционирования имитатора ДЧВ-2500, с целью формирования кластера, описывающего эту функциональную зависимость (исправное состояние).

В экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 9, применены датчики переменного напряжения ZMPT101B и датчик постоянного напряжения «Voltage sensor 25V DC», так как основной параметр, несущий в себе информацию от датчиков ДЧВ-2500 – напряжение, которое меняется с изменением частоты вращения ротора турбокомпрессора и свободной турбины соответственно.

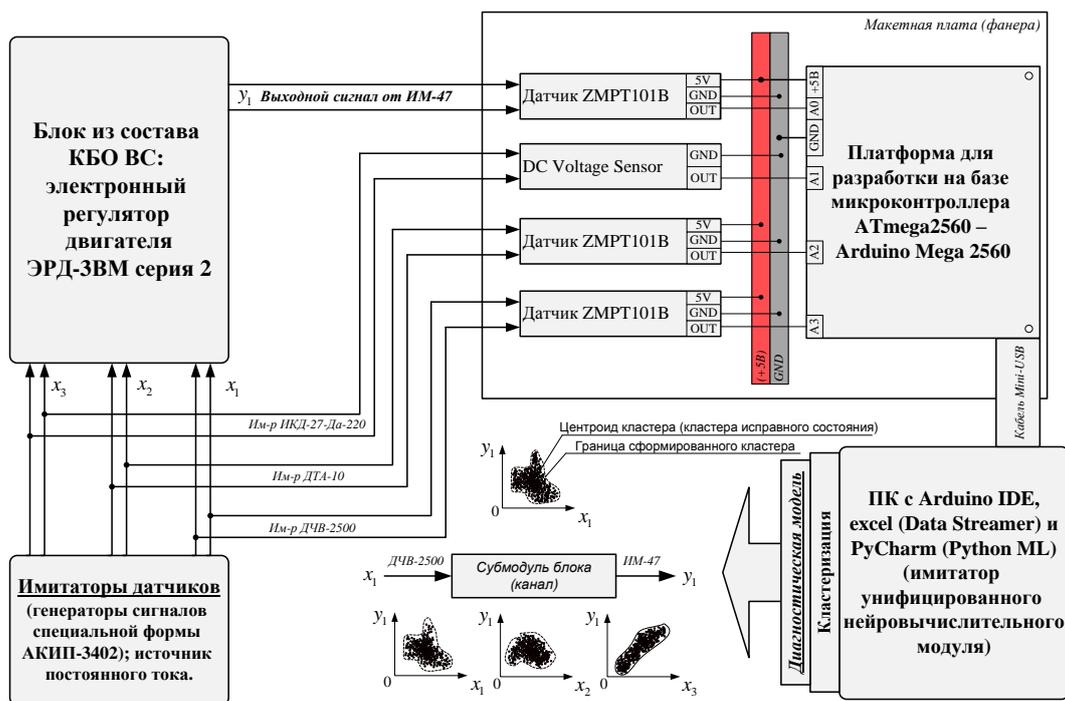


Рис. 9. Схема подключения электронных устройств для проведения полунатурного эксперимента

Датчик ZMPT101B способен регистрировать сигнал от электронного регулятора ЭРД-3ВМ серии 2, который представляет собой ШИМ-сигнал частотой 24,41 Гц с длительностью, пропорциональной коду управляющей команды. Датчик ZMPT101B работает с переменным током, а также позволяет зафиксировать наличие сигнала напряжения переменного тока произвольной частоты в диапазоне от 0 до 1000 Вольт.

На выходе из ЭРД-3ВМ серии 2 также установлены датчики ZMPT101B с целью возможности использования контроллера Arduino Mega 2560 для считывания сигналов, так как выходной ШИМ-сигнал от ИМ-47 на обмотку также меняется в диапазоне от 0 до 27 Вольт.

Датчик переменного напряжения ZMPT101B необходим для того, чтобы была возможность считывать сигнал от имитатора ДЧВ-2500 микроконтроллером Arduino Mega 2560 (так как его рабочее напряжение ограничено номиналом 5 Вольт и этот микроконтроллер работает на постоянном токе). В работе рассматривается только контур турбокомпрессора. Производится сбор оцифрованных сигналов на всех диапазонах значений ДЧВ-2500 по всем возможным значениям с фиксацией входных и получившихся выходных сигналов к ИМ-47 с использованием надстройки Data Streamer Microsoft Office Excel.

Data Streamer для Excel – это надстройка, которая позволяет получать реальные данные с различных источников и отображать их в режиме реального времени в таблицах Excel. Она является полезным инструментом для научных статей, так как позволяет исследователям получать и анализировать данные непосредственно в Excel, без необходимости переключаться между различными приложениями. Data Streamer позволяет подключаться к различным источникам данных, таким как датчики, контроллеры, программаторы, и автоматически обновлять данные в реальном времени. С помощью надстройки Data Streamer имеется возможность легко создавать графики, диаграммы и таблицы, отображающие динамику изменения данных в режиме реального времени, а также формировать обучающую выборку данных для машинного обучения. Подключение электронных устройств, собранная схема которых представлена на рис. 10, использование программной среды работы с микроконтроллером Arduino IDE, а также использование установленной надстройки Data Streamer офисного пакета Microsoft office Excel позволили в режиме реального времени осуществлять сбор входных и выходных информационных данных объекта контроля – исследуемого канала преобразования информационных сигналов «ДЧВ-2500 – ИМ-47».

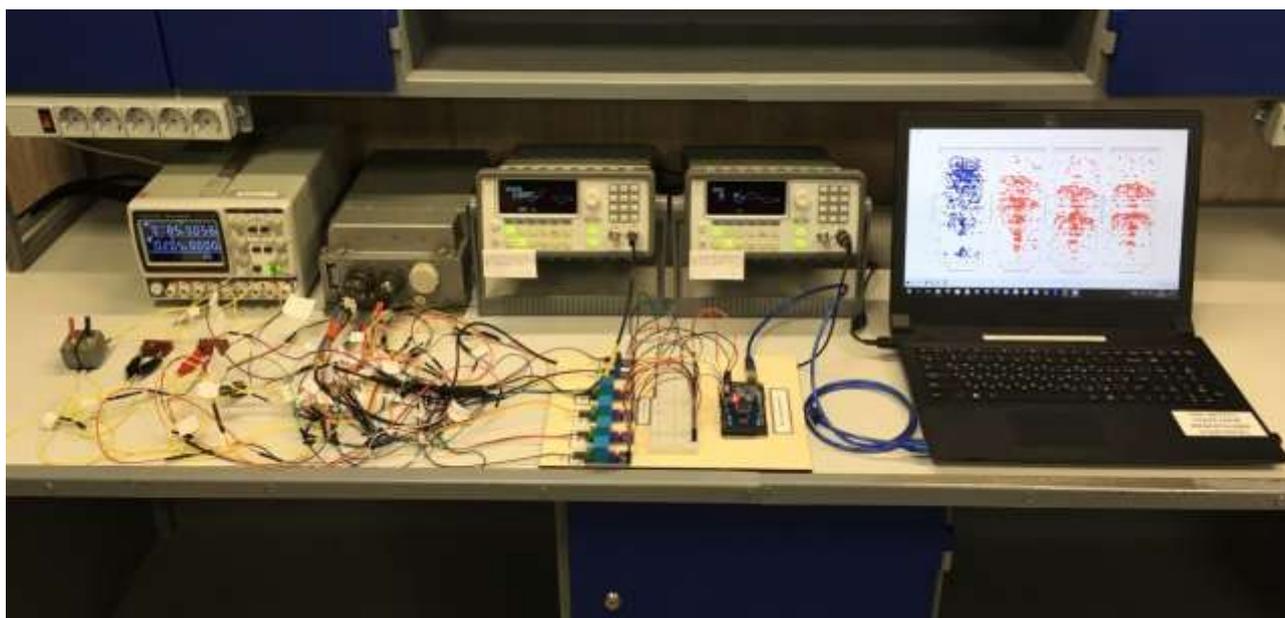


Рис. 10. Собранный стенд по реализации разработанного алгоритма диагностирования

Запуск процесса работы схемы с дискретностью сбора информационных данных, равной 0,05 секунд, а также установка флага микроконтроллера в надстройке Data Streamer в положение «Connect Device», позволили сформировать базу обучающих информационных данных на примере одного канала преобразования объекта контроля. Обучающие информационные данные отображаются в документе Excel в виде двух столбцов, где первый столбец соответствует входным данным контура турбокомпрессора «ДЧВ-2500 – ИМ-47», а второй столбец – выходным данным контура турбокомпрессора «ДЧВ-2500 – ИМ-47». Кодирование информации осуществляется встроенным восьмиразрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Количество измерений – 1000 значений входа-выхода. Обучающая выборка из 1000 значений является необходимым и достаточным условием полной работоспособности каждого метода машинного обучения, используемого в разработанном алгоритме, с затратой времени на обучение каждой модели, в среднем, 1,5 минуты, а на контроль каждой точки данных – 0,012 секунды. Обучающая выборка из 1000 значений входа-выхода исследуемого канала преобразования информационных сигналов обоснована проведением полного факторного эксперимента (ПФЭ)  $2^3$ , в котором основным фактором, влияющим на целевой показатель ПФЭ по критерию минимума времени контроля данных реального времени, является размер обучающей выборки с интервалом варьирования  $\lambda_i$ , равным 400 единиц. При размере обучающей выборки в 1000 значений достигается минимальное значение времени контроля. На рис. 11 представлен фрагмент надстройки Data Streamer, иллюстрирующий процесс формирования обучающих информационных данных.

Data In (From Source)							
Data coming from the current data source will appear below as it is received.							
Current Data							
Time	ДЧВ-2500	ИМ-47	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
0,452377986	-1,19	26,5					
Historical Data							
Time	ДЧВ-2500	ИМ-47	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
0,451781435	2,81	26,05					
0,451782097	2,81	26,28					
0,451783785	-5,19	25,94					
0,451785058	-1,29	25,94					
0,451786134	4,81	26,05					
0,451787407	-3,29	26,6					
0,451788669	-4,19	26,54					
0,451789757	4,71	26,26					
0,451791019	0,71	26,55					
0,451792106	-6,19	26,11					

Рис. 11. Процесс автоматического сбора информационных данных с использованием надстройки Data Streamer

При сборе обучающей информации данный процесс может подвергаться влиянию различных внешних возмущающих воздействий. В конечном итоге собранные данные, а также данные реального времени содержат шумы, ошибки и другие аномалии, которые приводят к неправильной оценке технического состояния системы. Фильтрация данных позволяет устранить шумы и ошибки в данных, что повышает точность оценки технического состояния системы. Это особенно важно для систем, где даже малейшие отклонения могут привести к серьезным последствиям.

Для имитации реальных условий (полет ВС на различных режимах) на эталонный сигнал выхода с использованием генератора сигналов специальной формы АКПП-3402 был наложен шум. Частотный диапазон моделируемого шума, согласно ГОСТ Р 57211.2 – 2016 «Данные о воздействии на электротехническое оборудование вибрации и ударов», лежит в диапазоне от 0 до 1000 Гц.

Для проверки качества фильтрации зашумленного сигнала был рассмотрен рекурсивный фильтр – фильтр Калмана (ФК). В ходе проведенного эксперимента работа фильтра выявила результаты, представленные в табл. 1. В качестве показателя качества, используемого для оценки процесса фильтрации, была выбрана средняя квадратичная ошибка (*Mean Squared Error, MSE*) – это показатель качества, который измеряет среднее значение квадрата разности между прогнозируемыми и фактическими значениями. Чем ниже значение MSE, тем лучше модель.

Таблица 1

### Результат оценки предельных внешних возмущающих воздействий

№ п/п	Частота внешнего возмущающего воздействия (шума): $f = 0 \div 1000$ Гц										
	$A_{\text{шума}}, B$	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
1	$\sigma_{\text{исходного сигнала}}$	0,261	0,25 6	0,25 6	0,25 7	0,25 7	0,26 1	0,24 7	0,25 7	0,25 7	0,256
2	$\sigma_{\text{сигнала с шумами}}$	0,825	0,85 7	1,11 8	1,75 8	2,39 8	3,54 3	4,95 3	6,11 3	8,05 1	10,15 5
3	$\sigma_{\text{сигнала с ФК}}$	0,105	0,15 4	0,19	0,50 3	0,73 4	1,26 8	2,34 1	2,96 4	4,46 7	5,74
Результат работы алгоритма с данными, собранными в ходе проведения эксперимента («1» – данные принадлежат кластеру; «0» – данные не принадлежат кластеру)											
4	Сигнал без внешнего возмущающего воздействия (нормальное функционирование)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	Сигнал с шумами	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Результат работы алгоритма <i>K-means</i> с ФК	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
7	Результат работы алгоритма DBSCAN с ФК	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
8	Результат работы алгоритма SOM с ФК	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
9	Результат работы общего алгоритма с ФК (минимум «два из трех»)	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

В ходе проведенного эксперимента была оценена возможность отдельного использования алгоритмов контроля (*K-means*, DBSCAN, а также нейронной карты Кохонена (SOM)) для решения задачи оценки информационных данных реального времени. Результаты эксперимента позволили выявить несовершенство алгоритмов кластеризации при дей-

ствии внешних возмущающих воздействий от 11%, а также определить, что по отдельности данные алгоритмы допускают ошибки, представленные в табл. 1. Но, в свою очередь, предложенный подход по принятию решения об исправности (неисправности) по мажоритарному принципу («два из трех») позволил избежать данных ошибок, сохранить работоспособность и повысить достоверность результатов контроля при внешних возмущающих воздействиях до 19%.

Алгоритм диагностирования ошибочно идентифицирует данные об исправном состоянии исследуемого канала преобразования информации «ДЧВ-2500 – ИМ-47», полученные в ходе проведения полунатурного эксперимента, при внешних возмущающих воздействиях амплитудой свыше 5 Вольт. Процентное соотношение шумов к полезному сигналу (ОСШ) составляет  $S_1 = \frac{5}{26,2} \approx 19\%$ , т. е. система контроля на основе разработанного алгоритма диагности-

рования не допускает ошибок при действии до 19% внешних возмущающих воздействий (ВВВ) переменной частоты относительно полезного сигнала с применением ФК. В то время как процентное соотношение шумов к полезному сигналу (без их компенсации), при которых алгоритм диагностирования ошибочно идентифицирует данные об исправном состоянии ис-

следуемого канала преобразования информации, составляет:  $S_2 = \frac{1}{26,2} \approx 4\%$ , т. е. система

контроля допускает ошибки уже при воздействии от 4% ВВВ на полезный сигнал.

При проверке предельного уровня ВВВ, когда система контроля не допускает ошибок, использовались данные, которые описывали полностью исправное состояние и на которые воздействовали только ВВВ.

Фильтр Калмана имеет несколько преимуществ в задачах фильтрации сигналов:

1) оптимальность – фильтр Калмана является оптимальным линейным фильтром для гауссовских сигналов и шума. Он обеспечивает наилучшую оценку состояния системы, основываясь на доступных наблюдениях;

2) рекурсивность – фильтр Калмана может быть реализован в виде рекурсивного алгоритма, который обновляет оценку состояния системы на каждом временном шаге, используя только текущее наблюдение и предыдущую оценку состояния. Это позволяет обрабатывать данные в реальном времени;

3) адаптивность – фильтр Калмана может быть адаптирован для различных типов систем и шумов. Он может быть настроен для учета изменений в модели системы или шума, что делает его гибким инструментом для фильтрации сигналов в различных условиях;

4) устойчивость к выбросам – фильтр Калмана устойчив к выбросам в данных. Он использует взвешенную комбинацию оценок состояния системы и наблюдений, что позволяет ему подавлять влияние выбросов на финальную оценку состояния;

5) эффективность – фильтр Калмана имеет низкую вычислительную сложность и требует мало памяти для хранения данных. Это делает его эффективным для реализации на мало-мощных устройствах, таких как микроконтроллеры или встроенные системы.

В целом, фильтр Калмана является мощным инструментом для фильтрации сигналов в различных приложениях, таких как диагностика, навигация, управление, трекинг и др.

В процессе применения фильтра Калмана в реальном времени отображается график исходного и отфильтрованного сигнала, чтобы можно было визуально оценить эффективность фильтрации. График процесса фильтрации входных информационных данных, полученных в ходе проведения эксперимента, представлен на рис. 12.

Проведенный анализ графика, представленного на рис. 12, позволяет сделать вывод о результатах фильтрации информационных данных. Как видно из графика, фильтр Калмана позволяет практически полностью избавиться от искусственно введенного шума и компенсировать его, обеспечивая работоспособность алгоритма с отношением сигнал/шум до 19%.

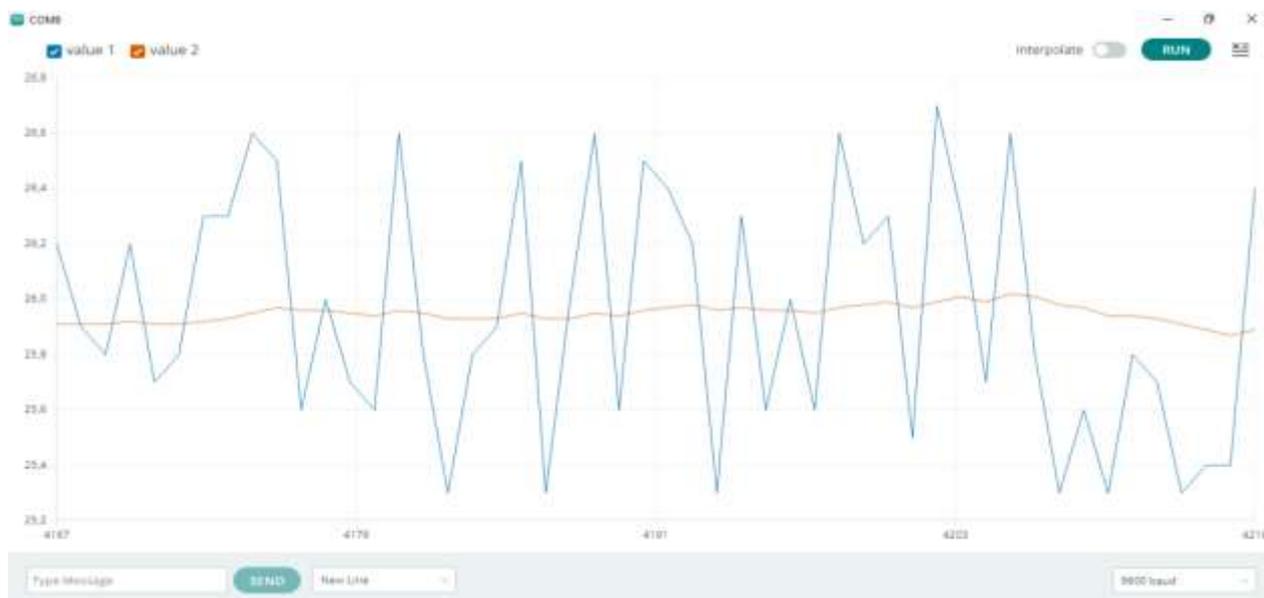


Рис. 12. Процесс фильтрации информационного сигнала на основе фильтра Калмана

На основе разработанного алгоритма диагностирования ИПЭ БО, на примере собранных информационных данных было разработано программное обеспечение с использованием языка программирования Python.

Разработанная программа позволяет реализовать операцию тройного контроля на основе трех приведенных выше алгоритмов, а также принятие решения об исправности (неисправности) ИПЭ по мажоритарному принципу формирования на выходе сигнала о результатах контроля по методу «два из трех». На рис. 13 представлен кластер исправного состояния, сформированный программой, полученной на основе разработанного алгоритма.

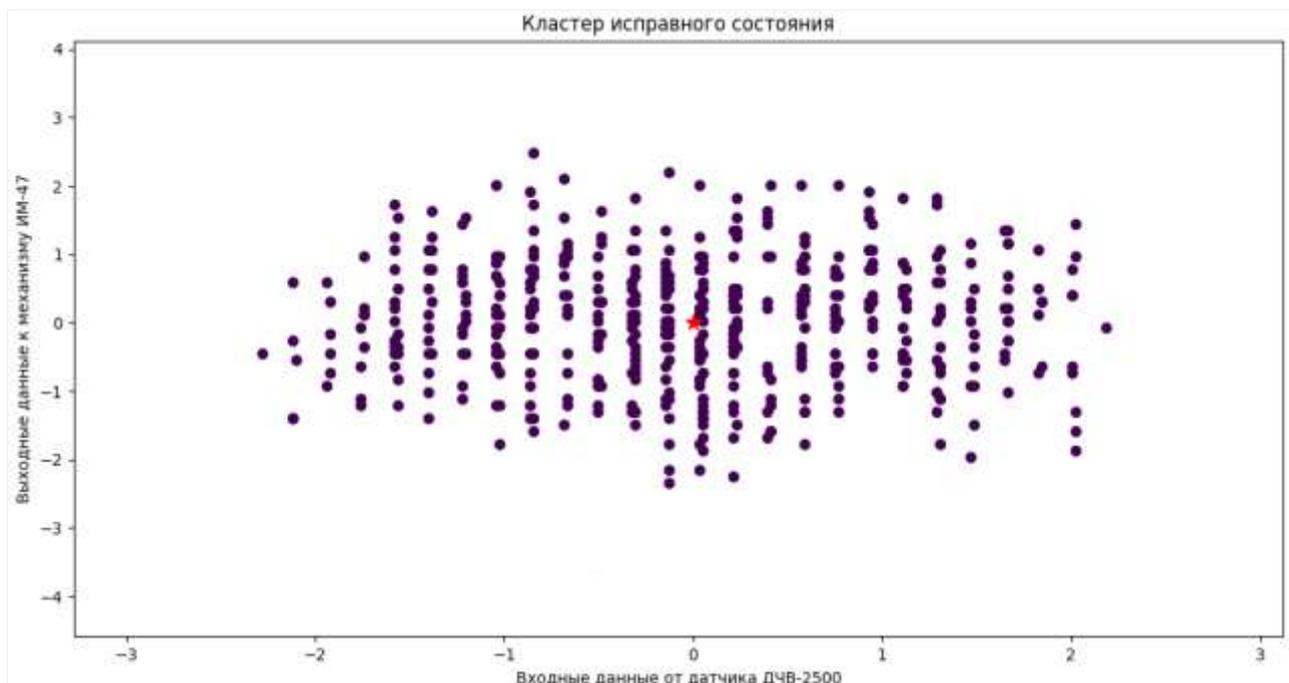
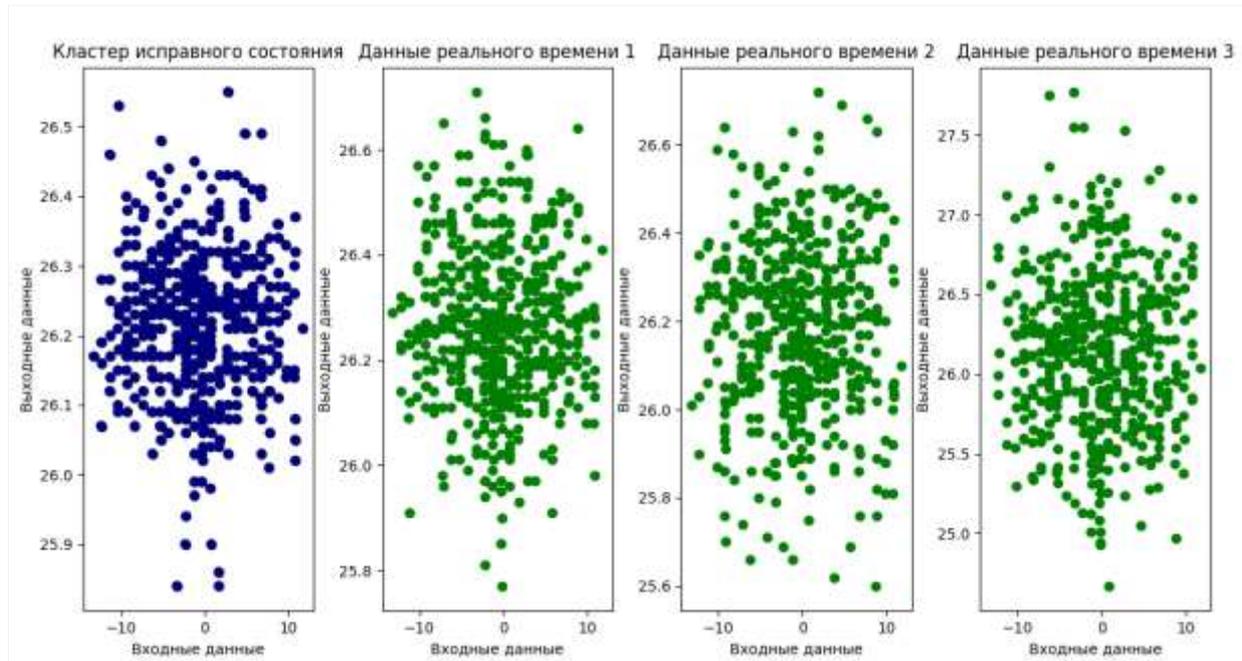


Рис. 13. Кластер исправного состояния канала «ДЧВ-2500 – ИМ-47»

Результат работы программы на тестовых данных, входящих в сформированный кластер, представлен на рис. 14. Как видно из рис. 14, данные, входящие в кластер, который описывает исправное состояние канала преобразования информации «ДЧВ-2500 – ИМ-47», помечаются зеленым цветом. Для данных, которые разработанным алгоритмом считаются входящими в кластер исправного состояния, в реальном времени выводится результат в виде информационных сообщений, представленных в нижней части рис. 14.



```

C:\Users\User\PcharmProjects\Project1\venv\scripts\python.exe C:\Users\User\PcharmProjects\Project1\k_means_ERD_TEST_OFK.py
C:\Users\User\PcharmProjects\Project1\venv\lib\site-packages\sklearn\cluster\_k_means.py:870: FutureWarning: The default value of 'n_init' will change from 1
warnings.warn(
Beta [ 2.81 26.35] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-5.19 26.41] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-1.29 26.42] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 4.81 26.38] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-3.29 26.38] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-4.19 26.41] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 4.71 26.47] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 0.71 26.46] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-6.19 26.42] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 0.71 26.44] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 4.71 26.32] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-4.29 26.34] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-2.19 26.38] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 5.71 26.39] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-2.19 26.38] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-0.19 26.26] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 3.71 26.13] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 2.81 26.18] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-5.19 26.19] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-1.29 26.21] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [ 4.81 26.19] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-4.29 26.08] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1
Beta [-4.29 25.99] Данные принадлежит кластеру, канал ДЧВ-2500 – ИМ-47 исправен: 1

```

Рис. 14. Вывод программы результата контроля при проверке данных, соответствующих исправному состоянию ИПЭ («1»), в реальном времени

Результат работы программы на тестовых данных, полученных в реальном времени при проведении полунатурного эксперимента, а также отличных от эталонных данных (выходной сигнал целенаправленно изменен программно в 1,6 раза), представлен на рис. 15.

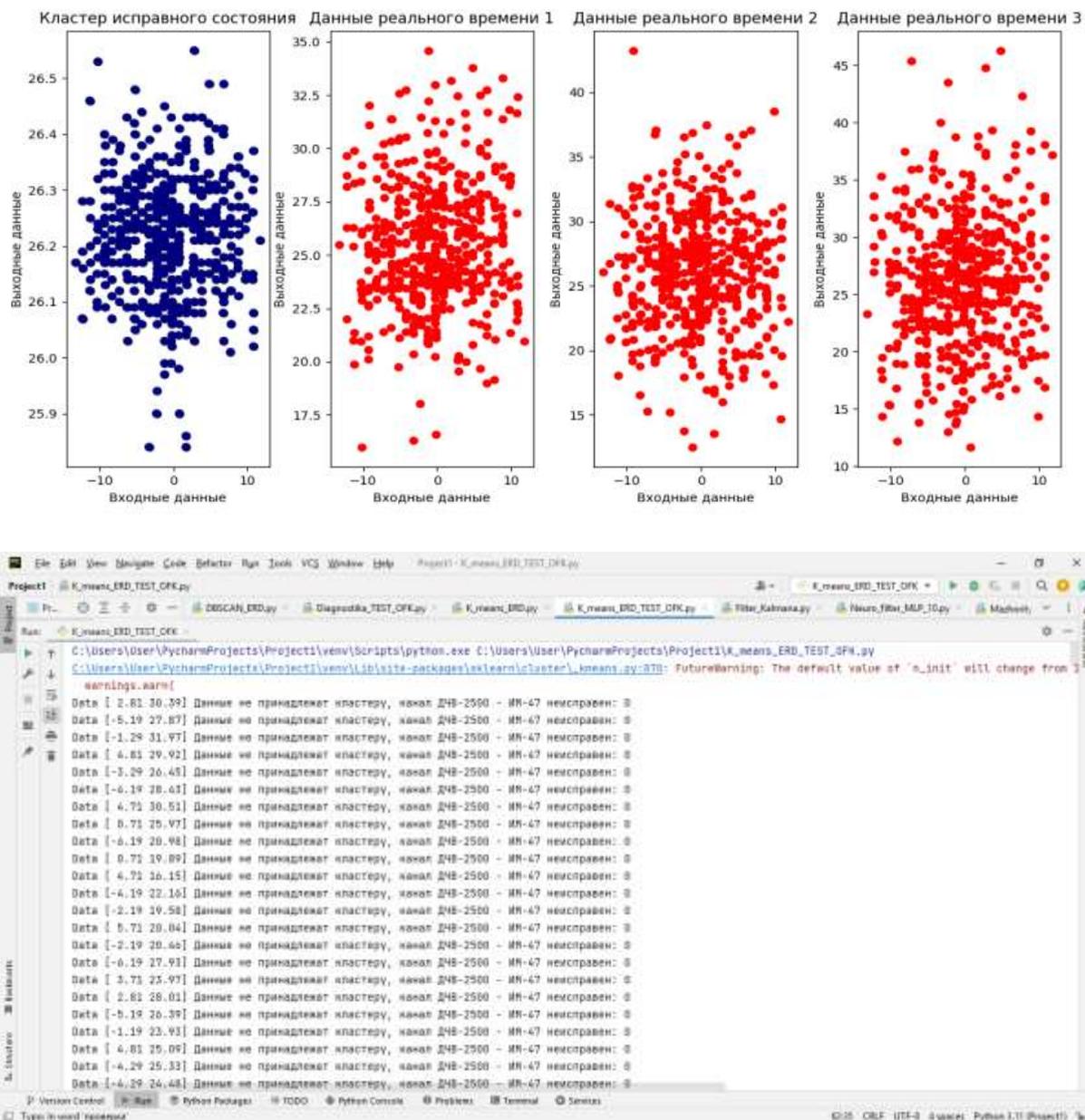


Рис. 15. Вывод программы результата контроля при проверке данных, соответствующих неисправному состоянию ИПЭ («0»), в реальном времени

В верхней части рис. 15 данные, не входящие в кластер, который описывает исправное состояние канала преобразования информации «ДЧВ-2500 – ИМ-47», помечаются красным цветом. Также для данных, которые разработанным алгоритмом считаются не входящими в кластер исправного состояния, в реальном времени выводится результат в виде информационных сообщений, представленных в нижней части рис. 15. Данным, не принадлежащим сформированному кластеру исправного состояния канала преобразования информации «ДЧВ-2500 – ИМ-47», присваиваются значения «0». Результат вывода сообщений, представленных в нижней части рис. 15, является следствием работы блока принятия решения по методу «минимум два из трех». В данном случае все три алгоритма, представленные на рис. 15, определили тестовые данные как непринадлежащие кластеру исправного состояния, с присваиванием значения «0» каждой паре измеренных значений.

Применение разработанного алгоритма диагностирования ИПЭ БО на основе машинного обучения позволит сократить время восстановления отказавших ИПЭ ВС за счет минимиза-

ции времени поиска места отказа в системах, которые контролируются в соответствии с ГОСТ Р 52075-2003 [11], и выполняют свои функции через МКИО. Это позволит повысить основные показатели надежности ВС: коэффициент готовности  $K_{\Gamma}$  и интенсивность восстановления  $\mu$ . Коэффициент готовности ВС имеет вид [12]

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0}{T_0 + T_B}, \quad (7)$$

где  $T_0$  – средняя наработка изделия на отказ;  
 $T_B$  – среднее время восстановления изделия.

Среднее время восстановления изделия включает в себя следующую сумму компонентов:

$$T_B = t_{\text{ПО}} + t_{\text{ТР}} + t_{\text{РКП}} + t_{\text{КТС}}, \quad (8)$$

где  $t_{\text{ПО}}$  – время поиска места и причин отказа;  
 $t_{\text{ТР}}$  – время текущего ремонта;  
 $t_{\text{РКП}}$  – время послеремонтного регулирования и контроля отдельных параметров аппаратуры;  
 $t_{\text{КТС}}$  – время контроля технического состояния изделия в целом [12, 13].

Интенсивность восстановления изделия – обратная величина среднего времени восстановления. Она имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{1}{T_B}. \quad (9)$$

Анализ нормативной документации, а также опыт эксплуатации ВС специалистами инженерно-авиационной службы (ИАС) позволили определить, что диагностирование БО до уровня конструктивно-съемной единицы бортовыми автоматизированными системами контроля для отдельных ИПЭ не реализовано. К числу такого оборудования относится и электронный блок ЭРД-3ВМ серии 2. В настоящее время контроль ЭРД-3ВМ реализован на борту воздушного судна в виде индикации на информационное табло ТС-5М при его отказе: «ОТКАЗ ЭРД ПРАВ (ЛЕВ)», что очевидно имеет низкую информативность. Поэтому, при отказе данного блока его диагностирование осуществляется с использованием контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) (пульта наземного контроля ПНК-3В), и, согласно руководству по технической эксплуатации и руководству по регламентным работам и ремонту системы регулирования двигателя ТВ3-117ВМ, временные затраты на диагностирование ЭРД-3ВМ составляют 20 минут. К тому же существующая КПА не способна осуществлять диагностирование до уровня конструктивно-съемной единицы: производится общая оценка исправности блока. В то время как внутренний состав блока ЭРД-3ВМ серии 2 подразумевает модульную конструкцию (каждому каналу преобразования информации соответствует свой модуль), и при применении разработанного алгоритма диагностирования время диагностирования изделия будет заключаться в оценке результатов контроля информационных сигналов реального времени посредством анализа записанной в БАСК информации после проверки и составлять не более 5 минут (на контроль каждой пары информационных данных затрачивается 0,012 секунды). Следовательно, минимизация времени восстановления отказавших изделий позволит повысить основные комплексные показатели надежности ВС – коэффициент готовности  $K_{\Gamma}$  и интенсивность восстановления  $\mu$  – за счет увеличения глубины поиска места отказа.

В качестве оценки экономической эффективности  $\mathcal{E}_{\phi}$  использовался метод на основе сравнения результата и затрат в прямом денежном выражении за период один год (на примере парка самолетов типа Су-35С):

$$\Xi_{\phi} = \frac{P}{Z_{\tau}} = \frac{3845350}{2316350} = 1,66, \quad (10)$$

где  $P$  – затраты на ремонт и восстановление отказавших изделий авиационной техники, выполняющих свои функции через МКИО;

$Z_{\tau}$  – затраты на внедрение и применение разработанного алгоритма диагностирования ИПЭ на основе машинного обучения на вычислительном модуле унифицированной, открытой и масштабируемой архитектуры.

Внедрение разработанной методики для парка самолетов-истребителей позволяет получить значительный экономический эффект в течение одного года эксплуатации.

Разработанный способ диагностирования на основе машинного обучения имеет ряд особенностей. К ним относятся:

– наличие единой унифицированной методической и алгоритмической основы построения и применения соответствующих диагностических моделей ИПЭ любой сложности для определения технического состояния всего КБО, выполняющего свои функции через МКИО, в реальном времени;

– при сборе информационных данных, полученных через МКИО от ОУ, учитываются возможные влияния внешних возмущающих воздействий, а также собственные шумы датчиков. С целью устранения (компенсации) возмущающих воздействий, а также недопущения неправильной оценки технического состояния ИПЭ модулем диагностики был фильтр Калмана, качество применения которого доказано в ходе проведенного эксперимента [14];

– возможность охвата контролем всего КБО ВС, выполняющего свои функции через МКИО: до тридцати одного ОУ, каждый из которых является отдельной системой ВС, и может включать до тридцати двух подадресов ОУ (блоков, модулей, submodule, а также каналов преобразования (обработки) информации);

– процесс формирования кластеров, характеризующих исправное состояние каждого ИПЭ БО ВС, является полностью автоматическим и не предусматривает наличие оператора (человека): при решении задач формирования кластеров применяется метод кластеризации, который предполагает применение стратегии «обучение без учителя» [15, 16];

– разработанный способ диагностирования сочетает в себе операцию тройного контроля на основе трех методов машинного обучения, принятие решения об исправности (неисправности) ИПЭ БО по методу «минимум два из трех», с целью повышения достоверности результата диагностирования и недопущения возникновения ошибок первого и второго рода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен анализ существующих методов и средств контроля, применяемых на борту современных ВС. Выявлена причина низкой глубины поиска места отказа – сложность формализации диагностических моделей, что отрицательно влияет на эффективность технической эксплуатации. Обоснована необходимость и возможность увеличения глубины поиска места отказа с применением методов машинного обучения, которые позволят автоматически создавать трудноформализуемые диагностические модели, повысив при этом интенсивность восстановления, и, как следствие, уровень надежности ВС.

Разработанный алгоритм сочетает в себе ансамблирование трех методов машинного обучения, а также мажоритарный принцип формирования на выходе сигнала о результатах контроля каждого канала ИПЭ БО. При этом применение алгоритма позволит повысить коэффициент готовности воздушного судна за счет минимизации времени восстановления ВС при отказах и неисправностях, что позволит повысить коэффициент готовности ВС.

Разработан алгоритм диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования на основе машинного обучения через взаимодействие с мультиплексным каналом информационного обмена.

Разработана и исследована функциональная модель диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования, которая, в отличие от известных, позволяет учесть в комплексе процедуры сбора и обработки формируемой в процессе их функционирования информации, позволяющей определить их техническое состояние. Комплексное использование данных аппаратно-программных средств позволяет увеличить глубину поиска места отказа при совместном функционировании с БАСК, что обеспечивает повышение уровня надежности ВС за счет сокращения среднего времени его восстановления (повышения коэффициента готовности ВС и интенсивности восстановления ВС).

### Список используемых источников

1. Уатт Дж., Борхани Р., Катсаггелос А. Машинное обучение: основы, алгоритмы и практика применения : пер. с англ. – СПб. : БХВ-Петербург, 2022. – 640 с.
2. Кольцов Ю. В., Добычина Е. М. Авионика истребителя пятого поколения Су-57. Ч. 1 // Успехи современной радиоэлектроники. – 2019. – № 8. – С. 29–45.
3. Кольцов Ю. В., Добычина Е. М. Авионика истребителя пятого поколения Су-57. Ч. 2 // Успехи современной радиоэлектроники. – 2020. – № 3. – С. 47–54.
4. Сытников И. А., Куликова Т. А., Куликов М. В. Уникальность бортового оборудования и материалов истребителя Су-57 // XI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 60-й годовщине полета Ю. А. Гагарина в космос : сб. науч. ст., Краснодар, 13–15 апр. 2021 г. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2021. – С. 340–343.
5. Мирошников И. И., Коновальцев Э. В., Хлонь Е. П. Авиационное оборудование самолета Су-30СМ // Межвузовский сборник научных трудов : сб. ст. – Краснодар : Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова, 2020. – Вып. 24. – С. 143–148.
6. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей: национальный стандарт Российской Федерации. – М. : Стандартинформ, 2003. – 28 с.
7. Букирёв А. С., Савченко А. Ю., Яцечко М. И. Функциональная модель диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования воздушных судов на основе машинного обучения // Вестник Военно-воздушной академии. – 2023. – № 1(51). – С. 237–244.
8. Бураков М. В. Нейронные сети и нейроконтроллеры : учеб. пособие. – СПб. : ГУАП, 2013. – 284 с.
9. Вьюгин В. В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : МЦНМО, 2018. – 384 с.
10. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А. А. Слинкина. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 400 с.
11. ГОСТ Р 52075-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Тестирование серийных образцов интерфейсных модулей, функционирующих в режиме оконечного устройства. – М. : Стандартинформ, 2003. – 25 с.
12. Чувычкин Л. Н., Ряднов С. Н., Малышев В. А. Теоретические основы эксплуатации авиационного оборудования : учеб. пособие. – Воронеж : ВУНЦ ВВС ВВА, 2014. – 278 с.
13. Федеральные авиационные правила инженерно-авиационного обеспечения государственной авиации. – М. : МО РФ, 2005. – Кн. первая. – 252 с.
14. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023611857 Российская Федерация. Модель обработки сигналов информационно-преобразующих элементов в условиях внешних воз-

мущающих воздействий с применением фильтра Калмана / А. С. Букирёв. – № 2023610881, заявл. 20.01.2023, опубл. 25.01.2023.

15. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023661942 Российская Федерация. Программа диагностирования комплекса бортового оборудования воздушных судов на основе машинного обучения / А. С. Букирёв. – № 2023660280, заявл. 22.05.2023, опубл. 05.06.2023.

16. Пат. № 2802976 С1 Российская Федерация, МПК G06N 3/02, G06F 11/00, G05B 23/00. Способ диагностирования информационно-преобразующих элементов бортового оборудования воздушного судна на основе машинного обучения / А. С. Букирёв, С. В. Ипполитов, В. Н. Крячков, А. Ю. Савченко. – № 2022126304, заявл. 07.10.2022, опубл. 05.09.2023.

О. И. Воронин<sup>1</sup>,

кандидат технических наук;

А. В. Цветков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Военная академия Ракетных войск стратегического назначения  
имени Петра Великого, г. Балашиха.

## **МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СОЕДИНЕНИЯ РАКЕТНЫХ ВОЙСК СТРАТЕГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ФРАКТАЛЬНОГО ПОТОКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ**

В данной научной статье описана методика формирования параметров системы поддержания работоспособности технических средств соединения Ракетных войск стратегического назначения (РВСН) в условиях фрактального потока неисправностей, представляющая собой упорядоченную совокупность действий, направленную на оптимизацию параметров системы по критерию коэффициента готовности не ниже заданного на этапах эксплуатации технических средств.

Ключевые слова: система поддержания работоспособности, фрактальный поток, неисправности, технические средства.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Анализ современной военно-политической обстановки в мире показал, что в настоящее время одной из важнейших государственных задач является поддержание высокого уровня боевой готовности стратегических ядерных сил (СЯС) к защите суверенитета и целостности РФ, основу которых составляют РВСН.

При этом оперативное проведение ремонтно-восстановительных работ, которое заключается в устранении возникающих в ходе эксплуатации ракетного вооружения (РВО) неисправностей, непосредственно влияет на достижение конечной цели – поддержание высокого уровня готовности СЯС ВС РФ.

В процессе анализа предметной области были выявлены основные причины, способствующие повышению количества неисправностей на технических средствах (ТС) соединения РВСН и тем самым определяющие актуальность темы исследования. К ним относятся:

- 1) тенденции развития военно-политической обстановки, связанные с потенциально широким задействованием ТС РВСН в ходе эвентуальных боевых действий;
- 2) нанесение противником массированного поражения группировке РВСН до старта межконтинентальных баллистических ракет (МБР);
- 3) физическое устаревание (естественный износ) ТС РВСН;
- 4) перевооружение соединений РВСН на новые ракетные комплексы;
- 5) снижение производственных возможностей и ресурсные ограничения ремонтно-восстановительных органов;
- 6) снижение уровня обученности личного состава ремонтных бригад (выездных расчетов);
- 7) появление и развитие в мире новых математических теорий (фундаментальной науки), позволяющих по-новому взглянуть на известные объекты исследования и разработать для них соответствующий прикладной научный аппарат;
- 8) несовершенство и неполнота показателей эффективности функционирования системы поддержания боевой готовности дежурных средств РВСН.

Неполнота показателей эффективности заключается в отсутствии среди них таких показателей, как наибольшее, среднее и наименьшее количество отказов в обслуживании. А несо-

вершенство существующих показателей выражается в использовании методов теории массового обслуживания адекватных пуассоновскому потоку неисправностей, что не соответствует реальному условию возникновения неисправностей.

Таким образом, исследование и усовершенствование процессов функционирования системы поддержания работоспособности (СПР) ТС, под которой в данной работе понимается совокупность выездных расчетов и ремонтных бригад, приставляющих собой систему массового обслуживания (СМО), являются актуальным вопросом и напрямую влияют на поддержание высокого уровня готовности СЯС ВС РФ.

Кроме того, анализ количества возникающих неисправностей на технических средствах соединения РВСН (анализ журналов учета неисправностей) позволяет сделать вывод о фрактальном характере потока неисправностей, что, в свою очередь, дает основание использовать модели Норрса и Литтла [6, 7], учитывающие фрактальную природу потока возникающих неисправностей, в отличие от известных моделей, использующих формулы Эрланга для стационарного потока заявок.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПР ТС В УСЛОВИЯХ ФРАКТАЛЬНОГО ПОТОКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ

На этапе распределения личного состава и технических ресурсов, имеющихся в распоряжении технической ракетной базы, важнейшую роль приобретает наиболее эффективное задействование ее сил и средств. В соответствии с поставленной научной задачей, а именно: повышением эффективности функционирования системы поддержания работоспособности (СПР) технических средств (ТС) соединения РВСН в условиях фрактального потока неисправностей, разработанная методика позволяет сформировать параметры системы в заданных условиях потока неисправностей, возникающих на ТС соединения РВСН, с учетом пригодности коэффициента готовности.

Данную методику можно представить в формализованном виде:

$$\{X, Y, Z, Q, R\} \xrightarrow{M} X^* = \{N^*, t_{\max}^*, S^*\} : K_G \geq K_{G_{TP}} . \quad (1)$$

Методика может использоваться в двух режимах работы:

1) заблаговременное формирование параметров СПР  $\{N^*, t_{\max}^*, S^*\}$  на основе метода их полного перебора с использованием математических моделей процессов численного определения границ производительности;

2) определение параметров СПР ТС соединения РВСН в режиме, близком к реальному времени, на основе совместного использования алгоритма «текущего маркерного ведра», модели планирования приоритетного устранения неисправностей и имитационной модели при фрактальном анализе входного потока неисправностей.

Структурная (функциональная) схема разработанной методики формирования параметров СПР ТС соединения РВСН в условиях фрактального потока неисправностей представлена на рис. 1.

*Шаг 1.* Ввод общих исходных данных. В соответствии с математической и имитационной моделями первым шагом методики является ввод исходных данных, общих для двух возможных режимов применения методики. При этом вводу подлежат следующие параметры СМО:

- суммарная наработка системы за время эксплуатации  $t_0$ ;
- количество технических средств соединения РВСН  $k$ ;
- количество неисправностей  $m_i$  на  $i$ -м техническом средстве за время эксплуатации;
- среднее время устранения неисправности  $t_{ei}$  на  $i$ -ом техническом средстве;
- параметр реального или нереального времени оптимизации *realtime*.

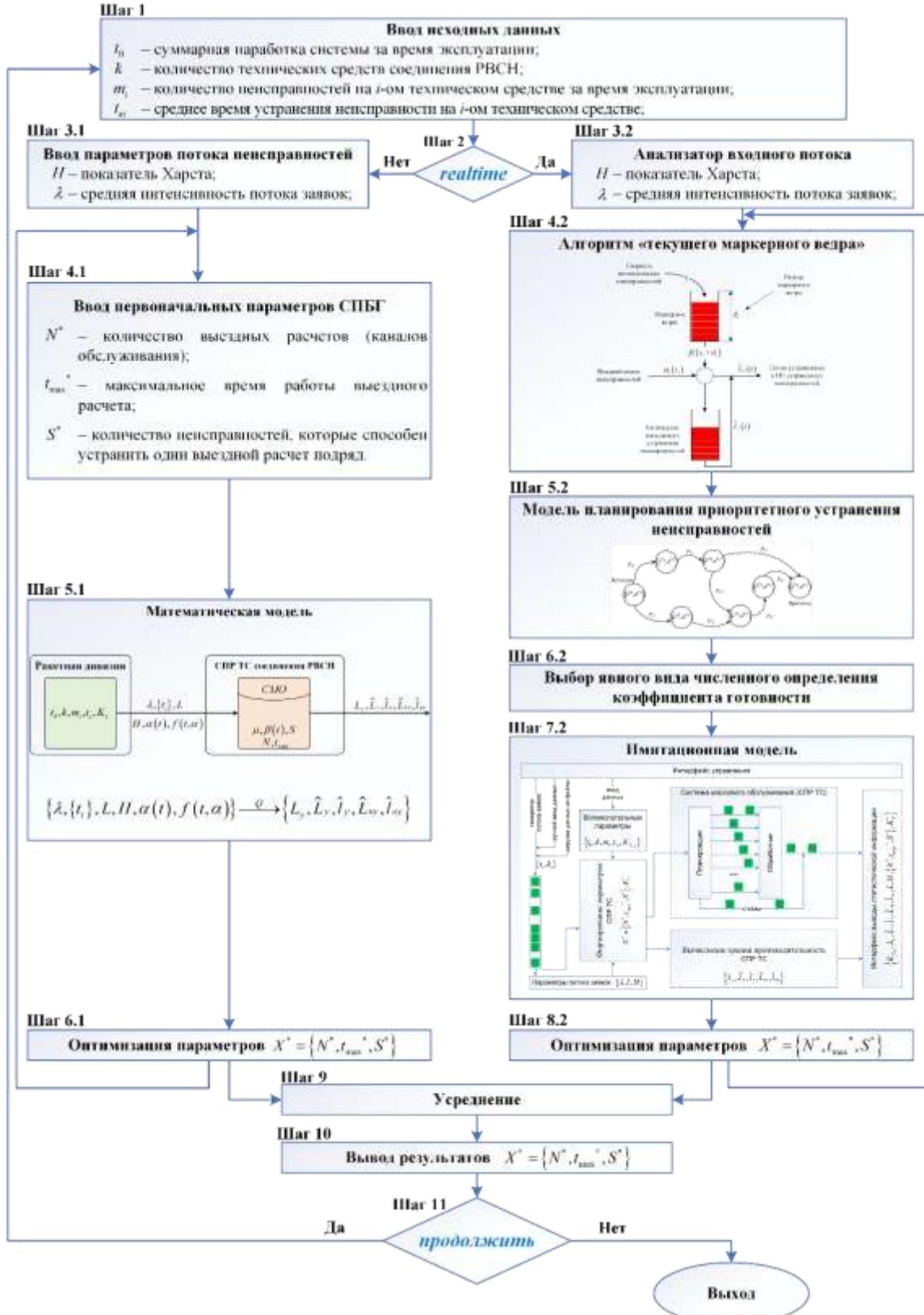


Рис. 1. Структурная (функциональная) схема методики формирования параметров СПР ТС соединения РВСН в условиях фрактального потока неисправностей

Шаг 2. Выбор режима работы методики. На данном этапе осуществляется выбор режима работы методики условным оператором на основе указанного ранее флага *realtime*, принимающего значения *true* и *false*, а именно: режим близкий реальному времени и режим за-

благвременного использования методики, т. е. функционирование методик не в режиме реального времени.

*Шаг 3.1.* Ввод исходных данных при неиспользовании режима близкого к реальному времени (однократная оптимизация под исходные данные). Оператором вводятся следующие параметры входного потока:

- средняя интенсивность потока неисправностей  $\lambda$ ;
- показатель Харста входного потока неисправностей  $H$ .

*Шаг 4.1.* Ввод первоначальных параметров. На данном шаге производится ввод первоначальных значений искомых варьируемых параметров  $X^*$  СПР ТС, таких как:

- количество выездных расчетов  $N^*$ ;
- максимальное время работы выездного расчета  $t_{\max}^*$ ;
- количество неисправностей  $S^*$ , которые способен устранить один выездной расчет подряд.

*Шаг 5.1.* Определение характеристик СПР ТС на основе заданных оператором первоначальных параметров. На данном этапе с использованием математической модели, рассчитываются следующие параметры для различных вариантов значений множества варьируемых параметров  $X^*$ :

- среднее количество устраненных неисправностей  $L_y$ ;
- верхняя граница производительности СМО  $\hat{L}_y$  (наибольшее значение количества гарантированно устраненных неисправностей системой поддержания работоспособности технических средств соединения РВСН);
- нижняя граница производительности СМО  $\hat{l}_y$  (количество гарантированно устраненных неисправностей системой поддержания работоспособности технических средств соединения РВСН);
- верхняя граница количества неустраненных неисправностей  $\hat{L}_{ny}$  системой поддержания работоспособности технических средств соединения РВСН;
- нижняя граница количества неустраненных неисправностей  $\hat{l}_{ny}$  системой поддержания работоспособности технических средств соединения РВСН.

*Шаг 6.1.* Оптимизация параметров. Данный шаг заключается в осуществлении оператором перебора значений множества варьируемых параметров  $X^* = \{N^*, t_{\max}^*, S^*\}$  с целью изучения поведения рассчитываемых в математической модели характеристик СПР при различных условиях функционирования. Это позволяет прогнозировать поведение системы и заблаговременно формировать требуемые ее параметры.

*Шаг 3.2.* При использовании методики в режиме, близком к реальному времени, на основе анализатора входного потока неисправностей определяются вид кривой поступления и оценка показателя Харста.

*Шаг 4.2.* На данном шаге на основе так называемого алгоритма «текущего маркерного ведра» определяется количество выездных расчетов, необходимое для устранения всплеска неисправностей, возникших одновременно. Для этого необходимо корректное формализованное представление кривой поступления неисправностей  $\alpha(s)$ , для чего необходим учет ряда факторов.

1. В известных работах доказано, что поток неисправностей, возникающих на технических средствах, имеет ярко выраженный всплесковый характер и является фрактальным процессом, проявляющим свойство самоподобия в масштабе времени. Поэтому для адекватного численного определения величины  $\alpha(s)$  необходимо использовать элементы теории фрактальных процессов [1]. Анализ научных трудов по данной теории показал, что для формализованного описания  $\alpha(s)$  рационально использовать именно показатель Харста [2].

2. СПР ТС должна эффективно противостоять всплескам потока неисправностей. Анализ известных научных положений теории детерминированного сетевого исчисления [3, 4] позволил выявить надежный инструмент для адекватного описания обслуживания всплесков, а именно алгоритм «текущего маркерного ведра» (рис. 2).

3. Кроме того, в соответствии с условиями научной задачи  $\alpha(s)$  должна быть детерминированной функцией. Для этого в работе применяется подход, основанный на использовании оптимальных параметров «маркерного ведра», обеспечивающих минимальный пропуск заявок, что в свою очередь позволяет говорить о нижней границе производительности СПР и, как следствие, оценить нижнюю и верхнюю границу количества необслуженных (неустраненных) неисправностей.

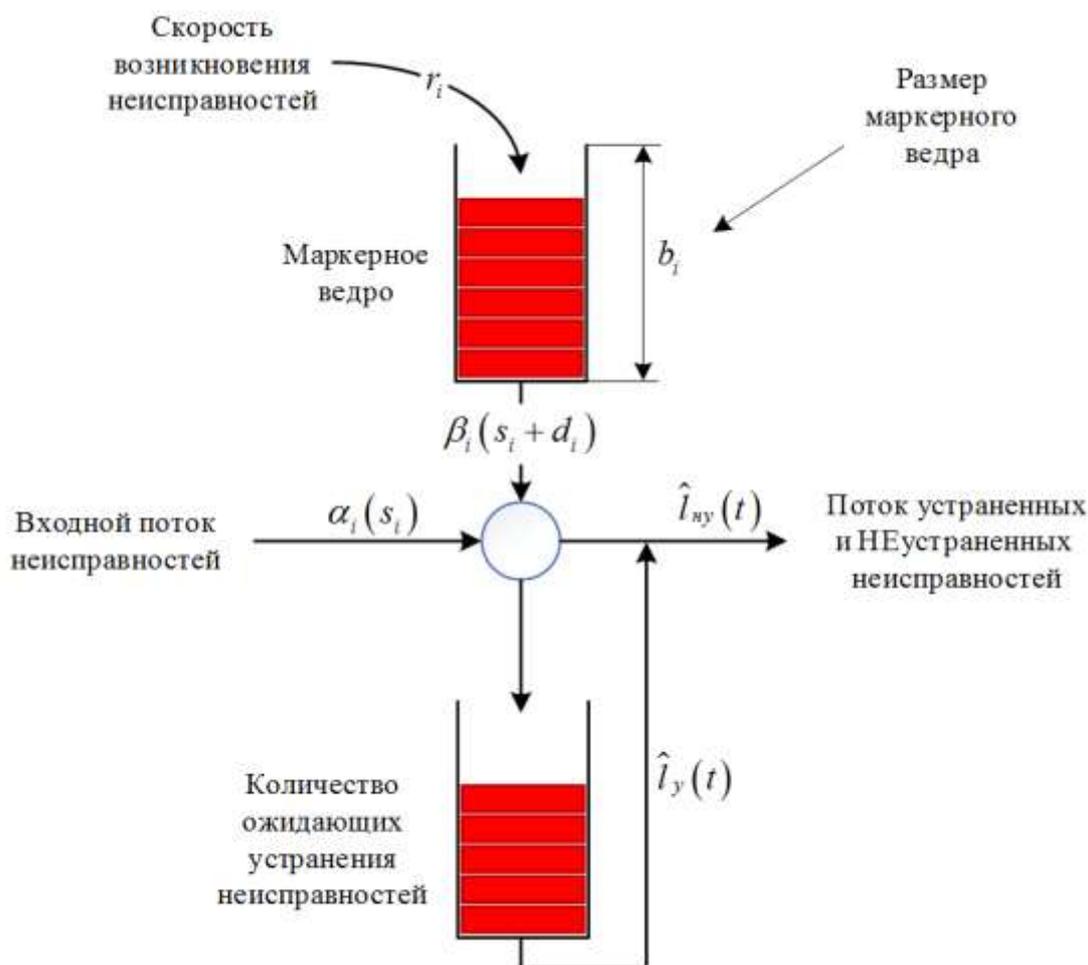


Рис. 2. Обслуживание заявок (устранение неисправностей) СПР по алгоритму «текущего маркерного ведра»

С учетом указанных факторов удалось определить параметры так называемого «маркерного ведра», которые обеспечат наименьшее количество неустраненных неисправностей.

Требуемый размер ведра  $b$  [шт.] (количество выездных расчетов, которые могут быть сформированы для устранения неисправностей одновременно) соответствует всплескам потока неисправностей, учитываемым с помощью показателя Харста (2), и связан с кривой поступления  $\alpha(s)$  и количеством неисправностей  $L$ , которые требуется устранить (4), а скорость поступления маркеров  $r$  [шт./с] связана с производительностью системы  $\beta(s + d)$  и количеством выездных расчетов  $N$  (3):

$$b = \sigma(1-H) \sqrt{2\gamma \left(\frac{H}{1-H}\right)^H}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение обслуженных заявок входного потока, шт.;  
 $\gamma$  – параметр несоответствия очередной неисправности для установленного «маркерным ведром» профиля входного потока при обеспечении минимального количества отказов в обслуживании (безразмерный),

$$\gamma = \left| \ln \left( \frac{1}{L} \right) \right|,$$

где  $L$  – общее количество неисправностей входного потока, поступивших на текущий момент времени;

$H$  – показатель Харста входного потока неисправностей;

$$r = \left( m + \sigma(1-H) \sqrt{2\gamma \left(\frac{H}{1-H}\right)^{H+1}} \right); \quad (3)$$

где  $m$  – оценка математического ожидания, шт.;

$$\alpha(s) = \begin{cases} rs + b & \text{при } s > 0; \\ 0 & \text{при } s \leq 0 \end{cases}; \quad (4)$$

$$\alpha(s) = \begin{cases} \left( m + \sigma(1-H) \sqrt{2\gamma \left(\frac{H}{1-H}\right)^{H+1}} \right) s + \sigma(1-H) \sqrt{2\gamma \left(\frac{H}{1-H}\right)^H} & \text{при } s > 0 \\ 0 & \text{при } s \leq 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Точность определения показателя Харста входного потока неисправностей существенным образом влияет на адекватность разработанной математической модели. Поэтому в работе был проведен анализ применимости известных методов численного определения показателя Харста в разрабатываемой математической модели, а именно метода нормированного размаха, метода графика изменения дисперсии, метода индекса дисперсии для отчетов, метода периодограммного анализа, метода Виттла и метода вейвлет-анализа. Они обладают различной сложностью и результативностью.

При оценке значения показателя Харста рассмотренными методами, получаемые величины могут отличаться из-за различия методики измерений, структуры данных, масштабов времени, размеров выборки и т. п. Недостаточная достоверность оценивания связана с невозможностью предварительной проверки на самоподобность входного потока по определению. В результате трудно сделать однозначный вывод о причинах пульсации в потоке неисправностей, вызванных долговременной зависимостью либо нестационарностью исследуемого процесса. Показатель Харста для конкретного рубежа обороны принимает непостоянные значения, изменяющиеся во времени. Это требует непрерывности контроля за величиной показателя Харста и выявления ложных тестов на самоподобие.

Из анализа обобщенных данных эффективности основных методов оценки показателя Харста следует, что наиболее предпочтительным для анализа потока неисправностей является индекс дисперсии для отчетов  $IDO(t)$ . Он является мерой изменчивости входного потока на различных масштабах времени. Индекс дисперсии для отчетов СПР на заданных интервалах времени  $t$  определяется как отношение дисперсии количества поступлений неисправностей к оценке их математического ожидания:

$$IDO(t) = \frac{\sigma_i^2}{m_i}. \quad (6)$$

В случае, когда рассматриваемый процесс является самоподобным, график  $\log(IDO(t))$  будет иметь вид прямой линии с наклоном, равным  $2H - 1$ , откуда несложно определить значение  $H$ . Рассмотренный метод является простым и эффективным, он не требует большой вычислительной мощности, а на получаемом графике хорошо видно влияние изменений в анализируемом наборе данных.

Следовательно, устранение неисправностей по алгоритму «текущего маркерного ведра» при массивном ударе позволяет избежать насыщения заявками (неисправностями) системы поддержания работоспособности технических средств соединения РВСН.

Таким образом, данный этап методики заключается в адаптации алгоритма «текущего маркерного ведра» применительно к процессам функционирования СПР ТС соединения РВСН, а именно в численном определении параметров «ведра», обеспечивающих минимальное количество отказов в обслуживании при всплесках входного потока.

Кроме того, использование указанного алгоритма из теории детерминированного сетевого исчисления применительно к объекту исследования является элементом научной новизны методики.

*Шаг 5.2.* Планирование приоритетного устранения неисправностей. На данном шаге, используя модель, представляющую собой ориентированный ациклический граф задач устранения неисправностей, осуществляется планирование приоритетного устранения неисправностей системой поддержания работоспособности технических средств соединения РВСН в целях снижения количества отказов в обслуживании (неустранении неисправности).

*Шаг 6.2* методики заключается в выборе оператором явного вида численного определения коэффициента готовности системы, состоящей из независимых элементов. Для этого используется не формула Эрланга для Пуассоновского потока, а ранее не применявшиеся для этой цели формулы, разработанные на основе методов теории хаоса и теории детерминированного сетевого исчисления, используемые для определения среднего значения, а также границ производительности СПР в случае входного потока неисправностей с распределением Парето [5].

На основе средней производительности СПР ТС

$$K_{\Gamma} = \frac{t_0}{t_0 + L \left( 1 - \frac{1 - \frac{\lambda}{\mu N}}{1 - \left( \frac{\lambda}{\mu N} \right)^{\frac{2}{C_{\alpha}^2} + 1}} \left( \frac{\lambda}{\mu N} \right)^{\frac{2}{C_{\alpha}^2}} \right) t_e}. \quad (7)$$

На основе верхней границы количества гарантированно устраненных неисправностей

$$K_{\Gamma} = \frac{t_0}{t_0 + \left( \left[ \sup_{0 < s \leq t} \frac{\beta(s+d)}{\alpha(s)} \right] \alpha(t) \right) t_e}. \quad (8)$$

На основе нижней границы количества гарантированно устраненных неисправностей

$$K_{\Gamma} = \frac{t_0}{t_0 + \left( \left[ 1 - \inf_{0 < s \leq t} \frac{\beta(s+d)}{\alpha(s)} \right] \alpha(t) \right) t_e}. \quad (9)$$

На основе верхней границы количества неустранимых неисправностей

$$K_{\Gamma} = \frac{t_0}{t_0 + \left( \left[ \inf_{0 < s \leq t} \frac{\beta(s+d)}{\alpha(s)} \right] \alpha(t) \right) t_g}. \quad (10)$$

На основе нижней границы количества неустранимых неисправностей

$$K_{\Gamma} = \frac{t_0}{t_0 + \left( \left[ 1 - \sup_{0 < s \leq t} \frac{\beta(s+d)}{\alpha(s)} \right] \alpha(t) \right) t_g}. \quad (11)$$

При этом формулы (7)–(11) являются главным элементом научной новизны разработанной методики.

*Шаг 7.2.* Имитационная модель. На данном шаге с использованием разработанной ранее имитационной модели происходит расчет коэффициента готовности согласно его явному виду, выбранному на предыдущем шаге методики. Кроме того, входными параметрами для имитационной модели являются:

- определенные на шаге 3.2 параметры входного потока;
- рассчитанное на шаге 3.2 минимальное количество выездных расчетов, необходимое для погашения всплеска неисправностей;
- разработанный с помощью модели планирования (шаг 5.2) график приоритетного устранения неисправностей.

*Шаг 8.2.* Оптимизация параметров. На данном шаге осуществляется изменение значений множества варьируемых параметров  $X^* = \{N^*, t_{\max}^*, S^*\}$  для обеспечения полного перебора. При этом значения каждого искомого параметра ограничены справа и слева, и определен шаг перебора в соответствии с системой:

$$\begin{cases} 1 \leq N \leq N_{\max}, \Delta N = 1 \\ t_{\max_{\min}} \leq t_{\max} \leq t_{\max_{\max}}, \Delta t_{\max} = 1 \text{ мин.} \\ S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \Delta S = 1 \end{cases} \quad (12)$$

А количество вариантов перебора определены формулой

$$\varphi = \frac{N_{\max} - N_{\min} + 1}{\Delta N} \cdot \frac{t_{\max_{\max}} - t_{\max_{\min}} + 1}{\Delta t_{\max}} \cdot \frac{S_{\max} - S_{\min} + 1}{\Delta S}. \quad (13)$$

Поиск наибольшего значения, отвечающего критерию пригодности, осуществляется сортировкой методом «Пузырька».

*Шаг 9.* Усреднение полученных по имитационной и математической моделям значений. Если методика функционирует в режиме реального времени, то ввиду различных скоростей обработки при имитационном и математическом моделировании, данные от имитационной модели используются при их наличии на текущий момент времени. В случае их отсутствия усреднение не производится. Если методика функционирует в режиме не реального времени – однократный запуск, то после готовности данных от блоков имитационного и математического моделирования производится усреднение.

*Шаг 10.* Вывод результатов. На данном этапе осуществляется вывод сформированных параметров СПР ТС соединения РВСН в условиях фрактального потока неисправностей

$$X^* = \{N^*, t_{\max}^*, S^*\}:$$

$N^*$  – количество выездных расчетов;

$t_{\max}^*$  – максимальное время работы выездного расчета;

$S^*$  – количество неисправностей, которые способен устранить один выездной расчет подряд.

*Шаг 11.* Остановка/продолжение. На данном шаге принимается решение о продолжении моделирования. Если решение положительное, то методика начинает работу заново с шага 1 «ввод исходных данных», если отрицательно – методика прекращает функционирование.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в статье методика формирования параметров системы поддержания работоспособности технических средств соединения РВСН в условиях фрактального потока неисправностей представляет собой упорядоченную совокупность действий, направленную на оптимизацию параметров системы по критерию коэффициента готовности не ниже заданного на этапах эксплуатации технических средств. Целевое функционирование методики может осуществляться как заблаговременно, так и в режиме времени, близком к реальному.

В разработанной методике имеется ряд отличий от уже известных, а именно:

– предусмотрена возможность СПР эффективно противостоять всплескам потока неисправностей с помощью алгоритма «текущего маркерного ведра»;

– значение коэффициента готовности определяется не на основе формулы Эрланга для Пуассоновского потока, а на основе ранее не применявшихся для этой цели формул, разработанных на основе методов теории хаоса и теории детерминированного сетевого исчисления, используемых для определения среднего значения, а также границ производительности СПР в случае входного потока неисправностей с распределением Парето;

– предусмотрена возможность использования методики в режиме времени, близком к реальному, на основе параметрического описания исходных данных по противнику с помощью элементов теории хаоса, учитывающих неординарность и всплесковый характер появления неисправностей;

– уточнен состав управляемых соответствующими должностными лицами параметров СПР, влияющих на готовность технических средств соединения РВСН.

## Список используемых источников

1. Полоус А. И., Белов П. Ю., Попов А. М. Методика анализа закона распределения входного потока СПД для определения фрактальности телекоммуникационного трафика // Двойные технологии. – 2015. – № 4(73). – С. 46–50.

2. Мартьянов А. Н., Белов П. Ю., Белов К. Ю. Применение концепции фрактальности для обеспечения качества обслуживания приоритетного телекоммуникационного трафика // Труды ФГУП «НПЦАП»: Системы и приборы управления. – 2019. – № 3. – С. 10–17.

3. Росляков А. В., Кудрявцева Е. Н. Применение теории сетевого исчисления к исследованию систем массового обслуживания с обратной связью // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9, № 1. – С. 17–21.

4. Росляков А. В., Лысков А. А. Сетевое исчисление Network Calculus. Ч. 2: Практическое применение // Инфокоммуникационные технологии. – 2020. – Т. 18, № 3. – С. 237–248.

5. Рыжиков Ю. И., Уланов А. В. Численный метод расчёта многоканальных систем массового обслуживания с потоком Парето // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 2. – С. 1–11.

6. Шелухин О. И., Теняшев А. М., Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях : моногр. / под ред. О. И. Шелухина. – М. : Радиотехника, 2003. – 480 с.

7. Шелухин О. И., Осин А. В., Смольский С. М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / под ред. О. И. Шелухина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.

А. В. Зубарев,

*кандидат военных наук;*

В. В. Карагодин,

*доктор технических наук, профессор;*

Д. В. Рыбаков,

*кандидат технических наук*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

В статье представлен анализ технического состояния силовых трансформаторов объектов военной инфраструктуры. Приведена классификация отказов и характерных неисправностей силовых трансформаторов, методов для их определения. Показано, что для оценки технического состояния силовых трансформаторов (выявления повреждений обмоток) в процессе их эксплуатации и принятия решения о продлении технического ресурса силовых трансформаторов, выработавших назначенные сроки службы, возможно применение одного из современных методов – метода частотных характеристик. Изложены теоретические основы данного метода. Применение данного метода позволит не допустить аварийные ситуации в процессе эксплуатации силовых трансформаторов, с наибольшей эффективностью планировать вывод оборудования в ремонт, а также принимать обоснованные решения о продлении технического ресурса силовых трансформаторов, выработавших назначенные сроки службы.

Ключевые слова: силовой трансформатор, технический ресурс, неисправности, техническое состояние, частотные характеристики.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Важная роль в обеспечении обороноспособности страны отводится объектам военной инфраструктуры (ОВИ), перебои в работе которых могут привести к нарушению значимых технологических процессов и, как следствие, к срыву выполнения ими задач по предназначению. Это обуславливает необходимость в повышенных требованиях к надежности как систем электроснабжения (СЭС), обеспечивающих выполнение такими объектами стоящих перед ними задач, так и элементов в составе указанных систем. Среди основных значимых и капиталоемких элементов СЭС особое значение имеют силовые трансформаторы, обеспечивающие преобразование параметров электроэнергии в величины, требуемые для ее дальнейшего использования. От их надежной работы в большой степени зависит надежность работы всей СЭС.

Главным показателем, характеризующим возможность использования силового трансформатора по назначению, является назначенный заводом-изготовителем срок службы, определяющий продолжительность эксплуатации силового трансформатора в календарном исчислении, при достижении которой эксплуатация силового трансформатора должна быть прекращена независимо от его технического состояния [1].

Необходимо отметить, что силовые трансформаторы, являясь сложными техническими устройствами, в процессе эксплуатации подвержены влиянию сильных электрических и электромагнитных полей, температурных и электродинамических воздействий, следствием которых являются возникающие в процессе эксплуатации дефекты и неисправности. Поэтому для поддержания их эксплуатационной надежности (эксплуатационная надежность – надежность объекта в процессе его эксплуатации, обусловленная как качеством проектирования и изготовления, так и условиями его эксплуатации, технического обслуживания и ремонта) применяются различные методы контроля их технического состояния. Своевременный контроль технического состояния силовых трансформаторов и выявление неисправностей с целью их устранения и обеспечения работоспособности позволяют предотвратить

аварийные ситуации, с наибольшей эффективностью планировать вывод оборудования в ремонт, а также принимать обоснованные решения о продлении технического ресурса силовых трансформаторов, выработавших назначенные сроки службы.

### АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ХАРАКТЕРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Большая часть трансформаторных подстанций СЭС ОВИ спроектирована и введена в эксплуатацию более 40 лет назад. За это время основное оборудование большинства трансформаторных подстанций реконструкции и модернизации не подвергалось и лишь на некоторых трансформаторных подстанциях проводились незначительные доработки. Это привело к тому, что в настоящее время сложилась ситуация, когда около 70% всего парка силовых трансформаторов выработало назначенный заводом-изготовителем срок службы, но в связи с их удовлетворительным техническим состоянием продолжает находиться в эксплуатации.

На рис. 1, 2 и 3 представлено распределение «перересурса» силовых трансформаторов типов ТМ, ТМГ и ТСМА мощностью от 40 до 1000 кВА в процентном соотношении. Под «перересурсом» в статье понимается процент превышения назначенного срока службы силовых трансформаторов.

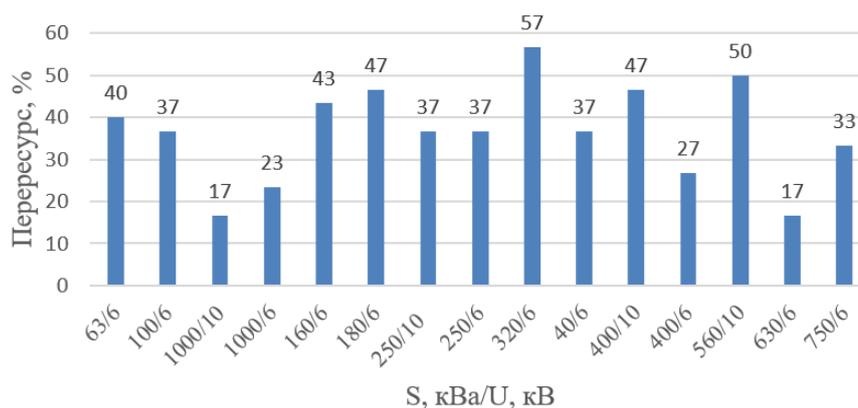


Рис. 1. Распределение «перересурса» силовых трансформаторов типа ТМ

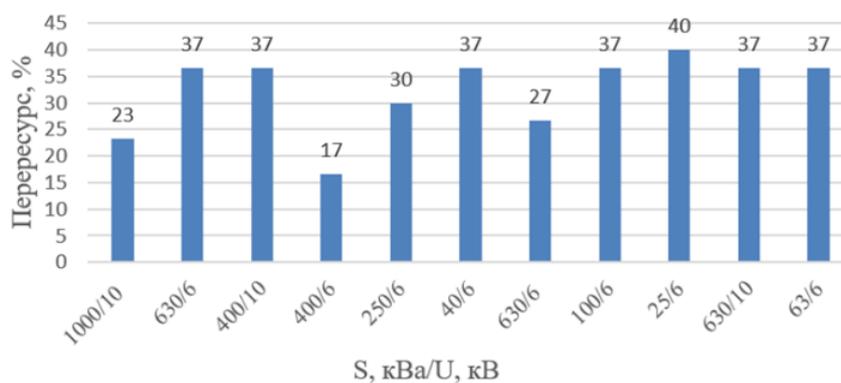


Рис. 2. Распределение «перересурса» силовых трансформаторов типа ТМГ

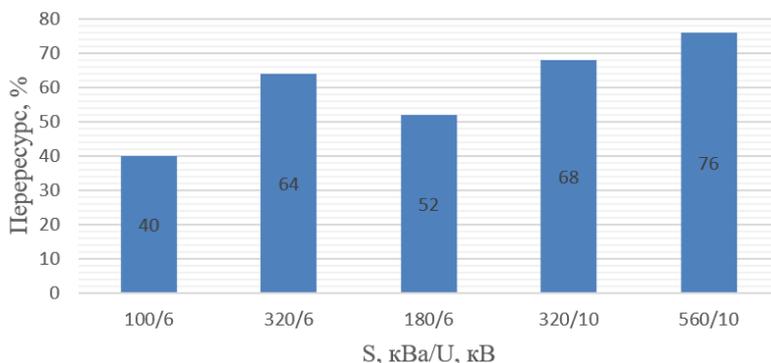


Рис. 3. Распределение «перересурса» силовых трансформаторов типа ТСМА

Анализ представленных данных показывает, что «перересурс» основной части силовых трансформаторов различного типа составляет от 35 до 75%, а в течение ближайших 5–10 лет этот показатель может увеличиться еще на 15% и более. Данное обстоятельство приводит к возрастанию количества отказов, дефектов и неисправностей силовых трансформаторов.

В современных условиях обновление парка силовых трансформаторов объектов военной инфраструктуры в ближайшее время не ожидается. В связи с чем возникает вопрос об исследовании возможности продления технического ресурса существующих силовых трансформаторов. Оборудование, работающее сверх назначенного срока службы, требует выполнения комплекса мероприятий, направленных на решение следующих важнейших задач:

- определение технического состояния электрооборудования в условиях изменяющихся эксплуатационных воздействий;
- выявление вида и степени риска дефекта;
- прогнозирование остаточного технического ресурса.

Данные задачи достаточно обширны и требуют конкретизации в зависимости от типа оборудования и его места в СЭС ОВИ.

Анализ литературы [2–4] показал, что при эксплуатации силовых трансформаторов характерные повреждения можно обобщить и классифицировать их по повреждениям в основных узлах (компонентах) силовых трансформаторов. Данная классификация показана на рис. 4.



Рис. 4. Классификация характерных повреждений силовых трансформаторов

Статистика распределения характерных повреждений силовых трансформаторов представлена на рис. 5, из которого видно, что основная часть повреждений происходит в обмотках силовых трансформаторов и составляет 36% от всех повреждений.



Рис. 5. Статистика распределения повреждений силовых трансформаторов

К основным неисправностям, связанным с обмотками силовых трансформаторов, относятся:

- короткие замыкания между обмотками или витками;
- короткие замыкания между параллельными проводниками;
- обрывы цепи в параллельных проводниках;
- замыкание на бак трансформатора;
- механическая деформация;
- проблемы с контактами, обрывы цепи.

### **ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Для выявления неисправностей силовых трансформаторов, анализ которых проведен выше, могут применяться различные методы [5]:

- измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь;
- измерение омического сопротивления обмоток и проверка состояния РПН;
- измерение коэффициента трансформации;
- измерение тока намагничивания;
- измерение тока и потерь холостого хода при малом напряжении;
- измерение частотной характеристики потерь рассеяния (FRSL) и др.

Каждый из этих методов позволяет выявлять от одной до трех приведенных выше неисправностей.

Более широкими возможностями обладает метод анализа частотных характеристик обмоток. По оценкам специалистов [6–9], данный метод позволяет выявлять пять из указанных выше неисправностей (кроме замыкания на бак трансформатора).

В настоящее время все чаще появляются публикации по вопросам использования частотных характеристик для оценки технического состояния электрооборудования, включая силовые трансформаторы. Метод частотных характеристик базируется на следующих соображениях. Силовой трансформатор можно рассматривать с позиций теоретической электротехники и теории электрических цепей как электрическую цепь, содержащую резисторы,

индуктивности и емкости. А для ее анализа и расчета использовать все методы, известные из теоретической электротехники и теории электрических цепей.

Существуют два основных подхода к исследованию различных систем. Первый подход связан с исследованием систем во временной области (исследуются временные характеристики), второй – в частотной области (исследуются частотные характеристики). Использование первого подхода целесообразно лишь в случае возможности измерения интересующих исследователя фазовых координат, что в рассматриваемом случае представляется затруднительным. Исследование в частотной области представляется весьма перспективным, поскольку каждая электрическая цепь имеет уникальные частотные характеристики: амплитудную частотную характеристику  $A(\omega)$  и фазовую частотную характеристику  $\psi(\omega)$ , вид которых определяется параметрами цепи.

Частотные характеристики определяют зависимость между входной и выходной величинами цепи в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале. По частотным характеристикам можно судить о свойствах цепи, по их изменениям в процессе эксплуатации – об изменении тех или иных параметров.

Частотные характеристики динамических систем могут определяться экспериментальным способом, предполагающим наличие генератора входных гармонических колебаний, датчиков для преобразования входных и выходных величин в электрический сигнал и устройства для фиксации амплитуд на входе  $X_{1m}$  и выходе  $X_{2m}$  системы и фазового сдвига  $\psi$ .

В практике исследования динамических систем частотные характеристики определяются по частотной передаточной функции  $W(j\omega)$  следующим образом:

$$A(\omega) = |W(j\omega)|; \psi(\omega) = \arg W(j\omega).$$

Для оценки динамических свойств звеньев широко используются логарифмические частотные характеристики: амплитудная и фазовая. Логарифмическая амплитудная характеристика (ЛАХ) определяется из соотношения

$$L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| = 20 \lg A(\omega)$$

и выражается в децибелах (дБ).

Логарифмическая фазовая характеристика (ЛФХ) определяется из соотношения

$$\psi(\omega) = \arg W(j\omega).$$

Построение ЛАХ и ЛФХ приводит в системах координат  $L, \omega$  и  $\psi, \omega$  соответственно.

В иностранной литературе представление частотных характеристик в логарифмическом масштабе получило название диаграммы Боде или графика Боде, по имени выдающегося инженера Хенрика Боде (англ. *Hendrik Wade Bode*).

В общем виде передаточную функцию разомкнутой динамической системы можно представить как

$$W(p) = k \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + 1}{p^r (c_0 p^{n-r} + c_1 p^{n-r-1} + \dots + c_{n-r-1} p + c_{n-r})}$$

где  $k$  – коэффициент передачи системы;

$r$  – порядок астатизма системы  $r \geq 0$ .

Она является отношением полиномов, коэффициенты которых  $c_i, b_j$  определяются параметрами системы (постоянными времени, коэффициентами), которые, в свою очередь, определяются параметрами рассматриваемой электрической цепи (значениями сопротивлений, индуктивностей, емкостей).

Любые изменения параметров электрической цепи приведут к изменению коэффициентов передаточной функции и, как следствие, к изменению логарифмических частотных характеристик.

В общем случае силовой трансформатор является нелинейным звеном, поэтому получение его передаточной функции в аналитическом виде, достаточно полно описывающей процессы в силовом трансформаторе, вызывает определенные трудности [10]. В связи с этим ре-

альные частотные характеристики силового трансформатора следует определять экспериментальным способом.

Для подтверждения возможности применения метода частотных характеристик (МЧХ) на практике была использована имитационная модель линейного однофазного трансформатора, показанная на рис. 6.

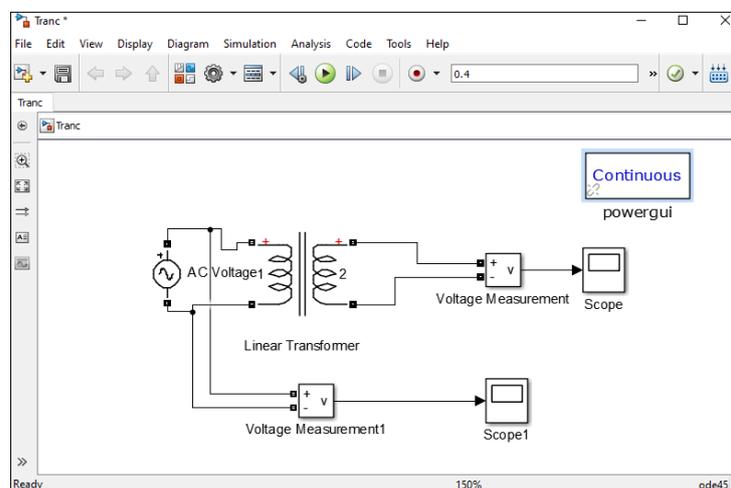


Рис. 6. Имитационная модель линейного однофазного трансформатора в программе MatLab

На рис. 7 представлены его логарифмические частотные характеристики, полученные при номинальных значениях параметров модели (характеристики 1), при измененных параметрах (сопротивления и индуктивности) первичной обмотки (характеристики 2), при измененных параметрах (сопротивления и индуктивности) вторичной обмотки (характеристики 3).

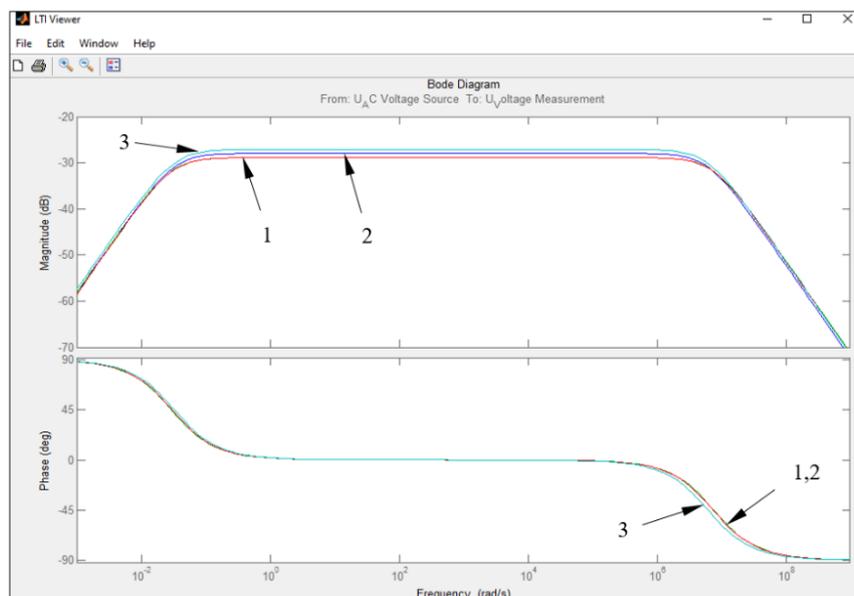


Рис. 7. Логарифмические частотные характеристики однофазного трансформатора в программе MatLab:

1 – при номинальных значениях числа витков в первичной и вторичной обмотках;  
2 – при уменьшении числа витков в первичной обмотке на 10%; 3 – при уменьшении числа витков во вторичной обмотке на 10%

Приведенные логарифмические частотные характеристики (характеристики 2, 3) свидетельствуют об их смещении при изменении параметров первичной и вторичной обмоток относительно характеристик при номинальных (базовых) параметрах обмоток.

К изменению параметров (сопротивлений, индуктивностей и емкостей) могут привести витковые замыкания, изменения геометрии обмоток вследствие деформаций, смещения, распрессовки и других причин.

Вид приведенных логарифмических частотных характеристик хорошо согласуется с передаточной функцией, полученной для упрощенной модели трансформатора [10], которая может быть приведена к виду

$$W(p) = \frac{U_2}{U_1} = k \frac{p}{c_0 p^2 + c_1 p + 1}.$$

Частотные характеристики реального силового трансформатора имеют более сложный вид по причине наличия насыщения, емкостных параметров и т. д.

Использование частотных характеристик для оценки технического состояния получает все большее распространение, особенно после принятия в 2012 году Международной электротехнической комиссией стандарта IEC 60076-18 [11], в соответствии с которым метод оценки механической целостности сердечника, обмоток и зажимных конструкций в силовых трансформаторах путем измерения их частотных характеристик получил название «анализ частотной характеристики развертки» (*Sweep frequency response analysis – SFRA*).

В России в 2020 году принят ГОСТ Р 59239-2020 [12], который определяет основные положения метода частотных характеристик для выявления повреждений в различных силовых трансформаторах (автотрансформаторах), реакторах с помощью измерения частотных характеристик. В стандарте определены требования к измерительному оборудованию, разновидности схемы подключения проверочного оборудования к силовому трансформатору, а также частотный диапазон для применения на месте эксплуатации и в условиях завода-изготовителя.

С помощью анализа частотной характеристики возможны: обнаружение деформации обмотки или ее частичного нарушения, получение информации о смещении сердечника, выявление смещений между обмотками высокого и низкого напряжения, а также обнаружение короткого замыкания или обрыва витков. Кроме того, по результатам МЧХ (SFRA) можно говорить о проблемах с подключением обмоток, сломанных зажимных конструкциях, неисправном заземлении или о проблемах с подключением.

К достоинствам МЧХ следует отнести:

– возможность получения надежной оценки исправности силового трансформатора без его разборки и без подачи высоких напряжений;

– высокую чувствительность метода, которая объясняется тем, что даже незначительные локальные изменения положения элементов обмотки (витков, катушек, отводов) приводят к изменению соответствующих емкостей и индуктивностей, а значит, и к изменению собственных частот колебаний обмотки.

Вместе с тем, поскольку МЧХ (SFRA) базируется на сравнении между частотными характеристиками, которые характеризуют изменения объекта, то для применения метода необходимо располагать некоторыми эталонными характеристиками. В качестве таких характеристик могут использоваться полученные ранее результаты измерений конкретного устройства либо результаты частотных характеристик идентичного силового трансформатора, а также возможно сравнение результатов, полученных с разных фаз одного силового трансформатора.

Однако следует учитывать, что каждый силовой трансформатор (даже типовой) обладает своими уникальными частотными характеристиками, свойственными только ему. Именно поэтому принятые стандарты рекомендуют выполнять такие измерения в завершении заводских приемо-сдаточных испытаний для получения исходных характеристик трансформатора, затем после транспортировки устройства и во время ввода его в эксплуатацию. В этом случае будет обеспечиваться наибольшая эффективность метода.

Следует отметить, что практическая реализация данного метода в настоящее время возможна, например, с использованием анализатора частотной характеристики с разверткой DV Power FRA500 или переносного прибор марки FreDA (*Frequency Domain Analyzer*).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в процессе эксплуатации силовые трансформаторы могут подвергаться силовому воздействию токов короткого замыкания, которое представляет собой мощный механический удар по обмоткам и их изоляции. В результате обмотки силового трансформатора могут деформироваться, а твердая изоляция – повреждаться.

Учитывая, что значительная часть парка силовых трансформаторов эксплуатируется за пределами сроков службы, разработка и внедрение новых методов выявления дефектов и повреждений имеют весьма важное значение для оценки исправности силовых трансформаторов, находящихся в эксплуатации, для определения возможности продления их технического ресурса.

Для повышения достоверности оценки исправности силового трансформатора при внедрении новых методов следует учитывать возможность комбинированного использования других методов обнаружения неисправностей.

## Список используемых источников

1. Эксплуатация космических средств : учебник / Г. Д. Петров [и др.]; под ред. А. П. Вышинского. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – 455 с.
2. Козлов А. Н. Диагностика электроустановок : учеб. пособие. – Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2014. – 106 с.
3. Чичинский М. И. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния // Энергетик. – 2000. – № 11. – С. 29–31.
4. Марков Е. В. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов электроэнергетических систем // Молодой ученый. – Казань, 2023. – С. 11–14.
5. Козлов А. Н. Диагностика электроустановок : учеб. пособие. – Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2014. – 106 с.
6. Александров Н. М. Диагностические модели деформации обмоток силовых трансформаторов. Уравнения электродинамических сил // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – № 1. – С. 12–15.
7. Александров Н. М., Золотаев Р. В. Методы диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов // Сборник докладов II Международной конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». – 2018. – С. 194–198.
8. Александров Н. М., Хренников А. Ю. Методы интерпретации результатов частотного анализа обмоток силовых трансформаторов // Материалы III Международной научно-

технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». – 2019. – С. 415–421.

9. Переносной прибор «FreDA» : руководство по эксплуатации / ООО «ДИМРУС» (г. Пермь). – URL: <https://dimrus.ru> (дата обращения: 14.09.2023).

10. Жуйков В. Я., Кузнецов Н. Н. Анализ передаточных функций трансформатора с использованием метода гармонического баланса // Электроника и связь. Электроника и нанотехнологии : тематич. вып. – 2011. – № 4(63). – С. 87–92.

11. IES 60076-18. Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response. – 2012. – URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec60076-18%7Bed1.0%7Db.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60076-18%7Bed1.0%7Db.pdf) (дата обращения: 15.09.2023).

12. ГОСТ Р 59239-2020 (МЭК 60076-18:2012). Трансформаторы силовые и реакторы. Метод измерения частотных характеристик. – М. : Изд-во стандартов, 2021. – 45 с.

В. В. Какаев,  
*доктор военных наук, доцент;*  
С. В. Куликов,  
*кандидат технических наук;*  
С. В. Логунов,  
*кандидат технических наук;*  
Д. С. Федоренко,  
*кандидат технических наук*

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ДОЛЕЙ ИХ СОДЕРЖАНИЯ НА ВИДИМОЙ ПОВЕРХНОСТИ БЕЗАТМОСФЕРНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ**

В статье предложена методика определения материалов и долей их содержания на видимой поверхности безатмосферных небесных тел, основанная на модели формирования спектров отражения по линейному закону в зависимости от пропорциональной величины площадей структурных элементов исследуемых объектов. Методика может быть использована при анализе спектров отражения объектов, полученных при астрономических наблюдениях, с учетом влияния возмущающих воздействий на точность определения долей содержания.

Ключевые слова: спектр отражения, безатмосферное небесное тело, спектрофотометрия, спектральный коэффициент отражения, метод наименьших квадратов.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Актуальной задачей астрономических наблюдений является определение материалов и долей их содержания на видимой поверхности безатмосферных небесных тел (БНТ) – планет, астероидов, комет. Возможности существующих наблюдательных средств по получению информации о таких объектах в настоящее время получили существенное развитие, в том числе за счет использования в астрономических наблюдательных оптико-электронных средствах спектрофотометрических устройств, способных получать спектры отражения БНТ. Указанные возможности приводятся в работах [1–4], где исследовались дополнительные информативные признаки, которые можно получить в результате обработки спектрофотометрических измерений (СФИ).

*Спектрофотометрия* – это дистанционный метод оценки состава вещества, основанный на сравнении спектров отражения солнечного излучения объектов с лабораторными спектрами отражения их вероятных образцов-аналогов [5]. Под спектром отражения будем понимать отношение интенсивностей отраженного от объекта потока излучения к падающему потоку как функцию длины волны [6].

Проблеме интерпретации СФИ посвящен ряд работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Вместе с тем некоторые вопросы до сих пор остаются нерешенными. Предприняты попытки определения не только материалов, но и их долей содержания на видимой поверхности [7, 8]. Однако в результате применения авторами метода неотрицательной матричной факторизации возникают большие ошибки при определении указанных выше параметров, что негативно сказывается на достоверности принимаемых решений по идентификации БНТ. Кроме того, отечественными специалистами проблема количественной интерпретации спектров отражения рассматривается в условиях наличия гипотезы о составе материалов наблюдаемого объекта, что не всегда обоснованно [9].

Для устранения вышеуказанных противоречий в области спектрофотометрии БНТ в исследовании предложена методика определения материалов и долей их содержания на видимой поверхности исследуемых объектов. Такая методика основана на модели формирования спектров отражения по линейному закону в зависимости от пропорциональной величины

площадей структурных элементов поверхности. Причем методика работает в условиях отсутствия априорной информации о наблюдаемом БНТ.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Результатом спектрофотометрических наблюдений БНТ является спектр отражения. В нем как раз и содержится информация о материалах и долях их содержания. Как указано в работе [5], главная проблема при получении спектра отражения (причем следует понимать, что он не регистрируется, а представляет собой расчетную или модельную характеристику) состоит в том, что изучаемый объект и Солнце невозможно наблюдать одновременно или хотя бы с разницей во времени в пределах нескольких часов при одинаковых атмосферных условиях. В течение одной наблюдательной ночи можно провести только измерение спектров исследуемого объекта и заменяющей Солнце звезды или солнечного аналога, близкого к нему по физическим и химическим параметрам.

Для моделирования таких спектров используется концепция линейного смешивания [11], которая заключается в следующем: если общая площадь видимой поверхности наблюдаемого объекта делится пропорционально в соответствии с долей содержания присутствующих на ней материалов, то отраженное объектом излучение передает характеристики соответствующих материалов в тех же пропорциях. В этом смысле существует линейная связь между пропорциями материалов, составляющих видимую поверхность, и спектром отраженного излучения. Схематично этот процесс представлен на рис. 1.

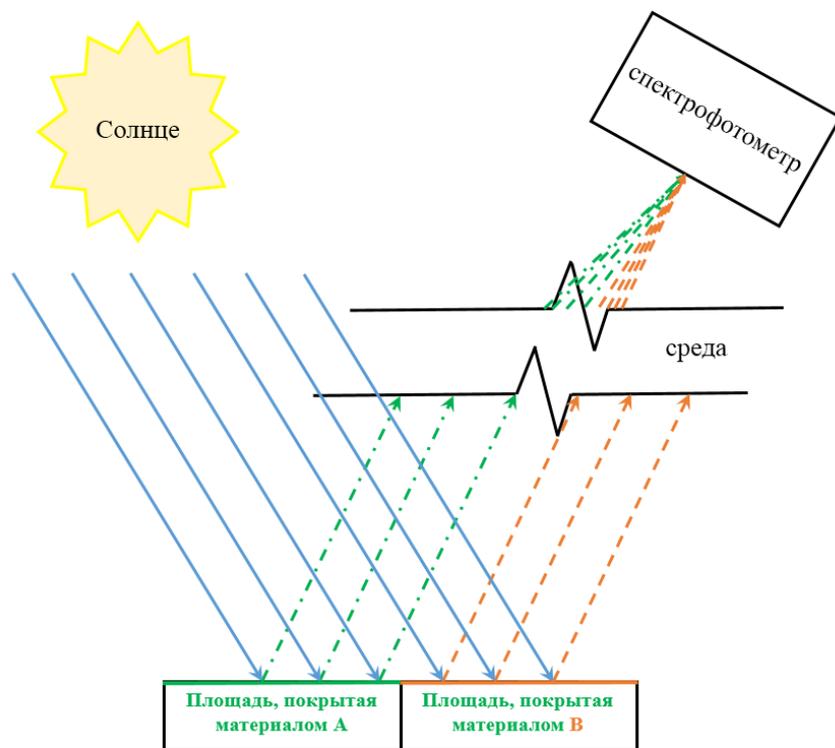


Рис. 1. Схематичное представление линейного смешивания спектра отражения

Таким образом, имея априорные данные о химическом составе БНТ (т. е. задавая его самостоятельно), можно на основе базы данных спектров отражения земных материалов и материалов с других планет лаборатории *Reflectance Experiment Laboratory (RELAB)* [10] смоделировать спектр отражения, который мы ожидаем получить в результате сеанса спектрофотометрических измерений.

Однако на практике имеют дело с обратной задачей – по спектру отражения, полученному в результате натуральных наблюдений БНТ наземным телескопом, определить состав веществ его поверхности. Ниже представлена формализованная постановка данной задачи.

*Исходные данные:*

1.  $\mathbf{M} = \{\mathbf{m}_{ij}\}_{i,j=1}^{m,n}$  – база данных материалов (БД М). Столбцы этой матрицы – лабораторные спектры отражения материалов в определенном диапазоне длин волн.
2.  $\mathbf{X} = \{x_i\}_{i=1}^n$  – вектор долей содержания материалов.
3.  $\mathbf{S} = \{s_j\}_{j=1}^m$  – спектр отражения БНТ.

*Необходимо:*

1. Найти  $\mathbf{X}$  при условии, что известны только  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{M}$ .
2. Сравнить рассчитанные  $x_i$  с исходными значениями, использованными при моделировании  $\mathbf{S}$ , и оценить ошибку.

*Допущения и ограничения:*

1.  $x_i \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^n x_i$  (доли содержания не могут быть отрицательными, так как по своей сути это значения относительных площадей отдельных участков поверхности КО, в сумме дающих 1).
2. Рассматриваются наблюдения БНТ при фазовых углах от 0 до 30 градусов, что позволяет использовать спектры отражения лабораторных образцов материалов без внесения дополнительных коэффициентов. Кроме того, как следует из [5], форма спектров отражения БНТ на таких фазовых углах остается практически неизменной или меняется очень слабо, соответственно, особенности их химико-минерального состава будут описаны правильно.
3. Согласно работе [5] измерение спектра БНТ выполняется принятым в астрофизике дифференциальным методом, т. е. путем сравнения световых потоков от БНТ и стандартной звезды:

$$E(\lambda) = kE_{cз}(\lambda)[I(\lambda)/I_{cз}(\lambda)]f(\lambda)^{-\delta M}, \quad (1)$$

- где
- $E_{cз}(\lambda)$  – монохроматическая (на длине волны  $\lambda$ ) освещенность верхней границы земной атмосферы (условно) стандартной звездой, известная из некоторого опубликованного источника, эрг/см<sup>2</sup>·с·Å;
  - $k$  – некоторый постоянный коэффициент, зависящий от регистрирующей аппаратуры;
  - $I(\lambda)$  и  $I_{cз}(\lambda)$  – величины интенсивности излучения (количество фотонов за единицу времени) на приемнике от наблюдаемого объекта и стандартной звезды соответственно, из которых исключен фон неба;
  - $f(\lambda)$  – функция спектральной прозрачности атмосферы, рассчитанная для данной наблюдательной ночи (при условии, что в течение ночи она примерно постоянна);
  - $\delta M$  – разность воздушных масс ( $M(z) = 1/\cos z$ , где  $z$  – зенитное расстояние) для объекта и стандартной звезды,  $\delta M = M - M_{cз}$ .

Важным преимуществом такого метода получения спектров является возможность исключения постоянных мультипликативных погрешностей, имеющих одновременно в измеряемых спектрах объектов и стандартов. В число таких погрешностей входят какие-либо инструментальные особенности и атмосферные условия наблюдений. Соответственно, оптимальный подбор стандартных звезд или хороших солнечных аналогов значительно снижает шумовую компоненту в спектрах отражения.

4. Влияние атмосферы на распространение отраженного от БНТ излучения учитывается путем добавления к спектру  $\mathbf{S}$  вектора шума  $\mathbf{N}$ , значения которого можно задавать в зависимости от рассматриваемого случая.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ДОЛЕЙ ИХ СОДЕРЖАНИЯ НА ВИДИМОЙ ПОВЕРХНОСТИ БЕЗАТМОСФЕРНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Ввиду того что база данных всех возможных материалов [10] имеется в наличии, спектр отражения  $\mathbf{S}$  можно представить как

$$\mathbf{S} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{X}. \quad (2)$$

Тогда, решив уравнение (2) относительно  $\mathbf{X}$ , мы найдем значения  $x_i$ ,  $i = 1 \dots n$ , причем по тем  $x_i$ , которые приняли ненулевое значение, можно судить о материалах, входящих в состав БНТ: значение  $i$  укажет на номер столбца матрицы  $\mathbf{M}$ . Само значение ненулевого  $x_i$  есть доля содержания соответствующего материала.

Таким образом, решение задачи, поставленной в данной работе, сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), состоящей из  $m$  уравнений с  $n$  неизвестными. В рассматриваемом случае  $m > n$ , поэтому СЛАУ является переопределенной. Очевидно, что в большинстве случаев «настоящего» решения (такого, которое обращало бы уравнения в тождества) такой системы не существует.

Тогда вместо точного решения системы уравнений следует организовать поиск такого вектора  $\mathbf{X}$ , который будет наилучшим образом удовлетворять всем уравнениям, т. е. минимизировать их *невязку* (расхождение между вектором  $\mathbf{M} \cdot \mathbf{X}$  и вектором правой части СЛАУ  $\mathbf{S}$ ). Поскольку невязка  $\mathbf{M} \cdot \mathbf{X} - \mathbf{S}$  является векторной величиной, то, исходя из практических соображений, минимизации надо подвергать ее норму (т. е. скаляр)  $|\mathbf{M} \cdot \mathbf{X} - \mathbf{S}|$ . Этот подход позволит, с одной стороны, получить разумное с физической точки зрения решение задачи, а с другой – использовать полезную информацию, заключенную во всех уравнениях. Таким образом, при интерпретации переопределенных СЛАУ принято искать не точное решение (которого, как уже отмечалось, при данной постановке задачи просто нет), а *псевдорешение* – вектор, минимизирующий норму невязки системы уравнений. Таким образом, задача решения линейной системы уравнений заменяется задачей отыскания глобального минимума функции  $f(x) = |\mathbf{M} \cdot \mathbf{X} - \mathbf{S}|$ . Поскольку эта минимизируемая норма зависит от суммы квадратов компонент неизвестного вектора, то процедура поиска псевдорешения является не чем иным, как реализацией метода наименьших квадратов (МНК).

Чтобы учесть накладываемые на элементы вектора  $\mathbf{X}$  линейные ограничения ( $x_i \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^n x_i$ ), использовалась функция *minimize*, встроенная в программный пакет *Mathcad*.

Таким образом, разработанная методика определения материалов и долей их содержания на видимой поверхности удаленных космических объектов на основе анализа спектров отражения заключается в реализации следующей последовательности шагов.

1. Формирование БД эталонных спектров отражения, включающую весь набор доступных материалов. Полнота этой БД будет значительно влиять на качество решения поставленной задачи. Кроме того, следует отметить, что необходимо измерять спектральные характеристики минералов в как можно более широком диапазоне и с максимально возможным разрешением по длине волны (порядка 5–15 нм). Это должно обеспечить фиксацию максимального числа характерных особенностей спектров отражения материалов, что, в свою очередь, приведет к более качественному решению СЛАУ (2).

2. Получение спектра отражения БНТ в ходе спектрофотометрических наблюдений с соблюдением аналогичных требований, что и для БД минералов: максимальный диапазон и максимальная разрешающая способность спектрофотометра, установленного на наблюдательном средстве.

3. Приведение данных БД минералов и полученного спектра отражения к одному масштабу (в том случае, если спектр отражения получен в другом диапазоне).

4. Поиск псевдорешения СЛАУ (2) с помощью метода наименьших квадратов с ограничениями на элементы вектора  $\mathbf{X}$ , отражающих физический смысл формирования спектра отражения БНТ:  $x_i \geq 0, \sum_{i=1}^n x_i = 1$ .

5. Определение ненулевых  $x_i$  и соответствующих им материалов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Смоделируем, согласно условия (2), спектр отражения произвольного БНТ (рис. 2), имеющего в своем составе ортопироксен, палласит и железо. Спектры отражения указанных веществ взяты из [10]. Примем, что доли их содержания составят 0,2:0,6:0,2 соответственно.

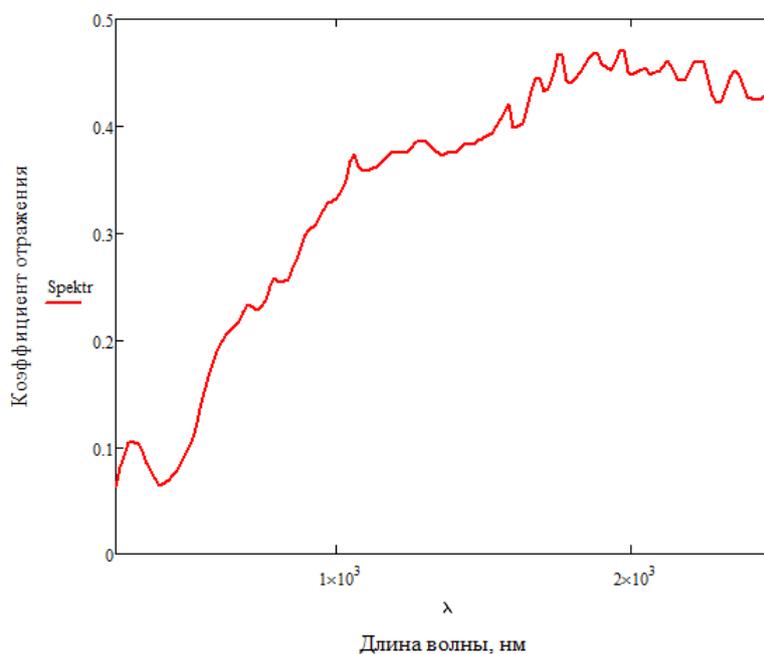


Рис. 2. Смоделированный спектр отражения исследуемого БНТ

Ниже представлены результаты решения уравнения (2) для рассматриваемого случая без учета влияния атмосферы (табл.1).

Таблица 1

### Результаты количественной интерпретации спектра отражения БНТ (без шумовой составляющей)

Материал	Доля содержания	Материал	Доля содержания	Материал	Доля содержания
Ахондрит	0	Палласит	0,6	Фаялит	0
Базальт	0	Пироксен	0	Ферросилит	0
Железо	0,2	Полевой шпат	0	Форстерит	0
Магнетит	0	Серпентин	0	Хибонит	0
Никель	0	Тектит	0	Хлорит	0
Оливин	0	Углерод	0	Энстатит	0
Ортопироксен	0,2	Уреилит	0		

Как видно из табл. 1, значения для заданных материалов (выделены в таблице серым цветом) полностью соответствуют исходным, для остальных же имеют нулевые значения.

Теперь смоделируем влияние атмосферы, добавив к смоделированному спектру отражения БНТ шумовую составляющую (рис. 3). Для этой цели использовалась встроенная в *Mathcad* функция *rnorm* с параметрами  $150;0; 4,716 \cdot 10^{-3}$ , где первое значение – это количество элементов формируемого вектора, второе – математическое ожидание, третье – СКО.

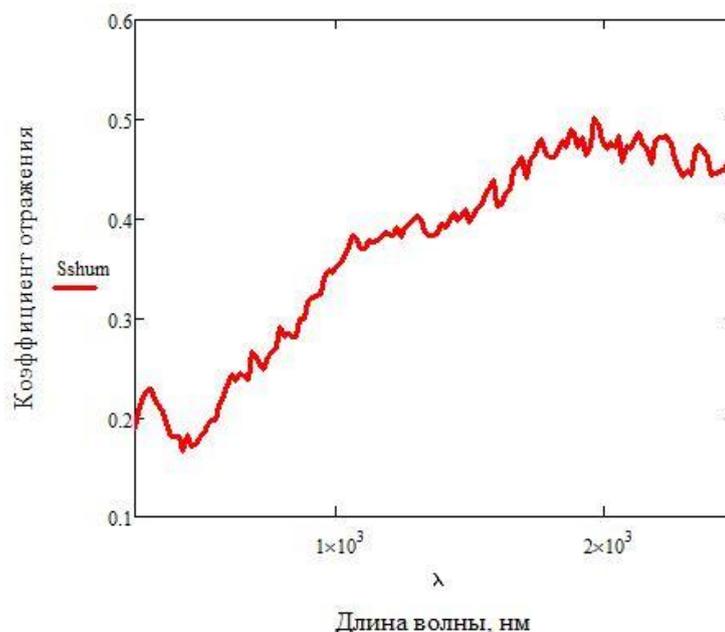


Рис. 3. Смоделированный (красный) и зашумленный (синий) спектры отражения БНТ

Ниже представлены результаты решения уравнения (1) для зашумленного спектра отражения БНТ (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты количественной интерпретации спектра отражения БНТ  
(с шумовой составляющей)**

Материал	Доля содержания	Материал	Доля содержания	Материал	Доля содержания
Ахондрит	0	Палласит	0.551	Фаялит	0
Базальт	0	Пироксен	0.03	Ферросилит	0
Железо	0.219	Полевой шпат	0	Форстерит	0
Магнетит	0	Серпентин	0	Хибонит	0
Никель	0	Тектит	0	Хлорит	0
Оливин	0	Углерод	0	Энстатит	0
Ортопироксен	0.19	Уреилит	0		

Анализ табл. 2 показывает, что при определении истинных долей содержания материалов появляется незначительная ошибка (от 1 до 5%). Кроме того, появился новый материал – пироксен – с долей содержания 0,03. Здесь поясним, что возможность вычисления точности определения долей содержания имеется по объективным причинам: рассчитанные значения сравниваются с задаваемыми при моделировании спектра отражения *S*.

Однако дальше возникает естественный вопрос о точности расчета долей содержания материалов, ведь реализация метода наименьших квадратов с линейными ограничениями, когда

производится псевдообращение матриц, возможна с использованием нескольких различных алгоритмов (метод Гревилля, рекуррентный алгоритм Фадеева, метод множителей Лагранжа и др.). Сравнительный анализ таких алгоритмов, приведенный в [12], показывает, что на современном этапе развития программных математических продуктов (*MathCad*, *MatLab* и т. п.) с точки зрения точности они могут различаться лишь начиная с 3-4-го знака после запятой. Это могло бы соответствовать точности в определении относительных площадей объектов, покрытых тем или иным минералом, вплоть до единиц квадратных сантиметров. Однако в рамках ситуации, рассматриваемой в данной статье, когда расстояние до наблюдаемых объектов составляет десятки тысяч километров, такие точности не представляют никакой практической ценности (слишком значительно будет влияние возмущающих факторов).

Теперь увеличим амплитуду шума (рис. 4) и оценим, как это повлияло на точность определения материалов. Для этого зададим параметры функции  $morm\ 150;0; 9,432 \cdot 10^{-3}$ .

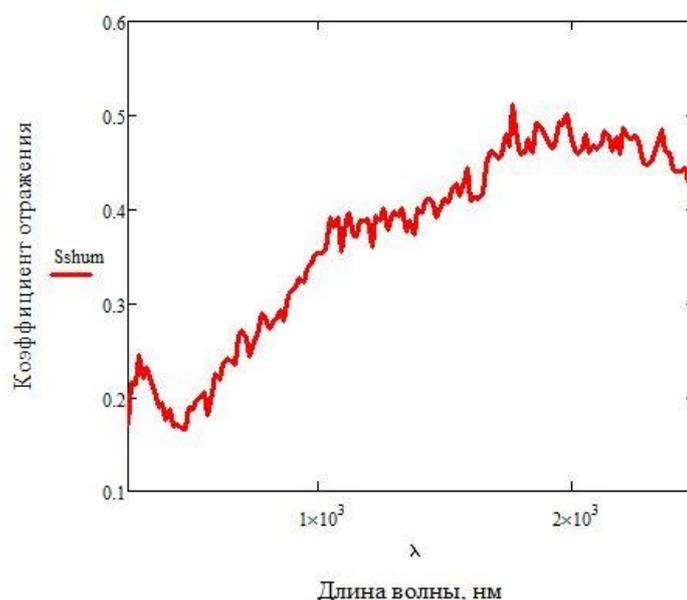


Рис. 4. Смоделированный (красный) и зашумленный (синий) спектры отражения БНТ

Ниже представлены результаты решения уравнения (2) для зашумленного спектра отражения БНТ (табл.3).

Таблица 3

**Результаты количественной интерпретации спектра отражения БНТ  
(с увеличенной шумовой составляющей)**

Материал	Доля содержания	Материал	Доля содержания	Материал	Доля содержания
Ахондрит	0	Палласит	0.541	Фаялит	0
Базальт	0	Пироксен	0,037	Ферросилит	0
Железо	0.27	Полевой шпат	0	Форстерит	0
Магнетит	0	Серпентин	0	Хибонит	0
Никель	0	Тектит	0	Хлорит	0
Оливин	0	Углерод	0	Энстатит	0
Ортопироксен	0.142	Уреилит	0		

Из полученных данных следует, что исходные материалы по-прежнему определены верно, а ошибка определения истинных долей содержания незначительно увеличилась и составила для ортопироксена 5,8%, для палласита 5,9%, для железа 7%. Наличие постороннего материала (пироксен) вновь подтвердилось с незначительным увеличением доли содержания до 0,037 (на 0,7%), что, как и в предыдущем случае, объясняется погрешностями в вычислениях с использованием МНК и не должно вводить аналитиков в заблуждение по поводу истинного состава материалов БНТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика на основе анализа спектров отражения позволяет получить новые данные для изучения БНТ: перечень минералов и доли их содержания на видимой поверхности объекта. Это позволит значительно повысить эффективность мониторинга космического пространства, глубже проникнуть в природу образования Вселенной.

Результаты моделирования показали, что методика позволяет правильно определять перечень минералов БНТ в условиях наличия шума при проведении спектрофотометрических измерений. В то же время расчеты показали, что с увеличением амплитуды шума в данных растет ошибка определения долей содержания минералов, которая может составить от 5 до 7%.

Дальнейшее развитие предложенной методики планируется проводить по следующим направлениям:

- определение зависимости долей содержания МиП от угла ориентации поверхностей КО;
- оценка влияния атмосферных возмущений на процесс обработки СФИ;
- порядок проведения спектрофотометрических измерений по низкоорбитальным КО.

## Список используемых источников

1. *Логунов С. В., Черногубов А. В., Федоренко Д. С.* Определение конструктивных особенностей вращающегося геостационарного спутника на основе анализа двухцветных диаграмм // Вопросы радиоэлектроники. Сер. : Техника телевидения. – 2018. – № 4. – С. 34–41.
2. Совместная обработка и анализ некоординатной информации о геостационарном спутнике для определения конструктивных особенностей / С. В. Логунов [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер. : Техника телевидения. – 2018. – Вып. 2. – С. 61–69.
3. Исследование состояния аварийного геостационарного спутника по данным фотометрических наблюдений / А. В. Багров [и др.] // Околосолнечная астрономия и проблемы изучения малых небесных тел Солнечной системы : сб. науч. тр. конф., г. Обнинск, 25–29 окт. 1999 г. – М. : Институт астрономии, 2000. – С. 276–290.
4. *Муртазов А. К.* Мониторинг околоземного пространства оптическими средствами : моногр. – Рязань: РГУ им. С. А. Есенина, 2010. – 248 с.
5. *Бусарев В. В.* Спектрофотометрия астероидов и ее приложения. – Саарбрюккен, 2011. – 260 с.
6. *Вязьмин С. Ю., Рябухин Д. С., Васильев А. В.* Электронная спектроскопия органических соединений : учеб. пособие. – СПб. : СПбЛТА, 2011. – 43 с.
7. Object Characterization from Spectral Data Using Nonnegative Matrix Factorization and Information Theory / J. Piper [et al.] // Proc. AMOS Tech Conf., 2004. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/228971746\\_Object\\_characterization\\_from\\_spectral\\_data\\_using\\_nonnegative\\_factorization\\_and\\_information\\_theory](https://www.researchgate.net/publication/228971746_Object_characterization_from_spectral_data_using_nonnegative_factorization_and_information_theory) (дата обращения: 10.10.2022).
8. Object Characterization from Spectral Data / K. Luu [et al.] // Proc. AMOS Technical Conference. – Maui, HI, 2003. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Object-Characterization->

from-Spectral-Data-Using-Piper-Pauca/43a2b5628faec3d5e8b22a211d825a9e8c0cad5c (дата обращения: 10.10.2022).

9. *Резаева А. А., Щербина М. П.* Метод виртуального смешивания цифровых лабораторных спектров отражения известных минералов для получения количественной интерпретации спектров отражения астероидов // Сборник тезисов докладов XIV Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 14–29 ноября 2016 г. – М. : ИКИРАН, 2016. – С. 78–85.

10. NASA REFLECTANCE EXPERIMENT LABORATORY. – URL: [http://www.planetary.brown.edu/relabdocs/relab\\_disclaimer.htm](http://www.planetary.brown.edu/relabdocs/relab_disclaimer.htm) (дата обращения: 10.10.2022).

11. *Fedorenko D. S., Legkov K. E.* Modeling of the high-orbital satellite reflection spectrum based on materials and coatings laboratory reflection spectra // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications Conference, Moscow, 2020. – P. 9078649. – DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078649.

12. *Лумай В. Н.* Решение систем линейных алгебраических уравнений с использованием выборочной регуляризации // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2021. – Вып. 2. – С. 11–15.

В. В. Карагодин,  
*доктор технических наук, профессор;*  
Д. В. Рыбаков,  
*кандидат технических наук*

## **МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

В статье рассматривается решение задачи контроля работоспособности систем электроснабжения (СЭС) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ). Обоснована необходимость рассмотрения СЭС ОНКИ как сложных иерархически распределенных технических систем.

Изложено содержание предлагаемого метода оценивания работоспособности таких систем, основными этапами которого являются декомпозиция СЭС, составление математической модели, отражающей процессы ее функционирования, агрегирование технических состояний системы и получение оценки ее фактической работоспособности.

На примере оценивания работоспособности трансформаторной подстанции, как одного из основных элементов СЭС ОНКИ, проведена апробация предлагаемого метода.

Ключевые слова: система электроснабжения, контроль, диагностирование, метод оценивания работоспособности, декомпозиция, техническое состояние, теория распознавания образов.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в Вооруженных Силах Российской Федерации особую роль играют космические войска, выполняющие широкий спектр задач по обеспечению безопасности страны в космической сфере. Важные функции при решении задач по предназначению объектами космических войск выполняют СЭС, от уровня работоспособности которых зависит эффективность решения задач техническими системами, создающими необходимые условия для работы технологического оборудования и жизнедеятельности эксплуатирующего его личного состава.

Это делает актуальным решение проблемы своевременного контроля уровня работоспособности систем электроснабжения ОНКИ на всех этапах их эксплуатации и в любых условиях обстановки.

### **СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КАК СЛОЖНАЯ ИЕРАРХИЧЕСКИ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА**

Система электроснабжения объектов наземной космической инфраструктуры представляет собой сложную электротехническую систему кибернетического типа, включающую различные подсистемы, размещенные на значительных площадях и расстояниях. Подсистемы включают в себя определенные совокупности элементов СЭС, функционально связанных между собой. Иерархически подсистемы оказываются более крупными частями СЭС, чем отдельные ее элементы, но тем не менее детализирующими систему в целом. Представление системы электроснабжения ОНКИ в виде подсистем обусловлено необходимостью выделения взаимосвязанных элементов, выполняющих относительно независимые функции, направленные на достижение общей цели системы. В связи с этим СЭС ОНКИ можно отне-

сти к иерархически распределенным техническим системам<sup>1</sup>, обладающим свойством гетерогенности, которое характеризует разнородность ее элементов или частей в структуре.

Таким образом, СЭС ОНКИ должна рассматриваться, с одной стороны, как подсистема электроэнергетической системы, с другой – как система, включающая подсистемы или элементы более низкого уровня (например, элементы распределительных электрических сетей, СЭС зданий и сооружений и т. п.).

Необходимо отметить, что между отдельными подсистемами и элементами СЭС ОНКИ установлены функциональные и информационные связи и отношения. Зачастую термины «связь» и «отношения» в литературе используются как синонимы, однако существуют и другие точки зрения. Отношение – функционально-информационные связи, позволяющие исследовать режимы функционирования системы. Связь – это предельный случай отношения, позволяющий исследовать СЭС ОНКИ в установившихся (статических) режимах функционирования. Причем СЭС ОНКИ как единая структура существует благодаря наличию связей между ее элементами (подсистемами) [1]. С точки зрения системного анализа СЭС ОНКИ является эмерджентной, т. е. приобретает свойства, не присущие ее подсистемам и элементам.

Состояние СЭС ОНКИ определяется параметрами режима, т. е. показателями, определяющими качество функционирования системы электроснабжения. Несмотря на эмерджентность СЭС ОНКИ, ее свойства определяются физическими, техническими и другими характеристиками и параметрами элементов системы.

Система электроснабжения под воздействием различных факторов  $U(t)$  способна переходить из одного технического состояния  $X_i$  в другое  $X_{i+1}$ , иными словами, она обладает поведением, которое представляется как функция выхода системы

$$Y(t) = f[X(t), U(t)],$$

где  $X(t)$  – состояние системы;

$Y(t)$  – выход системы;

$U(t)$  – внешнее воздействие.

Сложность структуры СЭС, как правило, влечет за собой и сложность ее поведения, характеризующего разнообразием реакций на внешние воздействия.

Исследования работоспособности сложных иерархически распределенных технических систем, как правило, связаны с проблемой получения полной информации о ее техническом состоянии. Это, в свою очередь, связано со стохастичностью процессов, влияющих на техническое состояние систем, а также со сложностью их построения и функционирования, недостаточной наблюдаемостью в процессе эксплуатации. Разработка математического обеспечения процесса контроля технического состояния СЭС ОНКИ, позволяющего оценить уровень ее работоспособности, а в дальнейшем провести диагностирование внутренних причин неисправности подсистем (элементов), всегда сопровождается необходимостью преодоления возникающих при этом сложностей и неопределенностей, которые связаны:

– с невозможностью точного учета множества различных факторов, приводящих к изменению технического состояния системы;

– с невозможностью установления истинной причины изменения технического состояния системы. Это обуславливается заданными требованиями к глубине диагностирования, что не позволяет производить поиск причины изменения технического состояния с точностью до функциональных элементов некоторого уровня, а также ограниченным составом контролируемых параметров (признаков);

---

<sup>1</sup> *Иерархически распределенная техническая система* – это система, состоящая из совокупности подсистем или элементов, организованных по принципу иерархической структуры и взаимодействующих между собой для достижения определенных целей. В иерархически распределенной технической системе каждая подсистема или элемент выполняют свои функции, при этом они могут зависеть от подсистемы или элемента более высокого уровня и/или контролировать работу подсистемы либо элемента более низкого уровня.

– с неразличимостью отказов отдельных функциональных элементов на ограниченном множестве контролируемых параметров (признаков);  
 – с отсутствием необходимой полноты статистических данных о поведении СЭС ОНКИ при возникновении предотказных и неработоспособных состояний. При этом существующая информация является неоднородной и ограниченной.

В связи с вышеизложенным актуальна необходимость разработки метода исследования работоспособности гетерогенных иерархически распределенных технических систем, который позволил бы оценивать их работоспособность, преодолевая указанные сложности и неопределенности.

Применительно к исследуемой предметной области в качестве основы разрабатываемого метода могут быть использованы положения теории декомпозиции и агрегирования, а также теории распознавания образов.

### СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Необходимым условием, позволяющим оценить техническое состояние СЭС ОНКИ, является наличие информации о параметрах ее функционирования. Данные параметры могут быть получены либо с помощью измерительных комплексов, установленных в основных узлах СЭС ОНКИ, либо с помощью получившего в настоящее время широкое применение математического моделирования, в частности имитационных моделей СЭС [2, 3].

Для получения математического описания поведения СЭС ОНКИ в различных режимах и условиях эксплуатации, наиболее полно отражающего основные свойства и техническое состояние ее подсистем (элементов), следует провести ее комплексную (вертикальную и горизонтальную) декомпозицию (рис. 1), что позволит рассматривать систему как комплекс взаимосвязанных подсистем [4].

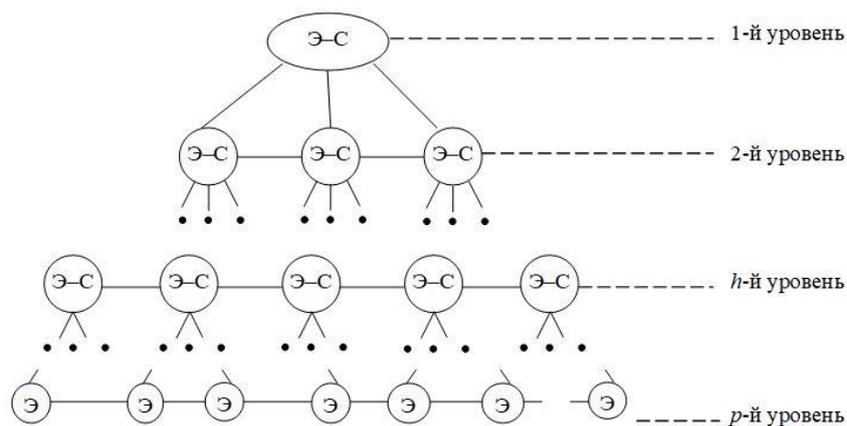


Рис. 1. Схема комплексной декомпозиции системы:

*Э-С* – части системы, которые могут рассматриваться и как элементы, и как системы; *Э* – составные части системы, которые рассматриваются только как элементы

Такое представление позволяет осуществлять последовательное управление подсистем более высоких уровней подсистемами низших уровней. Одновременно имеет место зависимость функционирования подсистем верхних уровней от состояния подсистем низших уровней в виде обратной связи.

С использованием известных математических моделей элементов СЭС, полученных в результате комплексной декомпозиции, с учетом их функциональных связей может быть составлена математическая модель СЭС ОНКИ, в целом отражающая процессы ее функционирования.

Необходимо отметить, что в информационном плане математическая модель СЭС ОНКИ, как модель гетерогенной иерархически распределенной технической системы, как правило, отображает большое количество разнородной информации о протекающих в системе процессах. В связи с этим возникает необходимость обработки больших объемов информации о параметрах системы, переменных состояния, которые связаны сложными зависимостями, что может отрицательно сказаться на оперативности принятия решения и делает полученную модель малоприменимой для решения задачи оценивания работоспособности СЭС ОНКИ на этапе ее эксплуатации.

Преодолеть указанные трудности возможно путем применения метода агрегирования технических состояний системы, с помощью которого модель оценивания работоспособности СЭС ОНКИ может быть представлена в виде совокупности математических моделей обобщенных элементов, каждая из которых описывает части исходной системы в соответствии с выбранным критерием эквивалентности [5]. В качестве обобщенных элементов модели оценивания рассматриваются уровни декомпозиции (рис. 1), каждому из которых ставится в соответствие множество агрегированных состояний системы.

Под агрегированным состоянием системы  $A_i, i = \overline{0, m}$  понимается состояние, определяемое совокупностью параметров (признаков)  $S_{ij}, i = \overline{0, m}, j = \overline{1, n}$ , которые могут быть объединены в рамках одного класса (подмножества). Таким образом, агрегированные состояния

$$A_i = (S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}), i = \overline{0, m}$$

получаются путем разбиения множества возможных технических состояний  $X(t)$  СЭС ОНКИ на ряд классов (подмножеств). Причем разбиение на классы осуществляется так, чтобы подмножества технических состояний  $X_i$  СЭС ОНКИ, охватываемые каждым классом, соответствовали состоянию его функциональных элементов (агрегированному состоянию  $A_i, i = \overline{0, m}$ ). Это означает, что каждый класс соответствует определенному виду технического состояния СЭС ОНКИ.

Состояние объекта в определенный момент времени  $t$ , характеризуемое вектором переменных состояния  $X_{<h>}$ , может быть оценено по выходной реакции на входное воздействие  $U_{<w>}$  в виде выходного вектора параметров (признаков)  $Y$ , контролируемые параметры которого  $Y_j, j = \overline{1, n}$  (координаты наблюдаемых состояний  $Y_{<v>} \subset Y$ ) могут использоваться для получения информации о техническом состоянии системы, поскольку переменные состояния  $X_k, k = \overline{1, h}$  для измерений, как правило, недоступны. Определенное подмножество  $Y_i \subset Y_{<v>}, i = \overline{0, n}$  наблюдаемых состояний и будет соответствовать каждому классу состояний (т. е. подмножеству  $X_k, k = \overline{0, h}$ ). При этом подмножества оценок переменных состояния  $\hat{X}_i, i = \overline{0, n}$  характеризуют техническое состояние системы. В связи с этим виды технического состояния могут быть определены подмножествами контролируемых параметров  $Y_i \subset Y_{<v>}, i = \overline{0, n}$ . Схематично указанное соответствие представлено на рис. 2.

Таким образом, виды технического состояния системы могут быть определены на подмножествах наблюдаемых состояний  $Y_i \subset Y_{<v>}$ , которые тождественно отображаются на соответствующие подмножества  $X_i$ .

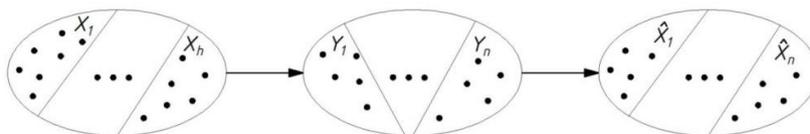


Рис. 2. Связь переменных состояния, наблюдаемых параметров и оценок переменных состояния системы

Следует отметить, что изменение масштаба агрегирования позволит в последующем производить поэтапное диагностирование с установлением причин и локализацией отказов.

В процессе оценивания работоспособности на основании информации о контролируемых параметрах первого уровня (рис. 1), полученных в результате агрегирования технического состояния, вся система в целом представляет собой единый функциональный элемент, который может находиться либо в работоспособном, либо в неработоспособном состоянии. При нахождении контролируемых параметров в установленных пределах изменения СЭС ОНКИ считается работоспособной. При этом в зависимости от пределов изменения контролируемых параметров СЭС ОНКИ может находиться либо в нормальном работоспособном состоянии, при котором контролируемые параметры находятся в нормально допустимых пределах изменения, либо в предельном работоспособном (предотказном) состоянии, при котором контролируемые параметры находятся в предельно допустимых пределах.

Если по результатам оценивания технического состояния СЭС ОНКИ на первом уровне агрегирования система находится в нормальном работоспособном состоянии процедура оценивания заканчивается.

В случае установления факта предельной работоспособности (предотказного состояния) определяются возможные причины изменения технического состояния, установление факта неработоспособности СЭС ОНКИ – выполняется процедура поиска отказов. По полученным результатам осуществляется переход на второй уровень агрегирования технического состояния, при котором рассматриваются элементы системы второго уровня и т. д. Процесс диагностирования заканчивается после установления причины в случае фиксирования факта предельной работоспособности (предотказного состояния) или после локализации отказа в случае фиксирования факта неработоспособности СЭС ОНКИ на нижнем уровне иерархической структуры.

Преимущество предложенного подхода к исследованию работоспособности сложных технических систем, основанного на комплексной декомпозиции системы для получения ее математической модели и последующем агрегировании состояний системы, состоит в том, что при формировании математической модели оценивания технического состояния СЭС ОНКИ массив информации первого уровня агрегирования заменяется несколькими массивами, каждый из которых имеет меньшую размерность. В процессе контроля и диагностирования при необходимости эти массивы могут обрабатываться последовательно. Подобная замена позволяет использовать в составе технических средств контроля и диагностирования вычислительные устройства с меньшими ресурсами и повышать оперативность принятия решений о техническом состоянии СЭС ОНКИ. Наряду с этим информатизация процессов эксплуатации СЭС ОНКИ, обеспечивающая создание и хранение баз данных о техническом состоянии электротехнического оборудования системы, их интеллектуальный анализ и обработка позволят повысить достоверность оценки уровня технического состояния СЭС ОНКИ [6].

Ключевым вопросом при оценивании работоспособности СЭС ОНКИ является отнесение фактического технического состояния системы к определенному классу технических состояний. Для решения данного вопроса возможно использование основных положений теории распознавания образов [7, 8].

Применительно к СЭС ОНКИ образ можно рассматривать как совокупность данных о системе, включающую ее параметры, а также параметры ее подсистем (элементов) и связей

между ними. При этом процедуру распознавания образа можно представить в виде множества функционально взаимосвязанных элементов

$$R = \{A, S, P\}, \quad (1)$$

где  $A$  – множество технических состояний (классов),  $A = \{A_i\}, i = \overline{1, m}$ ;

$S$  – множество параметров (признаков) на уровне агрегирования,  
 $S = \{S_{ij}\}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ ;

$P$  – множество правил принятия решений,  $P = \{P_k\}, k = \overline{1, p}$ .

Данная процедура может быть реализована в виде следующего алгоритма.

*Шаг 1.* Входная информация алгоритма представляется в виде образа – некоторой совокупности элементов множества  $S$ .

*Шаг 2.* К входной информации применяется определенная последовательность правил из  $P$ , по результатам совокупности элементов множества  $S$  присваивается индекс, соответствующий одному из элементов множества  $A$ .

*Шаг 3.* На основании частоты совпадения присвоенного образу индекса с ожидаемым результатом определяется достоверность распознавания образа.

Элементы  $A, S$  представляют собой информационную часть системы  $R$ , а  $P$  – методологическую. Поэтому система распознавания включает и процесс синтеза образов, т. е. формирования описаний объектов распознавания и их классов, и анализа образов, т. е. процесса принятия решений. Вместе с тем выбор метода принятия решений напрямую зависит от способа представления элементов распознавания.

## **АПРОБАЦИЯ МЕТОДА НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНИВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Основными функциональными элементами систем электроснабжения объектов наземной космической инфраструктуры являются трансформаторные подстанции (ТП), которые в зависимости от назначения и условий применения имеют различную структуру, состав электрооборудования и внутренние функциональные связи.

Для получения модели оценивания работоспособности ТП СЭС ОНКИ, наиболее полно отражающей основные свойства и текущее техническое состояние ее элементов, необходимо провести ее декомпозицию. В общем виде трансформаторная подстанция состоит из следующих основных элементов: распределительного устройства высшего напряжения (РУ ВН), распределительного устройства низшего напряжения (РУ НН), силовых трансформаторов.

Путем выделения элементов ТП СЭС ОНКИ, обладающих относительно полной структурной законченностью, и с учетом того, что на множестве имеющихся контролируемых параметров (признаков) каждого уровня технические состояния должны быть различимы, проведена комплексная декомпозиция, позволившая сформировать трехуровневую иерархическую структуру ТП СЭС ОНКИ, представленную на рис. 3. Данная структура является типовой для ТП СЭС ОНКИ, функционирующих в различных режимах и условиях эксплуатации.

В состав структуры комплексной декомпозиции трансформаторной подстанции входят:

*первый уровень* – трансформаторная подстанция СЭС ОНКИ;

*второй уровень* – два блока (блок 1 и блок 2) и секционирующее оборудование;

*третий уровень* – декомпозирует блоки второго уровня и включает: вводные выключатели, секции шин распределительного устройства высшего и низшего напряжения, трансфор-

маторные выключатели, силовые трансформаторы, трансформаторные автоматические выключатели, линейные автоматические выключатели, секционный выключатель, секционный автоматический выключатель и блок автоматического ввода резерва.

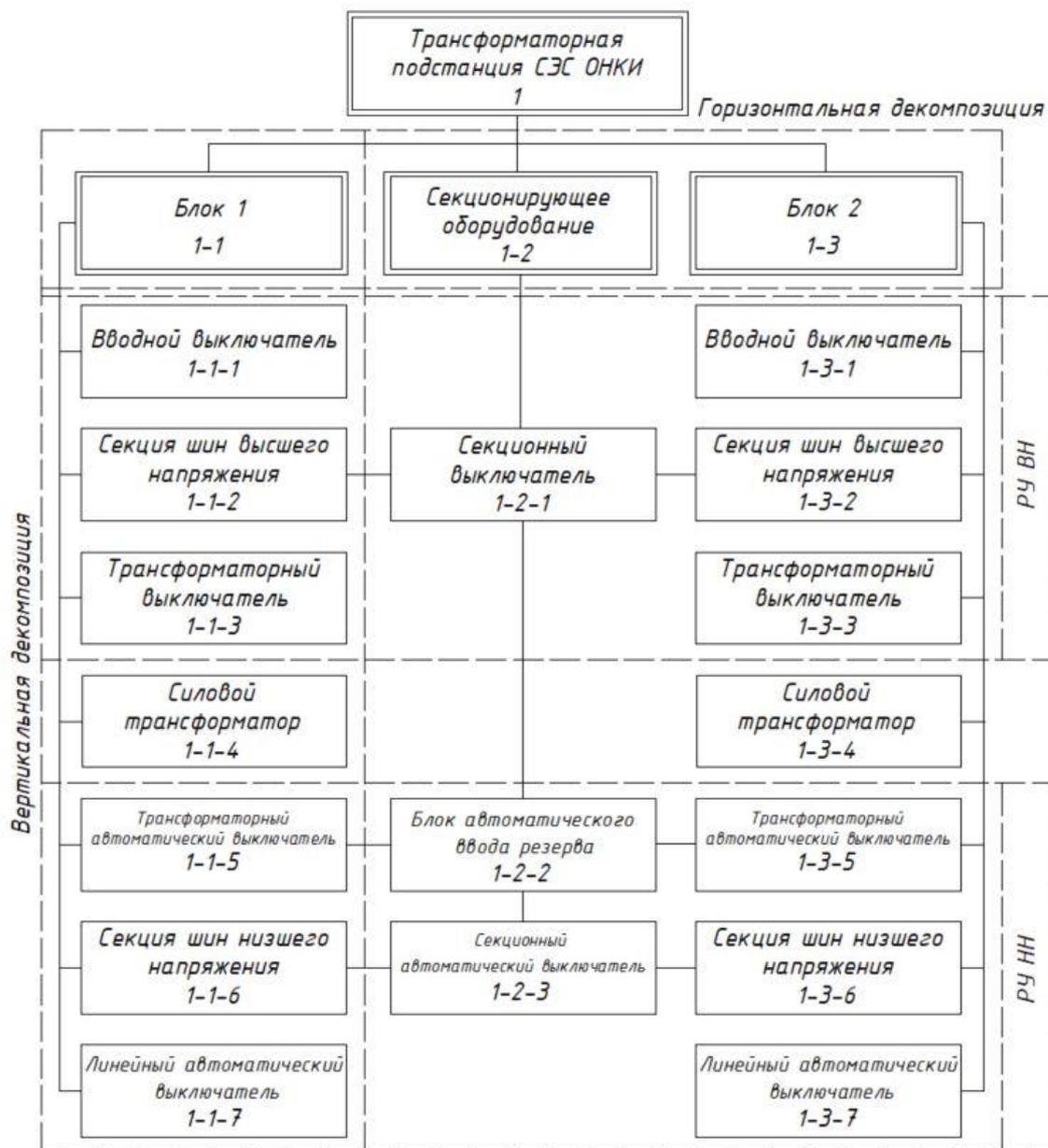


Рис. 3. Структура комплексной декомпозиции трансформаторной подстанции системы электроснабжения объекта наземной космической инфраструктуры

Соответствующая результатам декомпозиции математическая модель СЭС ОНКИ, отражающая процессы ее функционирования, представлена в виде имитационной модели ТП СЭС ОНКИ в среде *MatLab/Simulink* на рис. 4.

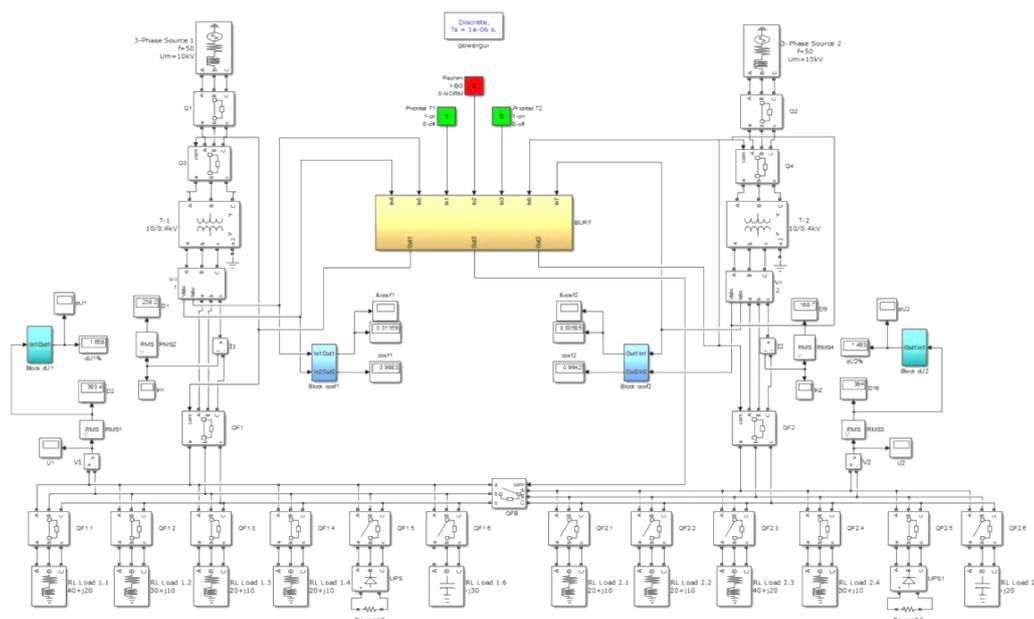


Рис. 4. Имитационная математическая модель ТП СЭС ОНКИ в среде MatLab

В табл. 1 приведен перечень возможных контролируемых параметров ТП СЭС ОНКИ на первом уровне иерархии, полученном на основании агрегирования всех контролируемых параметров.

Таблица 1

**Перечень контролируемых параметров ТП СЭС ОНКИ на первом уровне иерархии**

№ п/п	Координата наблюдаемого состояния	Условные обозначения	Единицы измерения	Наименование
1	$y_1$	$U_{HH}$	В	Напряжение на шинах РУ НН ТП
2	$y_2$	$\delta U_{(\pm)}^{HH}$	%	Положительное (отрицательное) отклонение напряжения от номинального/согласованного значения на шинах РУ НН ТП
3	$y_3$	$P_{\Pi}^{HH}$	Вт	Активная мощность потребителей, подключенных к шинам РУ НН ТП
4	$y_4$	$Q_{\Pi}^{HH}$	вар	Реактивная мощность потребителей, подключенных к шинам РУ НН ТП
5	$y_5$	$K_U^{HH}$	%	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на шинах РУ НН ТП
6	$y_6$	$K_{0U}^{HH}$	%	Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности на шинах РУ НН ТП
7	$y_7$	$K_{2U}^{HH}$	%	Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах РУ НН ТП

Вектор контролируемых параметров ТП СЭС ОНКИ, соответствующий первому уровню иерархии, можно представить в виде

$$Y_1 = Y_{(7)} = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7). \tag{2}$$

Следует отметить, что вектор (2) включает контролируемые параметры, интегрально характеризующие техническое состояние ТП СЭС ОНКИ в целом.

Входными воздействиями  $U_{<l>}$  на ТП СЭС ОНКИ являются мощность потребителей объекта наземной космической инфраструктуры, напряжение на входе трансформаторной подстанции, режим функционирования ОНКИ (табл. 2).

Таблица 2

### Перечень входных переменных ТП СЭС ОНКИ первого уровня иерархии

№ п/п	Координата входного воздействия	Условные обозначения	Единицы измерения	Наименование
1	$u_1$	$RF^{CO}$	б/р	Режим функционирования ОНКИ
2	$u_2$	$P_{ТП}$	Вт	Активная мощность, потребляемая трансформаторной подстанцией
3	$u_3$	$Q_{ТП}$	вар	Реактивная мощность, потребляемая трансформаторной подстанцией
4	$u_4$	$U_{ТП}$	В	Напряжение трансформаторной подстанции

Вектор входных воздействий, соответствующих первому уровню иерархии, будет иметь следующий вид:

$$U_{\langle 4 \rangle} = U_{\langle 4 \rangle} = (u_1, u_2, u_3, u_4). \quad (3)$$

Следует иметь в виду, что при диагностировании на различных уровнях агрегирования выходные параметры одних элементов ТП СЭС ОНКИ могут являться входными параметрами для других элементов.

Иерархическая структура СЭС ОНКИ (рис. 3), а также значения входных (3) и выходных (2) переменных являются информационной частью (исходными данными) для оценивания работоспособности ТП СЭС ОНКИ.

Таблица 3

### Допустимые значения контролируемых параметров ТП СЭС ОНКИ

№ п/п	Наименование параметра	Значение	
		нормально допустимое	предельно допустимое
1	Положительное (отрицательное) отклонение напряжения от номинального/согласованного значения на шинах РУ НН ТП $\delta U_{(\pm)}^{HH}$ , %	$\pm 5$	$\pm 10$
2	Отклонение коэффициента мощности от установленного значения $\Delta \cos \varphi$	$\Delta \cos \varphi < 0,05$	$0,05 < \Delta \cos \varphi < 0,1$
3	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на шинах РУ НН ТП $K_U^{HH}$ , %	8	12
4	Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности на шинах РУ НН ТП $K_{0U}^{HH}$ , %	2	4
5	Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах РУ НН ТП $K_{2U}^{HH}$ , %	2	4

Учитывая структуру контролируемого элемента СЭС ОНКИ и информационные компоненты системы  $R$ , для решения задачи распознавания образов (определение вида технического состояния ТП СЭС СО) целесообразно воспользоваться принципом кластеризации, в соответствии с которым каждому агрегированному состоянию  $A_i$  сопоставляется некоторое множество векторов в признаковом пространстве  $Y_{<v>} \subset Y$ . В результате признаковое пространство разбивается на определенные выше для СЭС ОНКИ области технических состояний:

- нормально работоспособного;
- предельно работоспособного;
- неработоспособного состояний (рис. 5,а).

Величины контролируемых параметров ТП СЭС ОНКИ, соответствующие первому уровню иерархии (приведены в табл. 3), предельные значения которых определены руководящими документами в области электроснабжения [9, 10], являются основой (правилами) для оценки уровня технического состояния ТП.

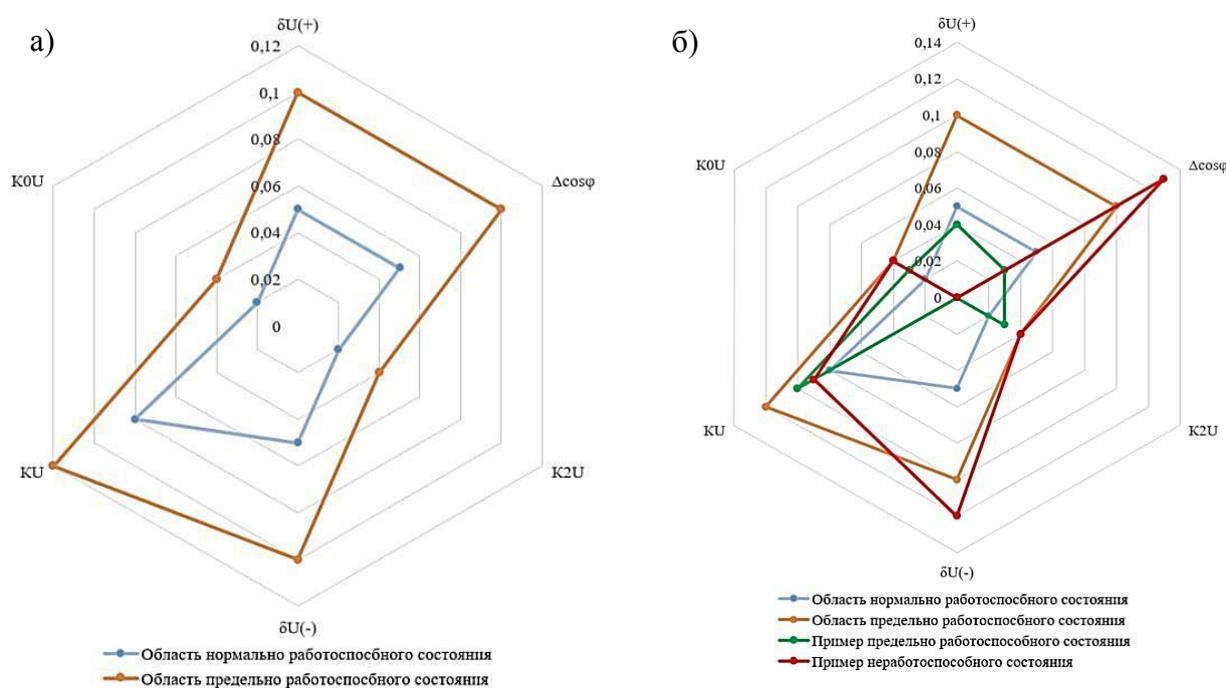


Рис. 5. Диаграммы технического состояния ТП СЭС ОНКИ

В качестве примеров оценки уровней технического состояния ТП на рис. 5,б представлены диаграммы, характеризующие предельно работоспособное состояние, при котором часть контролируемых параметров (коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения) находится в предельно допустимых пределах, и неработоспособное состояние, при котором часть контролируемых параметров (отклонение напряжения от номинального значения) находится за пределами предельно допустимых значений. Выход контролируемых параметров за допустимые пределы может быть связан, например, с подключением несимметричной и нелинейной нагрузки (в первом случае), или он происходит вследствие выхода из строя используемого в системе устройства компенсации реактивной мощности (во втором случае).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод оценивания работоспособности иерархически распределенных технических систем позволяет осуществлять контроль уровня технического состояния СЭС ОНКИ на всех этапах эксплуатации и в любых условиях обстановки. Кроме того, применение данного метода позволит:

- повысить эффективность процесса эксплуатации СЭС ОНКИ;
- своевременно и обоснованно устанавливать причины, которые привели к ухудшению их работоспособности или отказу;
- оперативно принимать решения по их устранению.

## Список используемых источников

1. Попков Б. В., Куликов А. Л. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков : учебник и практикум для вузов. – 2-е изд. – М. : Юрайт, 2022. – 470 с.
2. Карагодин В. В., Ревяков Б. А., Рыбаков Д. В. Исследование аварийных режимов работы систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры с помощью математического пакета MatLab // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 681. – С. 89–96.
3. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Ильин А. В. Математические модели распределительной электрической сети для исследования режимов ее функционирования // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 688. – С. 130–139.
4. Муравьева-Витковская Л. А. Основы распределенного моделирования : учеб. пособие. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 150 с.
5. Смирнов Н. Н., Ицкевич А. А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.
6. Баранова И. В., Майоров С. В. Информатизация производственной деятельности как инструмент повышения достоверности принимаемых управленческих решений // Вопросы инновационной экономики. – 2018. – № 1. – С. 15–23.
7. Чабан Л. Н. Теория и алгоритмы распознавания образов : учеб. пособие. – М. : МИИГАиК, 2004. – 70 с.
8. Мазуров В. Д. Математические методы распознавания образов : учеб. пособие. – 2-е изд., доп. и перераб. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2010. – 101 с.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения (с изменениями от 25 октября 2023 г. № 1). – URL: <http://docs.cntd.ru/search?q=32144-2013> (дата обращения: 04.02.2024).
10. О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах электроснабжения). – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902031275?ysclid=lsbh2xslzr620746011> (дата обращения: 04.02.2024).

В. В. Карагодин,  
*доктор технических наук, профессор;*  
С. В. Смирнов,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
И. В. Хомич

## **ВАРИАНТ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

В настоящее время происходит массовый перевод средств управления и регулирования с аналоговой на цифровую аппаратную базу, что создает возможность для реализации практически любых законов управления. В связи с этим в последнее время вырос интерес как среди теоретиков, так и среди практиков к адаптивному управлению. Однако вопросы адаптивного управления такими объектами, как электрические генераторы еще не решены на уровне, достаточном для их практической реализации. Особую сложность представляет разработка адаптивных систем автоматического регулирования возбуждения для генераторов, работающих в системах автономного электроснабжения. В статье выявлены наиболее существенные особенности систем автономного электроснабжения, и на этой основе сформирован комплекс качественных требований к адаптивной системе автоматического регулирования возбуждения бесщеточного синхронного генератора. Проведен анализ преимуществ и недостатков существующих подходов к построению систем адаптивного управления и их практических реализаций. На основе указанного анализа предложена структура адаптивной системы автоматического регулирования возбуждения бесщеточного синхронного генератора.

Ключевые слова: синхронный генератор, бесщеточный синхронный генератор, автоматический регулятор возбуждения, адаптивные системы управления.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в составе потребителей электроэнергии наземных комплексов военных объектов происходит увеличение доли потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой, что приводит к появлению высших гармоник в питающей сети. Наличие гармоник может серьезно сказываться на качестве функционирования оборудования технологических и технических систем. Вместе с тем часто оборудование, порождающее такие гармоники, является критически важным для технологических процессов. Особенно актуальны вопросы качества электроэнергии для автономных систем электроснабжения, в которых мощность таких потребителей может быть соизмерима с мощностью источника питания – дизель-генераторного агрегата (ДГА). Однако, как правило, построение систем автономного электроснабжения, выбор оборудования, настройка его параметров, включая и источники электроэнергии, осуществляются исходя из предположения о линейности и симметричности нагрузки.

Одновременно с этим анализ технологических операций, производимых при подготовке и запуске ракет космического назначения, позволил выявить существование достаточно широкого круга режимов работы системы автономного электроснабжения, возникших вследствие постоянной модернизации технических и технологических систем. Это приводит к тому, что те номинальные режимы работы, в соответствии с которыми выбирался источник автономного электроснабжения ДГА, разрабатывались и настраивались его автоматические регуляторы (автоматический регулятор скорости вращения первичного двигателя, автоматический регулятор возбуждения синхронного генератора), уже не реализуются на практике.

С другой стороны, на текущий момент практически все автоматические регуляторы представляют собой цифровые системы управления на базе промышленных контроллеров. Это дает возможность для реализации любых законов управления, до этого не осуществимых на практике.

Все вышесказанное создает предпосылки к разработке адаптивной системы автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора как автономного источника электрической энергии (ЭЭ). При этом в качестве силового генератора будем рассматривать бесщеточный синхронный генератор (БСГ), получивший широкое распространение в системах электроснабжения различных объектов в силу ряда присущих ему преимуществ (повышенная надежность, лучшие эксплуатационные характеристики).

### ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Разработка адаптивной системы автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора, являющегося источником электрической энергии в системе автономного электроснабжения, предполагает формирование комплекса требований к такой системе регулирования, исходя прежде всего из особенностей функционирования систем автономного электроснабжения военных объектов.

К таким особенностям следует отнести [1]:

- разнообразие, временная и параметрическая неопределенность возможных режимов работы;
- «тяжелые» для генератора переходные процессы, связанные с соизмеримостью мощности источника и нагрузки;
- низкое быстродействие современных синхронных генераторов с бесщеточной системой возбуждения по сравнению с генераторами, имеющими статическую систему возбуждения. Для сравнительной оценки быстродействия этих систем на рис. 1 приведены графики переходных процессов (графики изменение напряжения) в автономной системе электроснабжения с синхронными генераторами, имеющими статическую и бесщеточную системы возбуждения;
- увеличение номенклатуры и мощностей оборудования, которое имеет повышенные требования к качеству электрической энергии [2, 3];
- высокие требования к квалификации персонала, осуществляющего перенастройку и подстройку параметров регулятора возбуждения синхронного генератора.

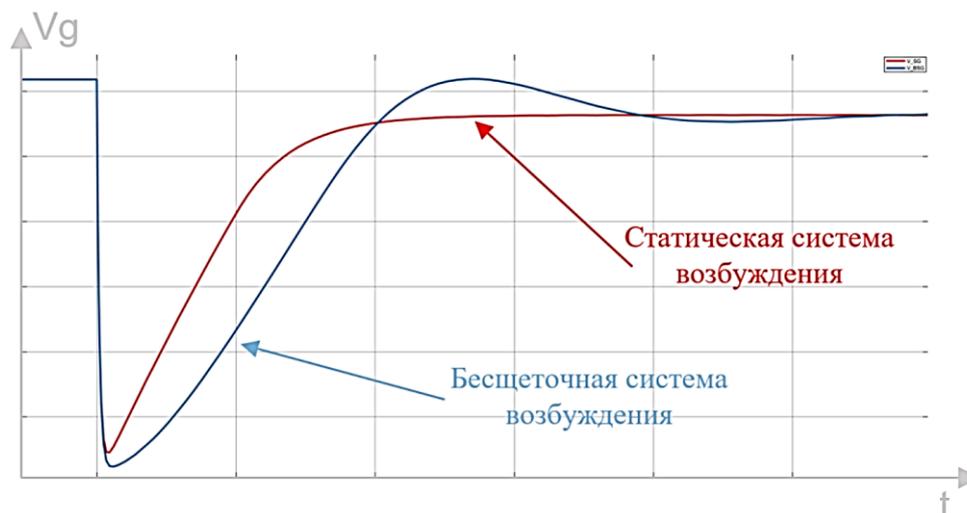


Рис. 1. Сравнение переходных процессов в режиме наброса 100% симметричной статической нагрузки при использовании статической и бесщеточной систем возбуждения

Исходя из указанных особенностей, разрабатываемая адаптивная система автоматического регулирования возбуждения (адаптивный регулятор возбуждения) БСГ должна обеспечить максимально возможное уменьшение длительности «тяжелых» переходных режимов в системе электроснабжения [4], стабилизацию напряжения в любых возможных режимах работы, а также требуемые значения показателей качества ЭЭ [4, 5] для питания ответственных потребителей с учетом их развития и постепенного ужесточения данных требований.

Другой важной особенностью автоматического регулятора возбуждения бесщеточного синхронного генератора должно стать исключение или минимизация человеческого фактора при настройке регулятора, что позволит повысить показатели его эксплуатационной технологичности.

В настоящее время существует тенденция заменять аналоговые регуляторы цифровыми. Применение цифровых систем автоматического регулирования возбуждения теоретически позволяет реализовывать принципиально новые законы управления, однако ввиду того, что промышленные контроллеры обладают в настоящий момент ограниченной тактовой частотой, важными условиями при реализации цифровых алгоритмов управления являются их низкая вычислительная сложность и устойчивость вычислительных процедур, а также объем используемой оперативной памяти.

## **АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Процесс разработки системы автоматического регулирования любым объектом можно условно представить в виде следующих этапов.

1. Идентификация объекта управления (определение его структуры и параметров), построение его математической модели.
2. Разработка алгоритма работы регулятора (определение его структуры и параметров), обеспечивающего требуемое качество работы объекта управления.
3. Конструирование регулятора (либо же разработка программного кода, реализующего алгоритм работы регулятора, для цифровых систем управления).

Проведенный анализ существующих подходов к построению систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов выявил, что при их реализации синхронный генератор рассматривается как объект управления с постоянными структурой и параметрами. Подключаемая нагрузка и ее параметры рассматриваются как случайное возмущающее воздействие. При этом не учитываются изменения в динамике работы самого объекта управления в зависимости от характера нагрузки. Таким образом, на сегодняшний день указанные выше задачи решаются на стадии проектирования системы управления объектом. При этом стоит отметить, что даже с приходом цифровых систем регулирования возбуждения определением параметров регулятора, их настройкой перед вводом объекта в эксплуатацию и подстройкой в ходе эксплуатации занимается человек, к квалификации которого предъявляются высокие профессиональные требования, что отрицательно сказывается на эксплуатационной технологичности. Сами же настройки определяются в результате анализа определенного конечного набора режимов работы системы электроснабжения, т. е. настройка параметров регулятора представляет собой «усредненные» параметры, удовлетворяющие некоторым требованиям для каждого рассмотренного режима, однако не являющиеся оптимальными ни для одного из них. Обычно же для машин средней и малой мощности ограничиваются одним, максимум двумя режимами работ – режимом возбуждения и режимом работы с номинальной нагрузкой [6].

Таким образом, на базе проведенного анализа предлагается использовать подход, основанный на совместном рассмотрении бесщеточного синхронного генератора и питаемой им нагрузки как обобщенного объекта управления с переменной структурой и параметрами. По-

скольку в этом случае при изменении нагрузки изменяются параметры и структура объекта управления, то указанные выше задачи при построении регулятора возбуждения должны частично решаться автоматически в процессе функционирования объекта, без участия человека, то есть, регулятор возбуждения должен обладать адаптивными свойствами.

В ходе анализа существующих способов построения адаптивных регуляторов было выявлено, что однозначного и общепринятого подхода к определению и классификации адаптивных систем до сих пор не существует [7–10]. В связи с этим была предложена классификация систем адаптивного управления по способу адаптации (рис. 2).

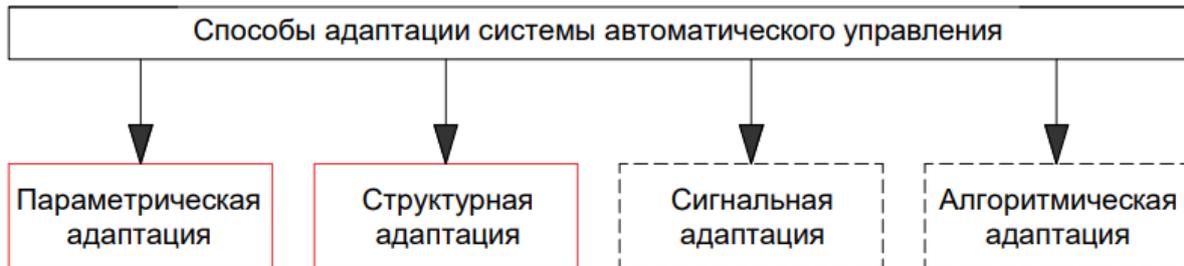


Рис. 2. Классификация систем адаптивного управления по способу адаптации

Исходя из данной классификации, структура системы адаптивного управления общего вида, включающая все существующие способы адаптации, будет иметь вид, представленный на рис. 3.

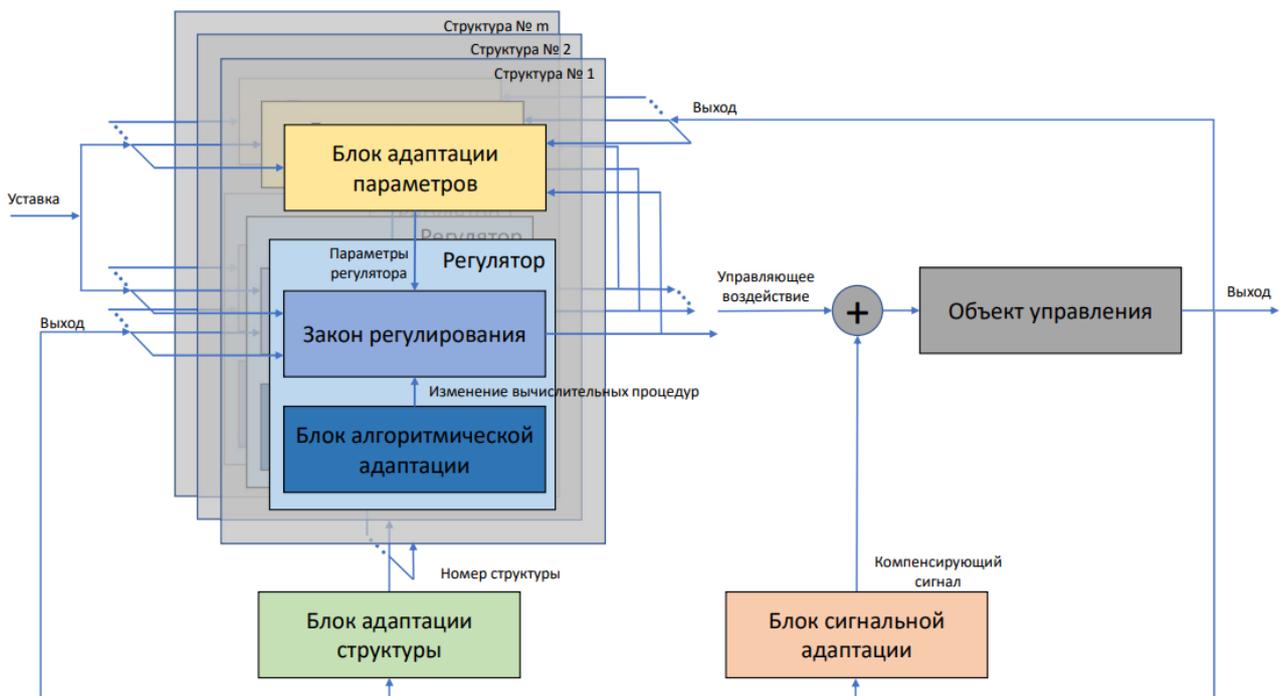


Рис. 3. Структура адаптивной системы автоматического управления общего вида

Первым способом адаптации является адаптация вычислительных процедур, которые используются при определении управляющего воздействия с помощью заданного закона регулирования (например, с помощью изменения способа численного дифференцирования ошибки управления). В системах автоматического управления техническими объектами та-

кой способ адаптации практически не используется ввиду того, что вычислительные алгоритмы обычно заданы достаточно строго, имеют заранее определенную вычислительную сложность и время работы, а их изменение или не приводит к улучшениям, или вовсе может снизить эффективность работы системы управления.

*Вторым способом* является сигнальная адаптация. При использовании этого типа адаптации производится разработка отдельного структурного элемента системы управления – блока сигнальной адаптации, который предназначен для выработки дополнительных управляющих сигналов при изменении режима работы объекта управления [11]. При этом не происходит никаких изменений в структуре и параметрах основного регулятора, а выработанный сигнал просто суммируется с управляющим воздействием. Сигнальная адаптация, несмотря на свою простоту, также не нашла широкого применения в системах автоматического управления из-за узкого диапазона компенсируемого изменения свойств объекта [12].

*Третьим способом* является структурная адаптация, позволяющая изменять структуру закона регулирования. Обычно реализуется за счет разработки блока переключения между различными алгоритмами управления (структурами), каждый из которых обеспечивает требуемое качество (эффективность) управления. Является, с одной стороны, достаточно эффективным способом адаптации, так как каждый алгоритм управления может быть разработан на основании существующих теоретических и практических методов построения регуляторов, с другой стороны, такой способ не получил широкого распространения из-за сложности оценки границ эффективности каждого алгоритма управления.

*Четвертый способ* – это параметрическая адаптация, т. е. изменение параметров закона регулирования. Методы адаптивного управления с использованием параметрической адаптации являются наиболее распространенными. Это связано с тем, что основная задача параметрической адаптации регулятора совпадает с одной из основных задач теории автоматического регулирования – подобрать параметры регулятора таким образом, чтобы удовлетворить один или несколько заданных критериев качества [10]. Отличие же от классической теории состоит в необходимости поиска таких параметров в масштабе реального времени, чтобы исключить непосредственное участие человека.

Как уже было сказано ранее, наиболее распространенным способом адаптации является параметрическая адаптация. Структура системы управления с параметрической адаптацией состоит из двух контуров управления – контура обратной связи и контура настройки параметров регулятора (рис. 4).

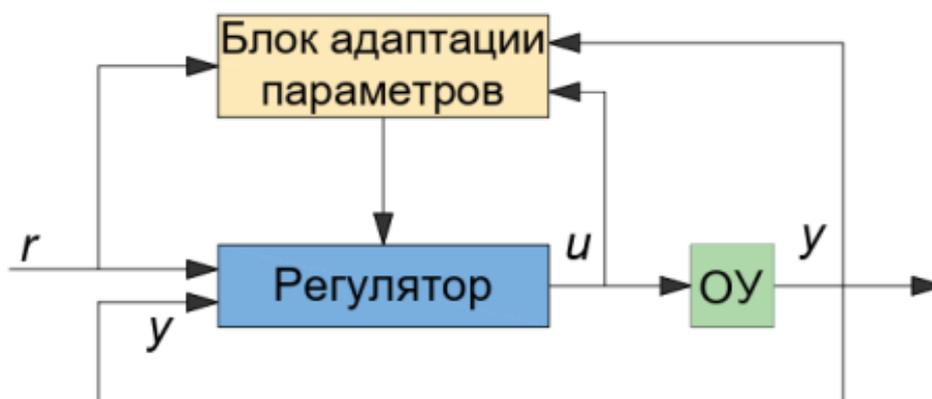


Рис. 4. Структурная схема системы управления с параметрической адаптацией, где  $r$  – задающее воздействие,  $y$  – выход системы,  $u$  – управляющее воздействие

В контуре настройки параметров добавляется блок адаптации параметров регулятора. Существуют несколько подходов к построению систем управления с параметрической адап-

тацией, каждая из которых связана с определенной концепцией исполнения блока адаптации параметров [8]:

- системы управления с эталонной моделью объекта управления [13, 14]. Используются, если оптимальная или желаемая динамика объекта управления может быть задана аналитически;

- системы управления с параметрической идентификацией [15, 16]. Используется, если возможно установление связи между параметрами объекта и параметрами регулятора;

- системы корректировки параметров регулятора (*Gain scheduling*) [17–19]. Используется, если возможно установление прямой зависимости изменения поведения объекта управления от изменения параметров регулятора;

- системы с дуальным управлением [20]. Возможно использование, если известны априорные законы распределения задающих и возмущающих воздействий.

Структурные схемы различных реализаций блока адаптации параметров представлены на рис. 5.

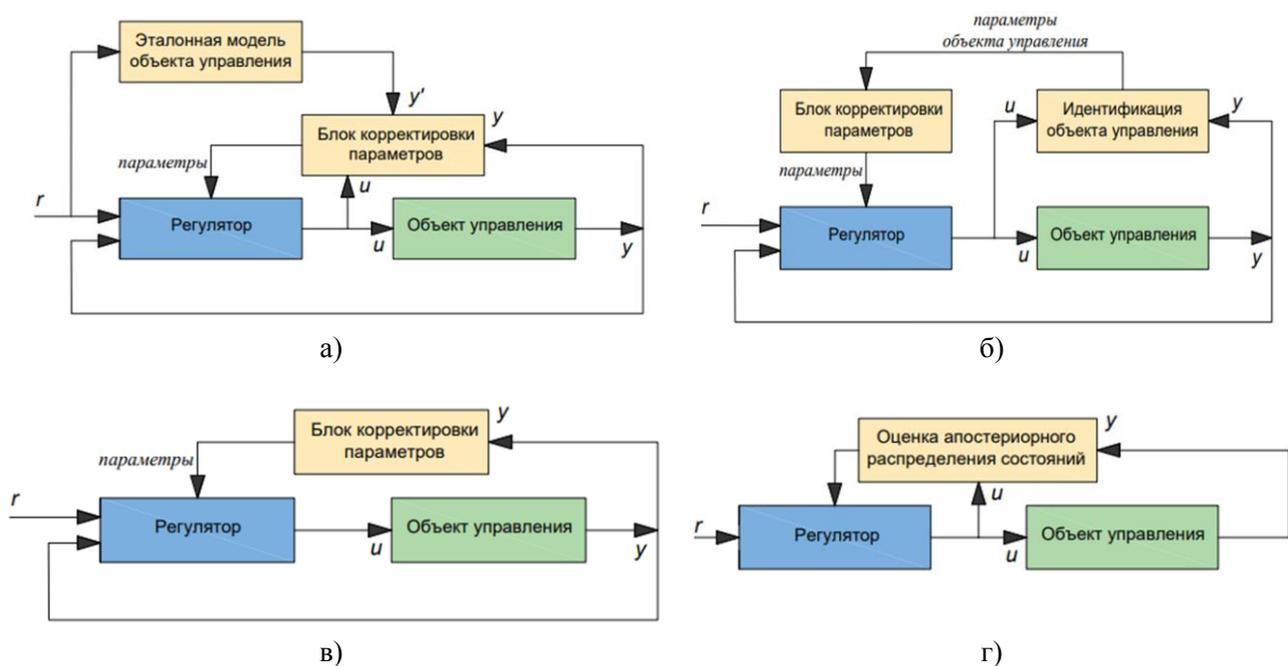


Рис. 5. Структурные схемы различных вариантов исполнения блока адаптации параметров:

*а* – система управления с эталонной моделью; *б* – система управления с параметрической идентификацией; *в* – система с корректировкой параметров; *г* – система с дуальным управлением

Среди указанных подходов реально применяются на практике только системы с параметрической идентификацией либо системы с корректировкой параметров регулятора [5, 21, 22], что связано с невысокой вычислительной сложностью применяемых алгоритмов и относительной простотой реализации (первые адаптивные системы с корректировкой параметров можно было реализовать даже на аналоговых элементах).

Однако, несмотря на продолжительную практику применения, данные подходы не лишены недостатков. По оценкам специалистов, подход на основе параметрической идентификации показывает хорошие результаты, только если динамика реального объекта может быть достаточно точно воспроизведена его параметрической моделью в широком диапазоне возмущающих воздействий [8, 9]. Недостаточная точность математической модели силового генератора, не учитывающая изменения в его структуре, может привести к снижению значе-

ний показателей качества электрической энергии в некоторых режимах работы. Второй подход позволяет избежать проблемы, связанной с многообразием режимов работы, но требует привлечения высококвалифицированных специалистов и значительных временных затрат, так как настройка параметров для каждого режима производится вручную на основе существующего опыта эксплуатации и практики регуляторостроения. Таким образом, ни один из данных подходов не позволяет полностью удовлетворить требованиям, предъявленным к системе автоматического регулирования возбуждения.

### СТРУКТУРА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Для того чтобы преодолеть недостатки, присущие существующим подходам к построению адаптивных систем управления, и одновременно с этим удовлетворить те требования, которые предъявляются к системам автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов, предлагается структура адаптивного регулятора возбуждения (рис. 6), которая состоит из оптимального по быстродействию регулятора, регулятора с параметрической адаптацией и блока структурной адаптации (выбора регулятора).

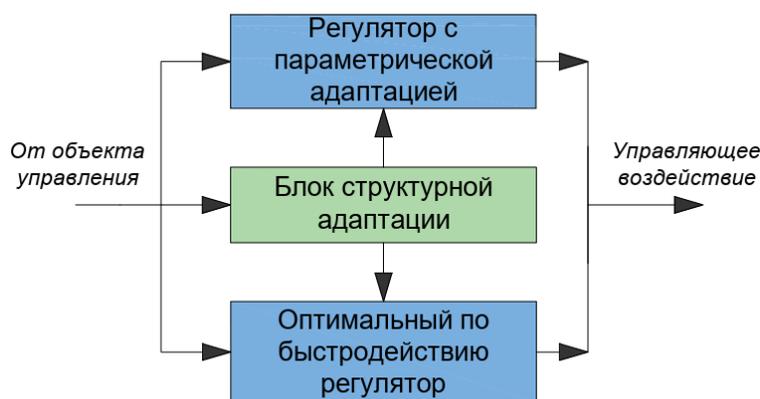


Рис. 6. Структура адаптивного автоматического регулятора возбуждения бесщеточного синхронного генератора

Каждый регулятор действует в зоне своей эффективной работы. Так, для оптимального по быстродействию регулирования характерны высокие показатели качества управления при значительных (аварийных) возмущающих воздействиях на бесщеточный синхронный генератор (подключение либо отключение нагрузки, соизмеримой по мощности с генератором, самозапуск мощных асинхронных двигателей). Для регулятора с параметрической адаптацией больше характерен режим стабилизации напряжения при различных нагрузках, а также демпфирование малых и средних возмущений. Задачи определения эффективности работы того или иного регулятора в текущем режиме работы объекта управления, а также осуществления переключений возложены на блок структурной адаптации.

Регулятор, оптимальный по быстродействию, реализует управление возбуждением бесщеточного синхронного генератора путем попеременной форсировки и расфорсировки напряжения возбуждения возбудителя в течение определенных интервалов времени. Длительность этих интервалов определяется путем решения задачи оптимального быстродействия [23–26] для упрощенной математической модели бесщеточного синхронного генератора.

Как уже было сказано ранее, продолжают исследования в области разработки систем адаптивного регулирования возбуждения синхронных генераторов на основе параметрической адаптации [17, 27, 28]. Однако существующие решения, в подавляющем большинстве своем, используют в том или ином виде идею построения прямой связи между параметрами регулятора и текущим состоянием объекта управления [17, 27], но не решают задачу автоматической настройки параметров регулятора на этапе ввода в эксплуатацию и их подстройки в процессе эксплуатации. А значит, существует риск неправильной настройки параметров человеком и некорректной работы системы регулирования возбуждения, что может привести, в свою очередь, к снижению показателей качества электрической энергии, потребляемой ответственными потребителями. При этом стоит отметить, что практически все подходы к построению систем регулирования с параметрической адаптацией основаны на ряде идеализированных предположений о свойствах объекта управления (объект управления является неминимально-фазовым, отсутствуют паразитные обратные связи, а также неучтенные процессы с очень большой либо очень малой постоянной времени) [29].

В связи с вышеизложенным актуальным вопросом является разработка новых подходов к построению систем с параметрической адаптацией, которые позволили бы производить автоматическую настройку и подстройку параметров регулятора в масштабе реального времени с минимальным участием человека или вообще без его участия и обеспечивать требуемые значения показателей качества электрической энергии в системе автономного электроснабжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье проведен анализ существующих подходов к построению адаптивных систем регулирования и сделан вывод о необходимости их совершенствования для применения к регулированию возбуждения генераторов в составе автономной системы электроснабжения. В связи с этим предложен вариант построения адаптивной системы автоматического регулирования возбуждения бесщеточного синхронного генератора, соединяющий в себе как способ структурной адаптации, так и способ параметрической адаптации.

## Список используемых источников

1. Карагодин В. В., Горин В. А., Хомич И. В. Обоснование структуры и оптимизация параметров автоматического регулятора возбуждения синхронного генератора // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 689. – С. 197–201.
2. IEEE Std 446, Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications (1995). – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/446/669/> (дата обращения: 19.02.2023).
3. IEC 61000-4-11 (2020). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with input current up to 16 A per phase. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/63503> (дата обращения: 19.02.2022).
4. ГОСТ 33105-2014. Установки электрогенераторные с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования : [введ. 01.06.2016]. – М. : Стандартинформ, 2015. – 19 с.

5. ГОСТ 13244-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : [введ. 01.07.2014]. – М. : Стандартинформ, 2014. – 19 с.
6. Pat. № 2009/015224 A1, H02P 9/00. Digital excitation control system utilizing self-tuning PID gains and an associated method of use / Kiyong K.; Basler Electric Company. – US № 12/023,145; Filed 31.01.2008; Pub. Date 06.08.2009.
7. Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М. : Мир, 1975. – 424 с.
8. Astrom K.J., Wittenmark B. Adaptive control. – New York : Dover, 2008. – 589 p.
9. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. – М. : Высш. шк., 1989. – 263 с.
10. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. – М. : Наука, 1972. – 768 с.
11. Подвальный С. Л., Васильев Е. М. Многоуровневая сигнальная адаптация в нестационарных системах управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 5. – С. 38–47. – DOI: 10.36622/VSTU. 2022.18.5.005.
12. Жмудь В. А. Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 2(8). – С. 106–122.
13. Osburn P.V., Whitaker H.P., Kezer A. New developments in the design of adaptive control systems // Institute of Aeronautical Sciences. – February 1961. – Paper № 61–39.
14. Landau Y.D. Adaptive Control: The Model Reference Approach. – New York : Marcel Dekker, 1979. – 406 p.
15. Kalman R.E. Design of a self-optimizing control system // Trans. ASME 80. – P. 468–478.
16. Denisenko V. V. Nonparametric Model for PID Controller Autotuning // 18th IEEE International Conference on Control Applications. Part of 2009 IEEE Multi-coference on Systems and Control. Saint-Petersburg, Russian. – July 8–10, 2009. – P. 43–47
17. Пат. № 2498494 РФ, МПК H02P 9/10, 9/12. Способ управления возбуждением синхронного электрического генератора / А. В. Бумагин [и др.]; МГТУ им. Н. Э. Баумана. – № 20121309968/07; заявл. 20.07.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31.
18. Емельянов С. В. Системы управления с переменной структурой. – М. : Наука, 1967. – 336 с.
19. Stein G., Narendra K.S., Monopoli R.V. Adaptive flight control: A pragmatic view // In Applications of Adaptive Control, eds. – New York : Academic Press, 1980.
20. Фельдбаум А. А. Теория дуального управления // Автоматика и телемеханика. – 1960. – Т. 21, вып. 9. – С. 1240–1249.
21. Kraus T.W., Myron T.J. Self-tuning PID controller uses pattern recognition approach // Contr. Eng June. –1984. – P. 106–111.
22. Bengtsson G., Egardt B. 1984. Experiences with self-tuning control in the process industry // Proceedings of the 9th IFAC World Congress, Budapest. – P. XT:132–140..
23. Карагодин В. В., Горин В. А., Хомич И. В. Алгоритм численного нахождения оптимального по быстродействию управления нелинейными объектами // Электротехнические и информационные комплексы и системы : [журн.]. – Уфа, 2020. – № 2, т. 16. – С. 66–72.
24. Карагодин В. В., Горин В. А., Хомич И. В. Расчет оптимального по быстродействию управления нелинейными объектами одного класса с применением среды Matlab // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 681. – С. 54–64.

25. *Karagodin V., Gorin V., Kchomich I.* A modified numerical calculation method for the response rate optimal control of non-linear dynamic objects of a special type // AIP Conf. Proc. 2910, 020151 (2023). – P. 020151-1–020151-8, 2023. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0166555> (дата обращения: 21.03.2023).
26. *Карагодин В. В., Горин В. А.* Способ повышения точности оптимального программного управления динамическими объектами при неточном знании их параметров // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации». – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – С. 512–515.
27. *Седойкин Д. Н., Юрганов А. А.* Адаптивный автоматический регулятор на основе нечеткого аппроксиматора в режиме недовозбуждения синхронной машины // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 22–29. – DOI: 10.18721/JEST.240202.
28. *Кожеева Г. А.* Расчет адаптивной системы управления для синхронного генератора // Известия КГТУ имени И. Раззакова. – 2010. – № 21. – С. 158–162.
29. *Athans M., Valavani L.* Adaptive Control: Myths and Realities // First Annual NASA Aircraft Control Workshop Langley Research Center, Hampton, Virginia, October 25–27 / NASA. – 1983. – P. 343–361.

А. А. Карытко,  
кандидат технических наук

## МЕТОД КОРРЕКЦИИ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ГРУППОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ФРАГМЕНТОВ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ

Метод основывается на введении регрессионной модели орбитального движения группы динамических объектов, значения которой используются как эталонные в процедуре коррекции. Регрессионная модель описывает движение объектов в составе группы полиномами второй степени на локальных участках траектории их движения. Исходными данными для интерполяции являются оценки параметров движения объектов группы, которые формируются множеством сенсоров наблюдения, как правило, на непересекающихся локальных временных интервалах, распределенных на общем интервале времени длительностью не более десятка минут. Статья содержит результаты вычислительного эксперимента, в ходе которого продемонстрирована принципиальная возможность эффективной коррекции параметров движения объектов группы с применением полиномов, интерполирующих фрагменты траектории движения объектов.

Ключевые слова: динамический объект наблюдения, групповое движение, оценка параметров движения.

### ВВЕДЕНИЕ

В данной работе под группой (кластером) будем понимать множество точек  $A$ , заданное в трехмерном евклидовом пространстве координатами положения динамических объектов на момент времени  $t_i$ . Координаты объектов представлены в сферической системе координат (СК) сенсора, формирующего измерительную информацию по объектам, в формате  $\{\hat{r}, \alpha, \hat{\beta}, \dot{\hat{r}}, \dot{\alpha}, \dot{\hat{\beta}}\}$ , где  $\hat{r}$  – оценка величины радиуса-вектора между сенсором и объектом;  $\alpha, \hat{\beta}$  – оценки углов поворота радиуса-вектора в азимутальной и угломестной плоскостях;  $\dot{\hat{r}}, \dot{\alpha}, \dot{\hat{\beta}}$  – оценка скорости изменения параметров  $r, \alpha, \beta$ . Оценка параметров движения объектов  $y \in \{\hat{r}, \dot{\hat{r}}, \hat{\alpha}, \dot{\alpha}, \hat{\beta}, \dot{\hat{\beta}}\}$  содержит ошибку  $\varepsilon$ , величина которой распределена по нормальному закону  $y = y + \varepsilon$ , где  $y$  – истинное значение измеряемого параметра. Оценка параметров движения элементов группы выполняется системой сенсоров. Наиболее точно оцениваемым параметром является  $r$ , наиболее грубые оценки формируются для величин  $\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}$ . По одному объекту группы допускается формирование измерительной информации как от нескольких, так и от одного сенсора. Время формирования оценок параметров движения  $i$ -го элемента группы  $t_i$  является произвольным в пределах временного интервала  $[t_1^*; t_n^*]$ , где  $t_1^*$  – момент времени, в который для наблюдения становится доступным первый элемент группы;  $t_n^*$  – момент времени, в который для наблюдения становится недоступным последний элемент группы. Пример возможного профиля оценок параметров движения элементов группы по времени имеет вид  $t_1^* < t_3 < t_4 < t_1 < \dots < t_n < t_{n-2} < t_n^*$ .

Множество  $A$  характеризуется метрическими характеристиками: евклидовым расстоянием между смежными точками  $a, b - \rho(a, b)$ , принадлежащими нерву покрытия множества

точек  $A$  [1]; средним значением и среднеквадратическим отклонением взаимного расстояния между точками, определяющими  $\Delta$ -окрестность множества  $A$ . Совокупность объектов  $g_1, g_2, \dots, g_n$  образует группу в том случае, если величина  $\Delta$ -окрестности множеств  $A_1, A_2, \dots$ , сформированных положением объектов  $g_1, g_2, \dots, g_n$  в пространстве в моменты времени  $t_1, t_2, \dots$ , не превышает порогового значения. В качестве динамических объектов в работе рассматриваются низкоорбитальные космические объекты.

Группирование динамических объектов в околоземном космическом пространстве требует выполнения ряда условий их движения:

– объекты должны быть распределены в одной орбитальной плоскости, задаваемой наклоном и прямым восхождением восходящего узла;

– орбиты объектов группы должны обладать одинаковыми эксцентриситетом, большой полуосью и аргументом широты перигея.

Аргумент широты определяет структуру группы, задаваемую распределением объектов в пределах орбитальной плоскости. Таким образом, на множестве элементов группы вводится отношение упорядоченности по аргументу широты:  $u_1 < u_2 < \dots < u_n$ . Устойчивость структуры группы объектов на продолжительном временном интервале обеспечивается непрерывной коррекцией параметров движения, направленной на компенсацию различных видов возмущающих воздействий, и удержанием их значений в окрестности априорно заданных эталонных значений, единых для всех элементов группы.

Рассматриваемые сценарии целенаправленного изменения параметров движения группы объектов заключаются в согласованном изменении элементами группы большой полуоси орбиты с непрерывно и монотонно изменяющимися метрическими характеристиками всей группы объектов.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается орбитальное движение динамических объектов на околокруговых равновысотных орбитах, число рассматриваемых элементов группы обуславливает оперативность сходимости предлагаемого метода и качество его результатов. В случае выполнения критерия  $|A| > 25$  целесообразно выполнять кластеризацию элементов множества  $A$  на подмножества  $A_1, A_2, \dots, A_n$  таким образом, чтобы итоговые подмножества удовлетворяли условиям:

$$\bigcap_{i=1, n} A_i = \emptyset; \bigcup_{i=1, n} A_i = A; \forall i, 6 \leq |A_i| \leq 25.$$

Причем ограничения на мощность множества  $A$  установлены эмпирическим путем, нижняя граница величины мощности множества  $A$  обосновывается характеристиками ошибок оценки параметров  $\hat{y} \in \{\hat{r}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{r}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}\}$ . Для  $|A| \geq 6$  величина максимальных ошибок составляет: для  $r - \varepsilon_r \leq 1$  км, для  $\alpha, \beta - \varepsilon_{\alpha}, \varepsilon_{\beta} \leq 45'$ , для  $\dot{r} - \varepsilon_{\dot{r}} \leq 0,02$  км/с, для  $\alpha, \beta - \varepsilon_{\dot{\alpha}, \dot{\beta}} \leq 40''$  в секунду.

Оценки параметров движения объектов группы формируются сетью сенсоров так, что максимальная длительность временного интервала, включающего всю совокупность наблюдений, не превышает 20 мин.

Процедура прогноза параметров движения (модель движения элементов группы) реализуется системой дифференциальных уравнений в оскулирующих элементах орбиты, учитывающей нецентральность гравитационного поля Земли до четвертой зональной гармоники включительно, влияние динамической верхней атмосферы Земли. Дифференцирование выполняется либо по времени, либо по аргументу широты в зависимости от этапа выполнения

метода, описание которых приводится ниже. Решение системы дифференциальных уравнений формируется методом Рунге – Кутты 4-го порядка, при этом шаг дифференцирования варьируется.

В ходе реализации вычислительных процедур, описываемых ниже, используются сферическая и инерциальная системы координат (СК)  $X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$ . Пересчет из сферической СК в инерциальную выполняется последовательным пересчетом из сферической СК в топоцентрическую, из топоцентрической СК – в геоцентрическую СК, из геоцентрической – в инерциальную с использованием известных соотношений [2].

Коррекция основывается на введении дополнительной регрессионной модели движения объектов группы  $M(u)$ , применяемой на интервале времени  $[t_1^*; t_n^*]$ . Модель представляет собой формализацию зависимостей параметров движения объектов группы, заданных в инерциальной СК, от аргумента широты, то есть фактически  $M(u)$  есть вектор-столбец:

$M(u) = [X(u), Y(u), Z(u), \dot{X}(u), \dot{Y}(u), \dot{Z}(u)]^T$ . Зависимость  $x(u)$ , где  $x \in \{X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}\}$  задается полиномом второй степени:  $x(u) = x_0 + x_1 \cdot u + x_2 \cdot u^2$ . Неизвестные коэффициенты полиномов  $x_0, x_1, x_2$  находятся методами регрессионного анализа с применением метода наименьших квадратов. Степень полинома обосновывается классом аппроксимируемых с его помощью кривых 2-го порядка – фрагментов эллипсов, являющихся эквивалентом невозмущенного движения космических объектов на коротких временных интервалах.

Цель метода заключается в минимизации квадратичной невязки итоговых оценок параметров движения объекта, соответствующих точке  $a \in A$ ,  $y_a^*$  с его апостериорно уточненными параметрами движения  $y_a$  (более точными, чем исходная оценка  $y_a$ ), которые рассчитаны по совокупности координатных измерений, сформированных на интервале времени, длительность которого кратна периоду обращения космического объекта:

$$f : \sum_{a \in A} \frac{(y_a^* - y_a)^2}{\sigma_y^2} \Big| y \in \{r, \alpha, \beta, \dot{r}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}\} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\sigma_y$  – среднеквадратическое отклонение оценки параметра движения  $y$  от более точных апостериорных данных.

## СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДА

Для каждой точки  $a \in A$  выполняется прогноз соответствующих параметров движения на момент времени  $\tilde{t}$ , при этом

$$\tilde{t} = \frac{\sum_{i=1, n} \sum_{j=1, k(i)} t_{ij}}{N},$$

где  $n$  – количество объектов в группе;

$k(i)$  – количество сенсоров, сформировавших измерение по  $i$ -тому объекту;

$N$  – общее количество сформированных измерений,  $N = |A|$ .

Ключевым результатом прогноза является формирование взаимно однозначного отображения исходного множества точек  $A$  на множество точек  $A'$ . Пример множества точек  $A'$ , сформированного на основе множества  $A$ , построенного четырьмя сенсорами, при длительности прогноза не более 20 мин, представлен на рис. 1.

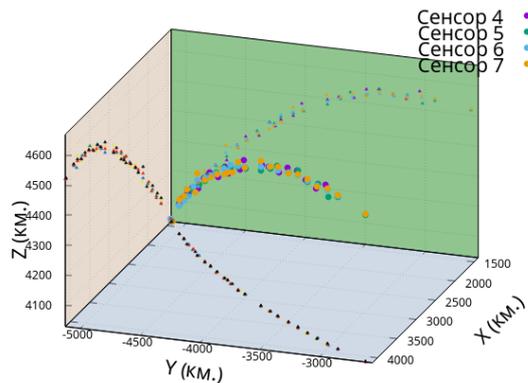


Рис. 1. Множество точек  $A'$ , сформированное на момент времени  $\tilde{t}$  процедурой прогноза, выполненного для начальных параметров движения  $\hat{y}$

Истинное распределение точек  $A'$  в пространстве на момент времени  $\tilde{t}$ , формируемое процедурой прогноза на основании исходных данных  $y$ , не содержащих ошибок измерения, представлено на рис. 2.

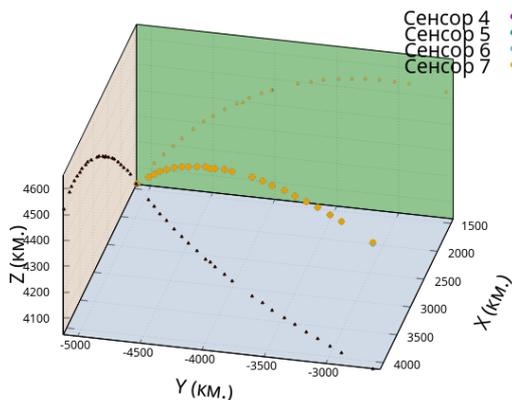


Рис. 2. Множество точек  $A'$ , сформированное на момент времени  $\tilde{t}$  процедурой прогноза, выполненного для параметров движения  $y$

Анализ данных, представленных на рис. 1, 2, свидетельствует о нарушении структуры группы и невозможности достоверного отождествления оценок параметров движения, сформированных различными сенсорами по одному и тому же объекту группы, с соответствующим объектом «владельцем» измерений.

На множестве точек системы  $A'$  (см. рис. 1) выполняется процедура регрессии по методу наименьших квадратов с целью установления неизвестных коэффициентов регрессионной модели движения  $M(u)$ . Полученная таким образом модель применяется для корректирования оценок параметров движения объектов группы в соответствии с нижеописываемыми этапами. Процедура численного прогноза движения, далее обозначаемого  $F_n$ , реализуется дифференцированием по аргументу широты системы дифференциальных уравнений в оскулирующих элементах орбиты.

Суть предлагаемого метода заключается в подборе значений оценок  $\hat{y}$ , обеспечивающих выполнение равенства  $F_n(\hat{y}, u) = M_\delta(u)$  на локальном участке траектории движения группы объектов. Правая часть равенства задана с некоторой погрешностью  $\delta$ , задаваемой качеством интерполяции совокупности оценок параметров движения моделью  $M(u)$ ,

$\|\overline{M}(u) - \tilde{M}_\delta(u)\| \leq \delta$ , где  $\overline{M}(u)$  – точное (истинное) значение правой части равенства. Естественно полагается, что результаты регрессионной модели движения  $M(u)$  в окрестностях точки, задаваемой аргументом широты, для которой выполняется процедура сравнения, более достоверны, чем результаты процедуры численного прогноза  $F_n(\hat{y}, u)$ . Процедура численного прогноза параметров движения  $F_n$  характеризуется неустойчивостью формируемого им результата относительно входных данных. Неустойчивость проявляется в существенном изменении результатов прогноза при незначительном изменении начальных параметров движения. Таким образом, рассматриваемая задача относится к классу некорректных обратных задач.

Метод состоит из следующих этапов.

**Этап 1.** Выбирается опорное значение аргумента широты объекта, используемое для коррекции результатов оценки параметров движения объектов группы по данным модели  $M(u)$ :

$$u_2^* = \frac{u_1 - u_0}{2}, u_1^* = u_2^* - 30', u_3^* = u_2^* + 30',$$

где  $u_1, u_0$  – максимальное и минимальное значения аргумента широты на множестве  $A'$ ;

$u_1^*, u_3^*$  – значения аргумента широты, задающие окрестность модели  $M(u)$ , в пределах которой обеспечивается согласование результатов прогноза  $F_n$  с результатами регрессионной модели.

Реализация данного этапа необходима, поскольку регрессионная модель  $M(u)$  приводит параметры движения объектов к значениям, обеспечивающим их попадание в окрестности кривой, заданной в пространстве на момент времени  $\tilde{t}$ , но она не обеспечивает выполнение коррекции ошибки по положению объекта вдоль этой кривой. С целью устранить данный эффект вводятся параметры  $u_1^*, u_2^*, u_3^*$ .

**Этап 2.** Из множества  $A$  семплируется точка  $a_i$ , семплирование выполняется без возврата, т. е. в пределах одной итерации – одну точку и соответствующие ей параметры движения можно выбрать единожды.

**Этап 3.** Вводится сглаживающий функционал Тихонова  $F(y)$  квадратичных невязок модели  $M(u)$  и прогноза  $F_n$ , заданный в инерциальной СК:

$$F_n : r, \alpha, \beta, \dot{r}, \dot{\alpha}, \dot{\beta} \xrightarrow{u_i^*} X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z};$$

$$F(y^p) = \sum_{i=1}^3 \sum_x \left( \frac{M_x(u^*) - F_n^x(y^p, u_i^*)}{\sigma_{ix}} \right)^2 + \gamma \|y^p - \hat{y}\|^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ix}$  – среднеквадратическое отклонение модели  $M_x(u)$  и прогноза  $F_n^x$  по координате;

$y^p$  – скорректированная оценка параметров движения объекта на  $p$ -той итерации,  $y_0 = \hat{y}$ ;

$\gamma \|y^p - \hat{y}\|^2$  – стабилизирующий функционал, обеспечивающий корректную постановку задачи исследования;

$\gamma$  – параметр регуляризации, согласовываемый с погрешностью регресси-

онной модели  $M(u)$ ,  $\gamma \sim [0.01, 0.2]$ .

Использование функционалов, подобных функционалу (2), широко распространено в сфере обработки измерительной информации по космическим объектам [3].

**Этап 4.** Выполняется минимизация функционала (2) для параметров движения, отождествленных с точкой  $a_i$ , путем коррекции оценки параметров движения объекта  $r, \alpha, \beta, \dot{r}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}$ . В ходе данной процедуры составляется система дифференциальных уравнений в частных производных функционала (2):

$$\begin{cases} f_1 = \frac{\partial F}{\partial r} = \sum_{i=1}^3 \sum_x \left( \frac{M_x(u^*) - F_n^x(y, u_i^*)}{\sigma_{ix}} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_{ix}} \left( -\frac{\partial F_n^x(y, u_i^*)}{\partial r} \right) + \gamma \frac{\partial \|y - \hat{y}\|^2}{\partial r} = 0, \\ f_2 = \frac{\partial F}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^3 \sum_x \left( \frac{M_x(u^*) - F_n^x(y, u_i^*)}{\sigma_{ix}} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_{ix}} \left( -\frac{\partial F_n^x(y, u_i^*)}{\partial \alpha} \right) + \gamma \frac{\partial \|y - \hat{y}\|^2}{\partial \alpha} = 0, \\ \dots \\ f_6 = \frac{\partial F}{\partial \dot{\beta}} = \sum_{i=1}^3 \sum_x \left( \frac{M_x(u^*) - F_n^x(y, u_i^*)}{\sigma_{ix}} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_{ix}} \left( -\frac{\partial F_n^x(y, u_i^*)}{\partial \dot{\beta}} \right) + \gamma \frac{\partial \|y - \hat{y}\|^2}{\partial \dot{\beta}} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Совокупность функций  $f_1, f_2, \dots, f_6$  представляет собой вектор-функцию

$$f = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T.$$

Для вектора-функции  $f$  составляется матрица Якоби системы функций (3) относительно переменных  $r, \alpha, \beta, \dot{r}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}$ :

$$f'(y) = W(y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\beta}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial r} & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \dot{\beta}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_6}{\partial r} & \frac{\partial f_6}{\partial \alpha} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial \dot{\beta}} \end{bmatrix},$$

где  $y = [r, \alpha, \beta, \dot{r}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}]^T$ .

**Этап 5.** В соответствии с методом Ньютона выполняется коррекция оценок параметров движения, соответствующих точке  $a_i$ :

$$y^{p+1} = y^p - \mu \odot [W^{-1}(y^p) \cdot f(y^p)],$$

где  $W^{-1}(y^p)$  – матрица, обратная матрице Якоби, вычисляемая через LUP-разложение;

$\mu$  – вектор-столбец скоростей изменения параметров  $y$ ,  $\mu = [\mu_1, \mu_1, \dots, \mu_6]^T$ ;

$\odot$  – произведение Адамара.

**Этап 6.** Выполняется расчет величин  $S_{p+1}^{(1)}, S_{p+1}^{(2)}$ :

$$S_{p+1}^{(1)} = \frac{\sum_{i=0}^{p+1} \dot{\alpha}_i}{p+1}; \quad S_{p+1}^{(2)} = \frac{\sum_{i=0}^{p+1} \dot{\beta}_i}{p+1},$$

где  $\dot{\alpha}_i, \dot{\beta}_i$  – значения азимутальной и угловой скоростей, рассчитанные для  $i$ -той итерации уточнения параметров движения объекта. В случае выполнения системы критериев

$$\begin{cases} |S_{p+1}^{(1)} - S_p^{(1)}| \leq 10^{-9}, \\ |S_{p+1}^{(2)} - S_p^{(2)}| \leq 10^{-9}, \\ F \leq N, \end{cases}$$

где  $N$  – эмпирически вычисляемая константа, задающая допустимое значение функционала (2), значения  $y^{p+1}$  засылаются в множество экстремалей  $\{y_\delta^\gamma\}$ , формируемое для различных значений параметров регуляризации  $\gamma_i$ . В случае наличия необработанных оценок параметров движения в системе точек  $A'$  поток управления передается на этап 2, в противном случае работа метода завершается.

### ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Критерием эффективности предложенного метода является мера приближения исходных оценок параметров движения объектов в составе групп к их истинным значениям. При проведении вычислительного эксперимента смоделированы оценки параметров движения группы, состоящей из 15 объектов, путем вычисления вектора локации ее элементов тремя наземными наблюдательными сенсорами и искусственного искажения полученных таким образом значений нормально распределенными величинами, с нулевым математическим ожиданием и значениями среднеквадратических отклонений, указанными выше. Всего в эксперименте рассматривалось 45 оценок параметров движения по 15 объектам. Стабилизирующий функционал, используемый в выражении (2) –  $\|y^p - \hat{y}\|^2$ , задавался функцией квадратичной невязки:

$$\|y^p - \hat{y}\|^2 = \sum_{i=1}^6 \left( \frac{x_i(y^p) - x_i(\hat{y})}{\Delta_i} \right)^2, x_i \in \{X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}\},$$

где  $\Delta_i$  – максимальная ошибка определения  $i$ -того параметра движения, заданного в инерциальной СК по результатам оценки, сформированной в сферической СК. Для данных оценок построены соответствующие регрессионные модели для положения объектов группы и скорости движения объектов группы. Графическое представление примера согласования модели  $M(u)$  с совокупностью используемых оценок представлено на рис. 3 и 4.

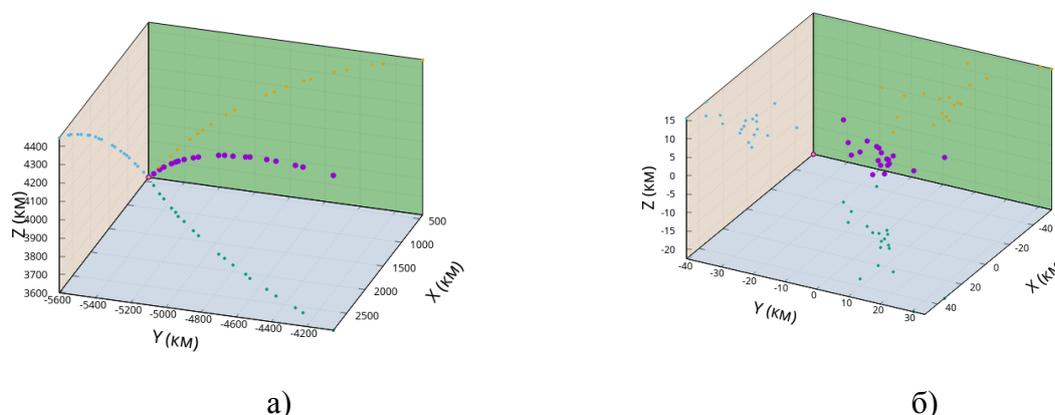


Рис. 3. Результаты применения регрессионной модели для интерполяции положения объектов:

а – положение объектов в пространстве согласно регрессионной модели; б – отклонения регрессионной модели от результатов процедуры прогноза

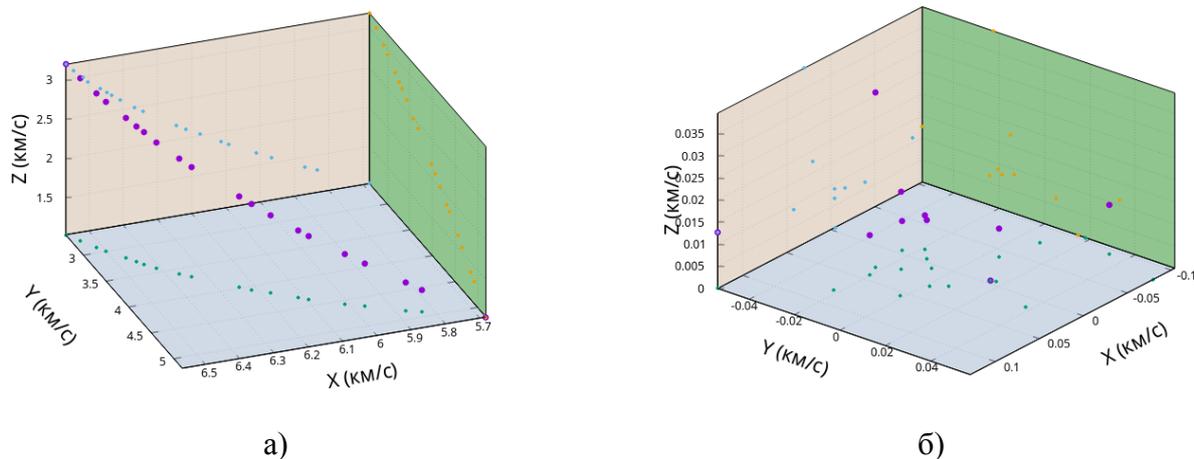


Рис. 4. Результаты применения регрессионной модели для интерполяции скорости объектов:

*a* – скорость объектов согласно регрессионной модели; *б* – отклонение регрессионной модели от результатов процедуры прогноза

Пример формирования корректированных значений параметров движения  $\alpha_k, \beta_k, \dot{\alpha}_k, \dot{\beta}_k$  для одного объекта группы представлен на рис. 5.

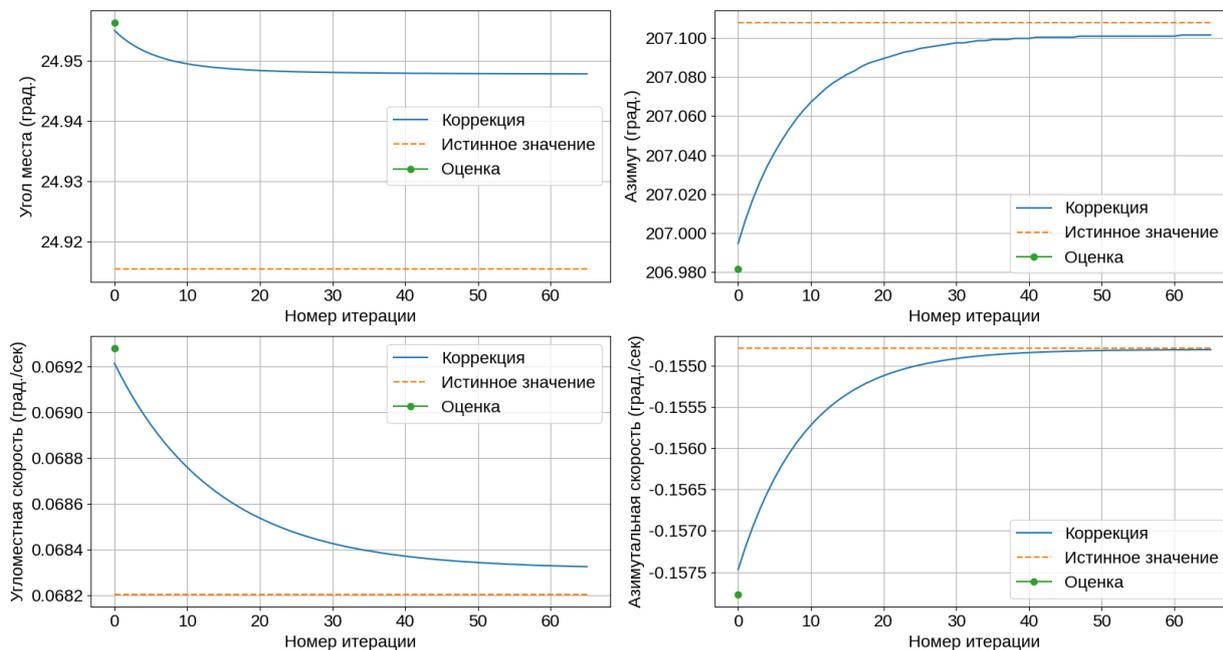


Рис. 5. Результаты коррекции угла места, азимута, угломестной и азимутальной скоростей

Динамика изменения значения функционала (2) для представленного на рис. 5 примера показана на рис. 6.

Всего в рамках рассматриваемой реализации коррекции результатов оценки выполнено 66 итераций. Шаг приращения аргументов функционала (2) в ходе выполнения численного дифференцирования принимался равным  $10^{-10}$ .

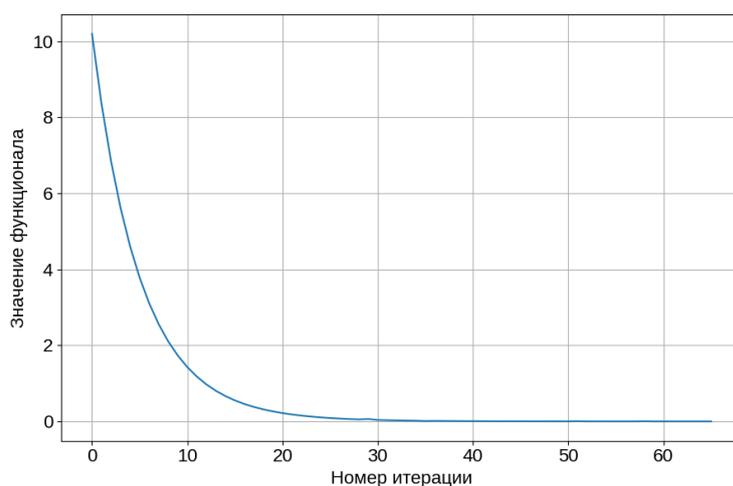


Рис. 6. Зависимость значения функционала от числа итераций

Отклонения скорректированных предлагаемым методом параметров  $\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}$  от истинных значений для 45 точек (оценок параметров движения), рассматриваемых в вычислительном эксперименте, представлены на рис. 7.

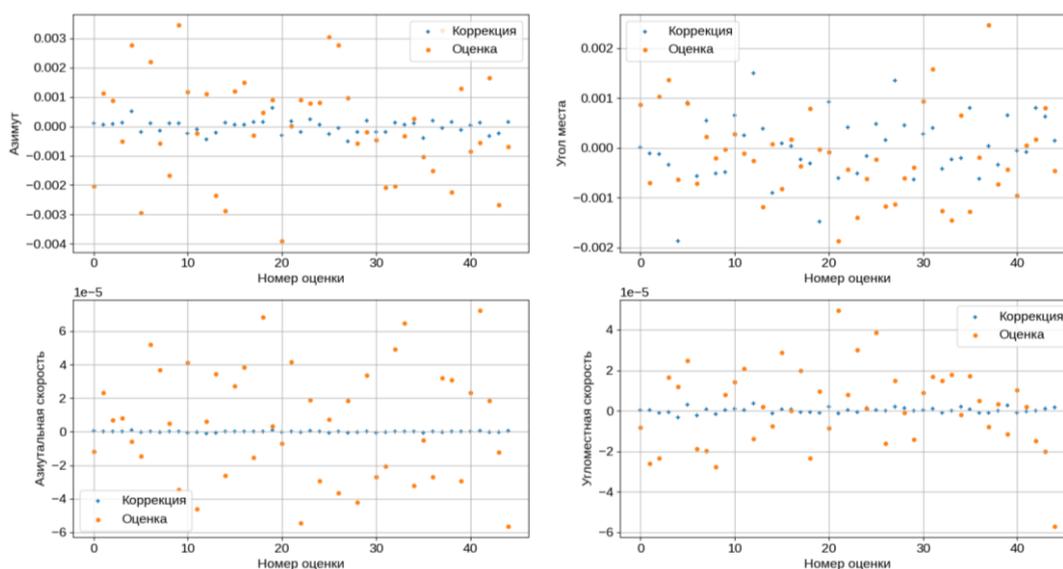
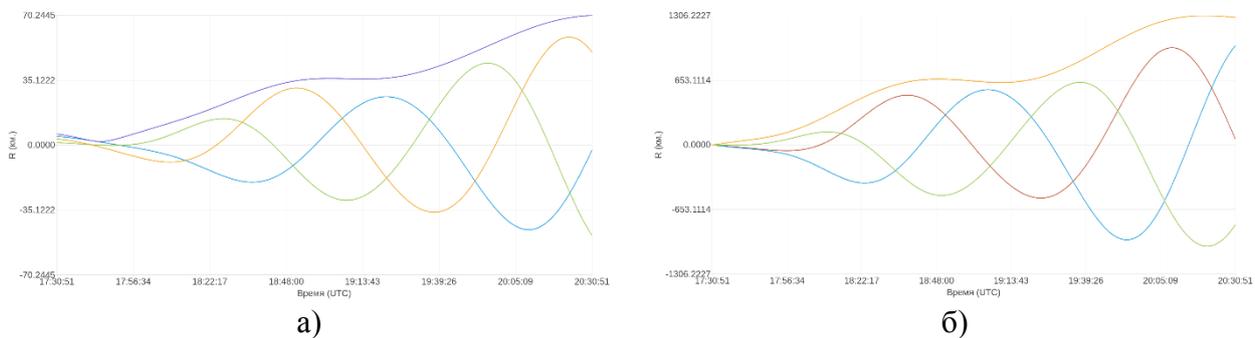


Рис. 7. Отклонения скорректированных значений параметров от истинных

Среднее квадратическое отклонение скорректированного значения азимута от истинного составило 0,00027 радиана, аналогичные значения указанной величины для угла места, азимутальной и угломестной скоростей составили 0,000651 радиана,  $3,89 \cdot 10^{-7}$  и  $1,36 \cdot 10^{-6}$  радиана в секунду соответственно. Полученные результаты увеличивают на порядок точность первоначальной оценки параметров движения объектов в составе группы. Таким образом, метод обеспечивает минимизацию выражения (1).

Главным результатом применения метода является существенное устранение ошибок измерений, содержащихся в составляющих скорости движения объектов. Данный факт обеспечивает существенное повышение достоверности прогноза движения космических объектов на основе лишь одного координатного измерения. Сравнение ошибок результатов прогноза

положения объекта на околоземной орбите для исходных параметров движения, для которых выполнялась процедура коррекции, и параметров, для которых коррекция не выполнялась, представлено на рис. 8.



*Рис. 8. Итоговая ошибка прогноза положения объекта в пространстве и ее разложения по осям инерциальной СК:  
а – для скорректированных параметров движения; б – для параметров движения, непосредственно сформированных сенсором*

Предложенный метод реализован программно, возможность независимо выполнять основные этапы метода для всей совокупности объектов группы обеспечивает линейное распараллеливание вычислительной процедуры между микропроцессорными вычислительными ядрами. Общее время вычислений, производимых по одному объекту группы с использованием современных средств вычислительной техники, например, вычислительного ядра микропроцессора *Intel Core i3* 11-го поколения, не превышает десятков секунд.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод является средством повышения точности оценок параметров движения объектов, входящих в состав группы, совершающей движение по единой траектории (следу). Область прикладного применения описанного метода определяется характером функциональных зависимостей связывающих систему точек  $A$  и  $A'$ .

Представленные в статье материалы вычислительного эксперимента не содержат результатов оценок параметров  $r, \hat{r}$ , поскольку считается, что точность их оценивания по сравнению с угловыми характеристиками движения не оказывает существенного влияния на структуру системы точек  $A'$ . Вместе с тем предложенный метод обеспечивает повышение точностных характеристик оценивания и этих параметров тоже.

Дальнейшим направлением развития метода является исследование выбора стабилизирующего функционала, фактически реализующего регулирующий алгоритм коррекции.

## Список используемых источников

1. Хатчер А. Алгебраическая топология / пер. с англ. В. В. Прасалова под ред. Т. Е. Панова. – М. : МЦНМО, 2011. – 688 с.
2. Субботин М. Ф. Введение в теоретическую астрономию. – М. : Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1968. – 800 с.
3. Космический мусор: в 2 кн. / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – Кн. 1 : Методы наблюдения и модели космического мусора. – 248 с.

В. В. Козлов,  
*доктор технических наук, профессор;*  
М. Д. Коноплёв;  
А. В. Лагун,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
В. А. Харченко

## **СИНТЕЗ СРЕДСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОПАСНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В статье дано представление об уровне пусковых нагрузок, возникающих при пуске ракеты космического назначения. Оценена роль пускового оборудования при организации пуска ракеты. Описан способ, позволяющий снизить уровень таких нагрузок и размер деструктивного воздействия на стартовое сооружение и элементы пускового оборудования. Определена роль газодинамической схемы пуска при проектировании стартового комплекса. Также рассчитан показатель целевой эффективности для части пусковых процессов. Предложены варианты системы охлаждения для снижения уровня пусковых нагрузок.

Ключевые слова: пусковые нагрузки, пусковое оборудование, газоход, система подачи воды, газодинамическая схема пуска, эффективность процесса.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Технологический процесс производства пуска ракеты космического назначения (РКН) зависит от нескольких факторов:

- внешних ограничений на производство пуска;
- проектных решений, связанных с технологией подготовки и пуска;
- конструктивно-компоновочных показателей технологического оборудования, участвующего в производстве пуска;
- характеристик режимных параметров процесса пуска.

Наличие перечисленных факторов прежде всего связано с уникальностью ракет-носителей и технологического оборудования, участвующего в пуске.

### **РОЛЬ ПУСКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Ведущая роль в технологическом процессе подготовки и пуска РКН отведена пусковому оборудованию.

В общем случае пусковое оборудование, необходимое для подготовки и пуска РКН, должно решать следующие технологические задачи:

- прием РКН от транспортных или установочных агрегатов и ее размещение на своих опорах;
- установку РКН в положение для стыковки с системами наземного комплекса;
- вертикализацию и азимутальное наведение инерциальных систем управления РКН;
- удержание РКН при выходе на режим номинальной тяги ее двигательной установки;
- обеспечение устойчивого положения для РКН при воздействии ветра;
- выдерживание направления движения РКН на начальном этапе полета;
- отвод газовой струи продуктов сгорания и обеспечение защиты РКН от силового, теплового и акустического воздействия при пуске.

Естественно, что задачи, решаемые пусковым оборудованием (ПО), неразрывно связаны с условиями, в которых они решаются.

Одна из задач функционирования пускового оборудования решается при непосредственном воздействии на него процесса пуска. Причем физическая картина данного процесса сложна и малоизучена.

Нагрузки на ПО, возникающие при подготовке РКН и ее пуске, их масштаб и сложность выделяют ПО из общего состава технологического оборудования стартового комплекса.

Все время подготовки на стартовом комплексе РКН проводит на пусковом оборудовании, с этого же оборудования происходит пуск ракеты.

Можно определить следующий перечень нагрузок, действующих на ПО, при реализации технологического процесса подготовки РКН:

– весовая нагрузка от РКН, распределяемая на опоры пускового устройства. Для размещения РКН на пусковом устройстве применяются от четырех и более опор. Такое распределение нагрузки на опорный контур делает его статически не определимым, в случае же динамического изменения весовой нагрузки (перемещение или заправка РКН) задача проведения расчетов еще более усложняется;

– ветровая нагрузка, передаваемая на опоры пускового устройства через корпус РКН, постоянно изменяется при нахождении на стартовом комплексе.

Значения данных нагрузок изменяются со временем, и они являются нестационарными.

При проведении пуска РКН проявляются пусковые нагрузки, которые включают в себя ударно-волновое, статическое, вибрационное и акустическое воздействие от давления струи двигательной установки, а также тепловое нагружение на элементы пускового оборудования от действия лучистых и конвективных тепловых потоков, от действия струи двигательной установки. Действие этих нагрузок вызывает процессы тепловых ударов, тепловых волн, плавления и абляции материалов, из которых изготовлено ПО.

Кроме того, процесс функционирования ПО протекает в условиях возможного пролива компонентов ракетных топлив при проведении заправки РКН и их испарения, что приводит к заполнению парами компонентов ракетных топлив (КРТ) газоходов пусковых устройств.

При запуске двигательной установки происходит одномоментное взрывное возгорание КРТ, вызывающее распространение значительных по величине ударных волн по газоходу пускового устройства. В случае же выполнения команды «Аварийное выключение двигателей» в этих же газоходах уже распространяются волны разрежения, которые также оказывают деструктивное воздействие на элементы ПО.

В процессе работы двигательной установки (ДУ) и ее выхода на номинальный режим (стабильная работа ДУ, позволяющая набрать ей необходимую тягу) элементы ПО воспринимают экстремальное силовое и тепловое воздействие как от струи продуктов сгорания КРТ, так и от эжектируемого в газоход окружающего ПО турбулентного воздушного потока. Сама работа двигательной установки РКН вызывает сильные акустические нагрузки большой интенсивности.

Использование для снижения температурных нагрузок системы охлаждения вызывает негативное воздействие воды из данной системы на газоход ПО, что является следствием выброса из насадок водоводов систем охлаждения защитного толкающего газа и диспергированной воды. Работа системы охлаждения сопровождается накоплением в нижней части газоходов использованной воды.

Вследствие такой физической картины условий функционирования ПО, формируется целый ряд требований к его конструктивному исполнению и эксплуатации. Необходимо, чтобы эти требования органично «вписывались» в общие требования, предъявляемые к функционированию стартового комплекса. Должно выполняться условие долговременной эксплуатации таких объектов. Причем, как правило, назначенный ресурс эксплуатации комплекса составляет не менее 50 циклов пусков РКН. Учитывая описанную ранее физическую картину функционирования ПО, можно сделать вывод, что конструкция такого оборудования в зна-

чительной степени определяет как облик стартового комплекса, так и состав операций, объединенный в технологический процесс подготовки и пуска РКН. Анализ развития ПО показывает, что до сих пор нет устоявшегося определения для ПО. В нормативно-технической и научной документации встречаются такие названия, как пусковая установка, пусковой стол, пусковая платформа, пусковая система, пусковое сооружение.

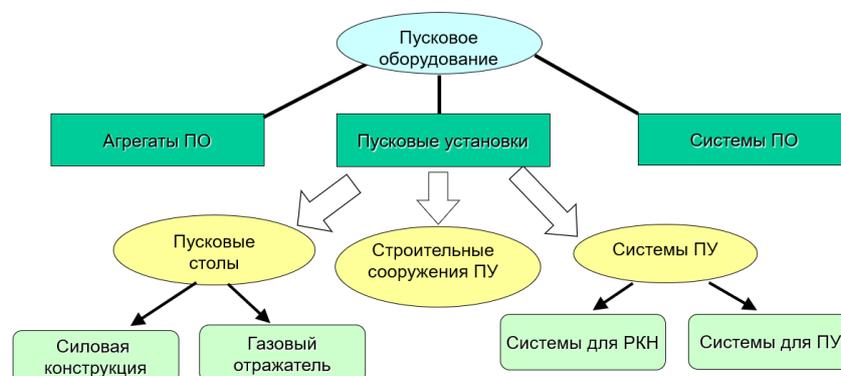


Рис. 1. Структура пускового оборудования

Современная структура этого вида оборудования имеет вид, представленный на рис. 1. Поиск адекватной структуры и классификации ПО продолжается.

## СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗОК НА ЭЛЕМЕНТЫ ПУСКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПУСКЕ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Основным условием успешного пуска РКН с ПО является сохранность корпуса РКН при запуске ДУ и отсутствие его критического нагрева при наборе двигательной установкой номинальной тяги. Набор номинального значения тяги требует определенного времени, в течение которого РКН с работающей ДУ находится на ПО. При этом газодинамический тракт ПО подвержен существенным пусковым нагрузкам от воздействия продуктов сгорания КРТ. В газоходе протекают серьезные ударно-волновые процессы, выраженные в распространении струи продуктов сгорания по всей его длине. При этом отраженные от стен газохода волны способны деструктивно и мощно воздействовать как на саму РКН, так и на стартовое сооружение и элементы ПО. Поэтому правильно выбранная газодинамическая схема пуска РКН (рис. 2) может обеспечить при пуске безопасную эксплуатацию как самой ракеты, так и участвующего в этом процессе технологического оборудования. Это достигается выполнением задачи эффективного отвода от РКН струи продуктов сгорания.

Процесс отвода газовой струи двигательной установки при пуске РКН заключается в проведении следующих мероприятий:

- в своевременном повороте сверхзвуковой струи в процессе ее распространения в газоход;
- в обеспечении отвода тепловых потоков от струи двигательной установки в газодинамический тракт ПО.

Оценку эффективности таких процессов проводят с помощью оценки показателей потенциальной эффективности процессов преобразования свойств газодинамического потока.

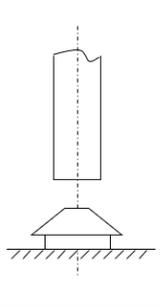
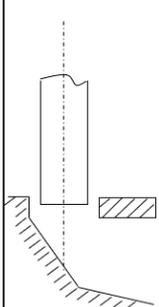
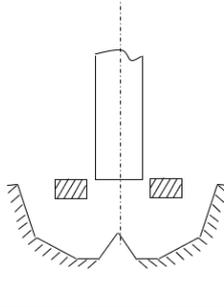
		
НАЗЕМНАЯ	КОТЛОВАННАЯ	
РКН «Космос», «Циклон-3»	РКН «Циклон-2», «Зенит», «Союз», «Ангара»	РКН «Энергия», «Протон»

Рис. 2. Газодинамические схемы пуска

Для рассматриваемого выше технологического процесса (силового нагружения) может быть использовано соотношение с целью оценивания эффективности газодинамической части процесса пуска

$$W_{ГД}^{пот} = \frac{E_{тр}}{E_{реал}} = \frac{p_{01}}{p_{02}} = \left[ \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{(M \sin \beta)^{\frac{2k}{k-1}}}{\left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \sin^2 \beta \right)^{\frac{k}{k-1}} \left( k M^2 \sin^2 \beta - \frac{k-1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}}} \right]^m < 0,3,$$

где  $p_{01}$  – значение полного давления в падающей струе;  
 $p_{01}$  – значение полного давления за скачками уплотнения вдоль газохода;  
 $M$  – число Маха;  
 $\beta$  – угол наклона скачка;  
 $k$  – коэффициент адиабаты для продуктов сгорания ДУ.

Из данного соотношения вытекает необходимость тщательного профилирования газоходов. С учетом реальных и неизбежных гидравлических потерь значение показателя целевой эффективности для этой части пусковых процессов может составить

$$W_{ГД} = W_{ГД}^{пот} \zeta \eta \lambda = 0,03 \div 0,01,$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;  
 $\eta$  – коэффициент потерь в скачках;  
 $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения.

Тепловое нагружение ПО при пуске оценивается соотношениями, построенными на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности, согласно которым

$$W_{ТД}^{пот} = \frac{Q_{ст}}{Q_{ст0}} = \frac{\alpha(T_{ст} - T_{г})}{\alpha(T_{ст0} - T_{г})} = \bar{T},$$

$$W_{ТД}^{пот} = \left[ \sum_i^{\infty} \frac{2 \sin^2 \xi_i}{\xi_i^2 + \xi_i \sin \xi_i \cos \xi_i} \exp(-\xi_i^2 F_0) \right] = 0,05 \div 0,12;$$

где  $Q$  – тепловые потоки;  
 $F_0$  – число Фурье (безразмерное время);  
 $\xi_i$  – корни уравнения  $\xi \operatorname{tg} \xi = Bi$ . Здесь  $Bi$  – число Био, при этом  $Bi = \alpha \delta / \lambda$ , где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\delta$  – толщина стенки,  $\lambda$  – теплопроводность материала).

Повышение показателя потенциальной эффективности и обеспечение безопасности выполнения этой операции возможны за счет выбора другого вида пуска (например, катапультного) или повышения стойкости ПО.

В условиях режимных параметров современных РКН необходимо проведение следующих мероприятий:

- увеличения стойкости к нагрузкам конструкционных материалов, из которых изготовлена ракетно-космическая техника;
- проведения большого объема послепусковых ремонтно-восстановительных работ.

Все перечисленные мероприятия оказываются экономически дорогостоящими и ресурсоемкими, и потому являются недостаточно эффективными. В связи с этим в состав ПО неизбежно должны войти специальные средства, позволяющие обеспечить безопасность технологического процесса подготовки и пуска РКН путем снижения пусковых нагрузок.

На основании разработанной ранее системы физических предпочтений для процессов системы обеспечения безопасности (СОБ) ПО при пуске может быть предложена двухфазная технология поглощения потока пусковых нагрузок.

Реализация такой технологии выполнена в РКК «Зенит» – система охлаждения 11Г443 (рис. 3) и РКК «Энергия – Буран» – система 17Г827 на УКСС (рис. 4).

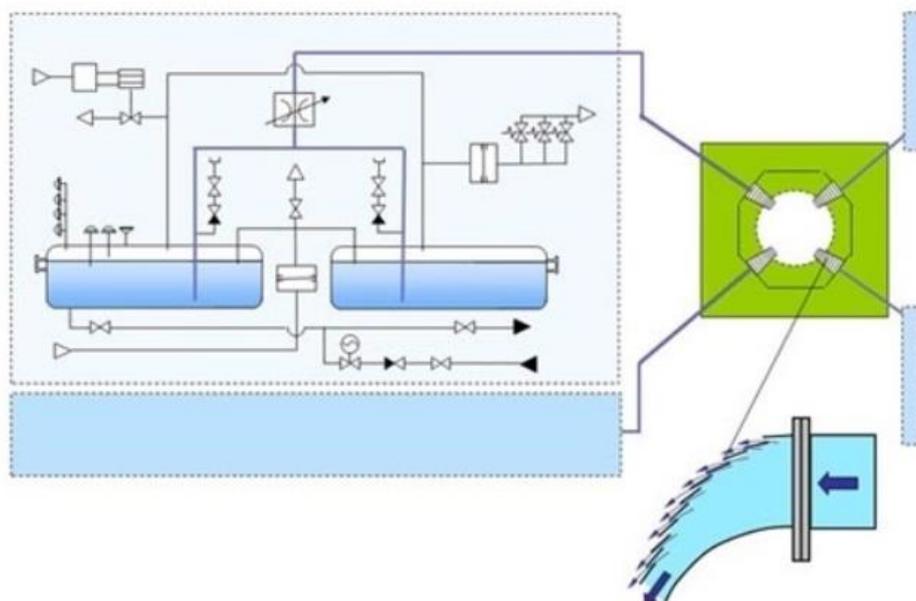


Рис. 3. Система охлаждения 11Г443 РКК «Зенит»

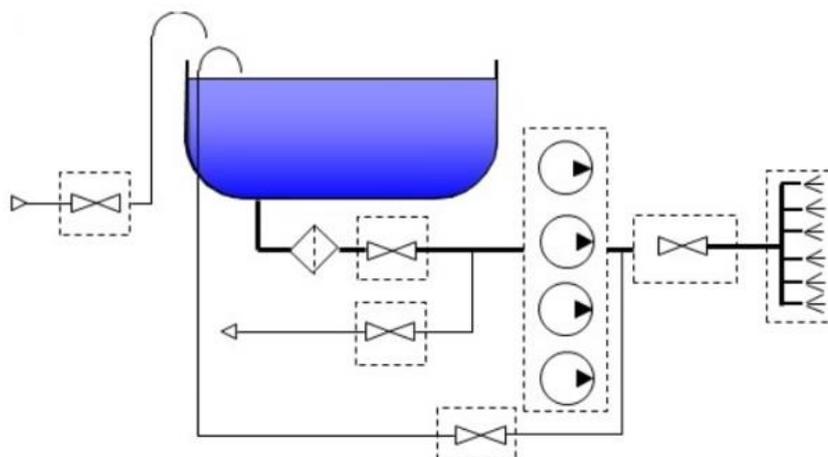


Рис. 4. Система охлаждения 17Г827 РКК «Энергия – Буран»

Анализ процесса функционирования системы подачи воды может быть проведен с использованием общего вида уравнения Громеки – Лэмба

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \text{grad} \left( \frac{u^2}{2} \right) + 2 \text{rot} \bar{u} \times \bar{u} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p,$$

где  $u$  – скорость течения воды;  
 $t$  – время;  
 $\rho$  – давление;  
 $F$  – вектор объемных сил.

Последнее уравнение может быть преобразовано в выражение

$$\frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z + \frac{V^2}{2g} = \frac{1}{g} \int_l \frac{\partial u_i}{\partial t} dl + \sum_i \lambda_i \frac{l_i V_i^2}{d 2g} + \sum_i \zeta_i \frac{V_i^2}{2g}$$

где  $\Delta p$  – перепад давления;  
 $\Delta z$  – пьезометрический напор;  
 $u$  – скорость течения жидкости;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $l$  – длина соответствующих участков гидросистемы;  
 $\lambda$  – коэффициент трения;  
 $\zeta$  – коэффициент местных потерь;  
 $\rho$  – плотность жидкости.

Из последнего равенства можно получить выражение для показателя эффективности процесса подачи воды для гидравлических систем в виде

$$W = \frac{pQ}{(p + \Delta p_{\text{потерь}})Q} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta p_{\text{потерь}}}{p}},$$

где  $p$  и  $Q$  – потребные для снижения на заданный уровень величины давления и расхода жидкости в системе СОБ ПО. Анализ этого выражения с позиций выбора предпочтений позволяет сформулировать следующие рекомендации:

- для снижения общего уровня сопротивлений количество элементов в гидросистемах должно быть минимально возможным;
- течение жидкости в каналах должно быть потенциальным ( $\text{rot } u = 0$ ), т. е. использование насосных систем подач жидкости нежелательно.

Для систем подачи воды в СОБ ПО можно получить следующее выражение для показателя безопасности процессов функционирования таких систем в виде

$$\bar{Y}_{\text{безопасно}} = 1 - \bar{P} \bar{I} \frac{\bar{G} \bar{F} N_{\text{тр}}^{\text{н}}}{\bar{E}_s^2 [N]} \left( \frac{1-W}{W} \right), \quad (1)$$

где  $\bar{P}$  – относительная вероятность появления опасной ситуации;  
 $\bar{I}$  – относительная ошибка информационного потока в систему управления;  
 $\bar{G}$  – относительный расход опасного вещества;  
 $\bar{F}$  – относительная площадь воздействия опасного фактора на защищаемый объект;  
 $\bar{E}_s$  – относительная энергия диссипации в конструкционных элементах защищаемого объекта;  
 $N_{\text{тр}}^{\text{н}}$  – требуемая целевая мощность функционирования системы подачи воды;  
 $N$  – реальная мощность, потребляемая системой подачи воды;  
 $W$  – показатель эффективности функционирования системы подачи воды.

Практика создания системы 17Г827 показала, что потребная мощность  $N_{\text{тр}}^{\text{н}}$  для запуска насосов на номинальный режим составила 100 МВт. Следовательно, общий уровень ресурсопотребления для этой системы свидетельствует о низкой эффективности, а в соответствии

с полученным выражением для показателя безопасности процессов ее функционирования существенно снижается и безопасность процесса, реализуемого в системе СОБ ПО.

В то же время оценочные соотношения для системы 11Г443 показывают, что требуемые параметры расходов и значений создаваемого напора завышены. Это можно продемонстрировать ориентировочным расчетом потребного расхода воды по схеме, представленной на рис. 5.

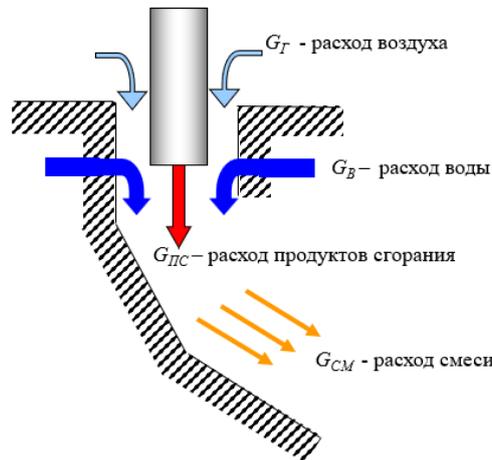


Рис. 5. Схема расчета потребного расхода воды

На схеме введены следующие обозначения:

- $G^{пс}$  – расход газа продуктов сгорания;
- $G^Г$  – расход эжектируемого воздуха;
- $G^Б$  – расход воды в системе охлаждения;
- $G^{см}$  – расход смеси.

В основу оценочного расчета можно положить методику расчета эжекционных процессов в канале газохода.

Если система охлаждения не работает  $G^Б = 0$ , то из законов сохранения массы следует:

$$G^{см} = G^{пс} + G^Г; G^Г / G^{пс} = n; G^{см} / G^{пс} = n + 1,$$

где  $n$  – коэффициент эжекции.

Аналогичным образом из закона сохранения энергии следует:

$$G^{см} c_p^{см} T_0^{см} = G^{пс} c_p^{пс} T_0^{пс} + G^Г c_p^Г T_0^Г, \tag{2}$$

где  $c_p$  – теплоемкость;

$T_0$  – температура торможения;

СМ, ПС, Г – индексы для смеси, продуктов сгорания ДУ РКН и воздуха.

Из соотношения (2) можно найти

$$\frac{T_0^{см}}{T_0^{пс}} = \frac{n \bar{c}_p^Г \Theta + 1}{(n + 1) \bar{c}_p^{см}},$$

где

$$\bar{c}_p^Б = \frac{c_p^Б}{c_p^{пс}}; \bar{c}_p^{см} = \frac{c_p^{см}}{c_p^{пс}}; \Theta = \frac{T_0^Б}{T_0^{пс}}.$$

Если ввести предположение (допустимое для одиночных расчетов), что вода, поступающая в газоход из системы охлаждения, не оказывает заметного влияния на газовую динамику процесса, а только поглощает тепло потока, то можно записать зависимость

$$G^{см} c_p^{см} T_0^{см} = G^{пс} c_p^{пс} T_0^{пс} + G^Г c_p^Г T_0^Г - Q^Б, \tag{3}$$

где  $Q^Б$  – поглощаемое водой тепло.

Поскольку процесс поглощения содержит нагрев воды  $\alpha Q^B$ , парообразование  $\beta Q^B$  и нагрев пара  $\gamma Q^B$ , то

$$\begin{cases} Q^B = \alpha Q^B + \beta Q^B + \gamma Q^B, \\ \alpha + \beta + \gamma = 1. \end{cases}$$

Значение весовых коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  определить сложно, но при условии, что в высокоскоростном потоке испарение полностью закончится к концу газоотводного тракта, можно считать:

$$Q^B \cong G^B(c_p^B T^B + L)$$

где  $c_p^B$  – теплоемкость воды;  
 $T^B$  – средняя температура воды;  
 $L$  – удельная теплота парообразования.

Соотношение (2) преобразуется в зависимость

$$\frac{T_0^{CM}}{T_0^{PC}} = \frac{n\bar{c}_p^B \Theta + 1 - m(\bar{c}_p^B + \bar{T}^B \bar{L})}{(n+1)\bar{c}_p^{CM}},$$

где

$$m = \frac{G^B}{G^{PC}}; \bar{T}^B = \frac{T^B}{T^{PC}}; \bar{L} = \frac{L}{c_p^{PC} T_0^{PC}}.$$

Решение уравнений для эжекционных процессов в ПУ дает значение коэффициента эжекции  $n = 1,2 \div 1,5$ .

Считая, что исходные данные имеют следующие значения:

$$T_0^{PC} = 3500 \text{ К}; T_0^r = 350 \text{ К}; T^B = 370 \text{ К}; c_p^{PC} = 2300 \text{ Дж/(кгК)};$$

$$c_p^r = 1000 \text{ Дж/(кгК)}; c_p^B = 4200 \text{ Дж/(кгК)}; L = 2,26 \text{ Дж/кг},$$

получим

$$\frac{T_0^{CM}}{T_0^{PC}} \cong 0,5 \div 0,25m$$

или с учетом выражения (1)

$$\bar{T} = \frac{(T_0^{CM})_{\text{с охл}}}{(T_0^{CM})_{\text{без охл}}} = 1 \div 0,25m.$$

Можно видеть, что снижение температур в 2 раза ( $T_0^{PC} = 3500 \text{ К}$ ,  $T_{\text{плавления}}^{\text{стали}} = 1870 \text{ К}$ ) потребует расхода воды в 2 раза больше, чем массовый расход ДУ РКН. Точность получения оценок достаточна, чтобы представить масштаб расходных характеристик систем охлаждения. Однако такого рода расчет показывает, что для повышения безопасности ПО и эффективности его СОБ подача воды может быть организована с меньшими расходами в первую очередь за счет более мелкого диспергирования воды, снижения инерционности системы и снижения значительного сопротивления гидравлического тракта – порядка 65–70% давления газа на зеркало воды в емкостях для ее хранения.

Численные эксперименты свидетельствуют, что при пленочном охлаждении газодинамического тракта, когда нет необходимости глубокого проникновения в толщу струи, общий уровень расхода и начального давления воды может быть существенно снижен.

Снижение таких параметров приводит к росту эффективности системы подачи воды и повышению уровня безопасности ПУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный математический аппарат позволяет обозначить общее направление в поиске оптимальной системы охлаждения струи продуктов сгорания двигательной установки. Следуя рассматриваемым ранее рекомендациям, можно предложить систему, осуществляю-

щую снижение пусковых нагрузок на необходимую величину и в основе которой положен анализ соотношения (1). Данный анализ показывает, что основным направлением поиска новых технологий для систем подачи воды является поиск пути повышения эффективности процессов функционирования указанных систем. При этом возможна оценка эффективности процессов охлаждения газодинамического тракта, осуществляемого системой обеспечения безопасности пускового оборудования.

### Список используемых источников

1. Наземное технологическое оборудование : учебник / В. В. Козлов [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2023. – 534 с.
2. Смирнов В. И. Методология обеспечения безопасности стартовых комплексов при их проектировании. – М. : МАИ, 2003. – 139 с.
3. Газодинамика стартовых комплексов / Г. П. Бирюков [и др.]. – М. : Рестарт, 2012. – 364 с.
4. Решение задачи оценивания пусковых нагрузок и выбора параметров газоотражателя / А. В. Лагун [и др.]. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 6. – С. 51–62.
5. К вопросу оценивания газодинамических нагрузок на пусковые установки ракет космического назначения и выбора параметров схемы газоотражательного устройства / А. В. Лагун [и др.] // Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – М. : Изд-во Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2020 – Т. 3. – С. 284–290.
6. Лагун А. В., Козлов В. В., Сыров А. Д. Исследование путей управления уровнем газодинамических нагрузок при пуске ракеты космического назначения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 2. – С. 470–482.
7. Решение задачи снижения пусковых нагрузок при пуске ракет космического назначения с помощью охлаждения струи продуктов сгорания / А. В. Лагун [и др.] // Труды XXIV Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – М. : Изд-во Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2021. – Т. 3. – С. 314–322.

В. С. Конищев;  
Г. Н. Мальцев,  
*доктор технических наук, профессор*

## **ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕШУМОВЫХ ПОМЕХ**

Представлены аналитические зависимости для анализа отношений сигнал/помеха на входе решающего устройства в радиотехнических системах передачи информации с сигналами с расширением спектра в условиях нешумовых помех при оптимальном приеме сигналов с использованием обесцвечивающего фильтра. Результаты расчетов отношения сигнал/помеха на входе решающего устройства в условиях нешумовых помех сравниваются со значениями отношения сигнал/шум при оптимальном приеме сигнала в условиях шумовой помехи при таких же энергетических характеристиках сигнала и помехи.

Ключевые слова: оптимальный прием сигналов, потенциальная помехоустойчивость, нешумовая помеха, обесцвечивающий фильтр.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время широко распространено использование в радиотехнических системах (РТС) передачи информации сигналов с прямым расширением спектра фазовой модуляцией псевдослучайной последовательностью (ПСП) по технологии DSSS. Области применения таких РТС являются широкополосные системы профессиональной радиосвязи с высокой помехозащищенностью, системы мобильной радиосвязи с кодовым разделением каналов, командно-измерительные системы управления космическими аппаратами [1–3].

Функционирование РТС передачи информации происходит в условиях помех, как естественных, так и преднамеренных, уровень и структура которых могут изменяться в широких пределах [4, 5]. Базы сигналов с расширением спектра на основе ПСП составляют от нескольких десятков до нескольких тысяч, и в полосе пропускания приемных устройств РТС передачи информации могут действовать как широкополосные, так и узкополосные (относительно ширины полосы частот сигнала) помехи. Будем понимать под шумовыми широкополосными помехами с постоянной спектральной плотностью мощности в полосе частот приемного устройства, которые могут быть описаны моделью белого шума, а под нешумовыми – узкополосными помехами со спектральной плотностью мощности, не являющейся постоянной в полосе частот приемного устройства, которые не могут быть описаны моделью белого шума.

Достоверность передачи сообщений в условиях помех определяется помехоустойчивостью РТС передачи информации. Наиболее распространенными являются оценки помехоустойчивости РТС передачи информации при приеме сигналов в условиях белого гауссовского шума [6, 7]. Эти оценки могут быть отнесены к приему сигналов в условиях шумовых помех. При анализе помехоустойчивости РТС передачи информации с сигналами с расширением спектра практический интерес имеет рассмотрение приема сигналов в условиях нешумовых помех. Для этого случая схема оптимальной обработки принимаемых сигналов при известной спектральной плотности мощности действующих нешумовых помех дополняется использованием так называемого обесцвечивающего фильтра [5, 6]. В настоящей статье исследуется потенциальная помехоустойчивость РТС передачи информации в условиях нешумовых помех при аппроксимации их спектральной плотности мощности моделью марковского процесса первого порядка.

## ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕШУМОВЫХ ПОМЕХ

Под потенциальной помехоустойчивостью РТС принято понимать помехоустойчивость, достигаемую при оптимальном приеме сигналов в условиях белого гауссовского шума [6, 7]. Для такого случая известны схемы оптимальной обработки принимаемых сигналов, а достижимые при этом значения показателей помехоустойчивости характеризуют потенциальную помехоустойчивость РТС передачи информации в условиях шумовых помех. При передаче дискретных сообщений она характеризуется вероятностями ошибочного приема символов кода и сообщений.

Если на входе приемного устройства РТС действуют сигнал  $s(t)$  и шумовая помеха  $n(t)$ , то при оптимальном приеме сигналов для входного процесса  $x(t)=s(t)+n(t)$  на интервале длительности сигнала  $\Delta T$  вычисляется корреляционный интеграл:

$$Z = \int_0^{\Delta T} x(t)s(t)dt. \quad (1)$$

При этом в качестве функции  $s(t)$  выступает формируемый в приемном устройстве опорный сигнал, соответствующий известному сигналу.

При приеме сигналов в РТС передачи информации решается задача различения сигналов, соответствующих различным информационным символам. В двоичных системах передачи

информации для этого вычисляются значения  $Z_i = \int_0^{\Delta T} x(t)s_i(t)dt$ ,  $i=0,1$  корреляционного инте-

грала (1) для значений сигнальной составляющей  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$ , соответствующих символам «0» и «1» двоичного кода. Решение о переданном символе при симметричном коде принимается по наибольшему значению соответствующего корреляционного интеграла  $Z_i$ .

При фиксированных значениях энергии сигнала  $E_c = \int_0^{\Delta T} s_0^2(t)dt = \int_0^{\Delta T} s_1^2(t)dt$  и постоянной

в полосе частот приемного устройства спектральной плотности мощности шумовой помехи  $N_0$  оптимальная обработка с вычислением корреляционных интегралов  $Z_i$ ,  $i=0,1$  обеспечивает наибольшее отношение сигнал/шум  $q_0 = E_c/N_0$  на входе решающего устройства при выделении символов кода и, соответственно, наименьшую вероятность ошибочного приема символа кода при посимвольном приеме.

При приеме сигналов в условиях нешумовых помех  $n(t)$  спектральная плотность мощности помехи  $N(f)$  не является постоянной в полосе частот приемного устройства. В этом случае для реализации оптимального приема выполняется преобразование входного процесса с помощью обеляющего фильтра [5, 6]. Обеляющий фильтр имеет коэффициент передачи  $|K(f)|^2=1/N(f)$ , благодаря этому нешумовая помеха после его прохождения приобретает свойства белого шума и решение задачи различения сигналов становится возможным на основе вычисления корреляционных интегралов для входного процесса  $x(t)$  и опорных сигналов  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$ , прошедших отбеливающий фильтр.

Условием реализации обеляющего фильтра является наличие информации о спектральной плотности мощности  $N(f)$  действующей помехи. Также имеются ограничения физической реализуемости обеляющего фильтра, связанные с обеспечением коэффициента передачи  $|K(f)|^2 = 1/N(f)$  в случае, если спектральная плотность мощности помехи  $N(f)$  имеет нулевые значения в полосе частот приемного устройства. Опорные сигналы пропускаются через такой же обеляющий фильтр, как обеляющий фильтр на входе приемного устройства для обеспечения их соответствия сигнальной составляющей  $s(t)$  входного процесса  $x(t)$ , которая преобразуется обеляющим фильтром вместе с помеховой составляющей  $n(t)$ .

Если нешумовая помеха  $n(t)$  имеет спектральную плотность мощности  $N(f)$ , то при оптимальном приеме сигнала с использованием обесцвечивающего фильтра (полагается, что он физически реализуем) отношение сигнал/помеха на входе решающего устройства определяется в соответствии с выражением [6]

$$q_1 = \int_{(\Delta F)} \frac{S(f)}{N(f)} df, \quad (2)$$

где интегрирование по частоте  $f$  выполняется в пределах полосы частот приемного устройства  $\Delta F$ . А при определении энергии сигнала в виде  $E_c = \int_{(\Delta F)} S(f) df$  по его энергетическому

спектру  $S(f)$  отношение сигнал/шум на входе решающего устройства при приеме сигнала в условиях шумовой помехи  $n(t)$  находится в соответствии с выражением

$$q_0 = \frac{1}{N_0} \int_{(\Delta F)} S(f) df. \quad (3)$$

Сравним значения отношений сигнал/шум  $q_0$  и сигнал/помеха  $q_1$  в предположении равенства энергетических характеристик шумовой и нешумовой помех:

$$N_0 = \frac{1}{\Delta F} \int_{(\Delta F)} N(f) df. \quad (4)$$

С учетом введенного ограничения (4) можно записать соотношение между отношениями сигнал/шум  $q_0$  и сигнал/помеха  $q_1$ , достижимыми при оптимальном приеме сигнала в условиях шумовых и нешумовых помех в следующем виде:

$$\frac{q_1}{q_0} = \frac{\int_{(\Delta F)} N(f) df \int_{(\Delta F)} \frac{S(f)}{N(f)} df}{\Delta F \int_{(\Delta F)} S(f) df}, \quad (5)$$

При одинаковых энергетических характеристиках сигнала и помехи для анализируемых случаев приема сигнала в условиях шумовых и нешумовых помех при анализе отношения  $q_1/q_0$ , определяемого выражением (5), принципиальное значение имеет вид энергетического спектра сигнала  $S(f)$  и спектральной плотности мощности нешумовой помехи  $N(f)$ .

После прохождения линейного тракта приемного устройства РТС энергетический спектр фазоманипулированного сигнала с расширением спектра на основе ПСП имеет вид [1, 5]

$$S(f) \equiv \left[ \frac{\sin(\pi f \Delta t)}{\pi f \Delta t} \right]^2. \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – длительность символа модулирующей ПСП. Ширина полосы частот по первому нулевому минимуму энергетического спектра (6) составляет  $\Delta F = 2/\Delta t$  и обратно пропорциональна длительности элемента ПСП  $\Delta t$ .

Действующие в радиолинии нешумовые помехи при достаточно общих предположениях об их структуре удобно описывать моделью марковского процесса первого порядка [8]. Так, для помех с полосой частот  $\Delta F_n$ , действующих в части полосы частот сигнала  $\Delta F$  ( $\Delta F_n < \Delta F$ ), спектральная плотность мощности аппроксимирующего дискретного марковского процесса первого порядка имеет вид

$$N(f) \equiv \frac{\alpha}{\alpha + 4\pi^2 f^2}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – параметр аппроксимации. Спектральная плотность мощности  $N(f)$  вида (7) не имеет нулевых значений во всем диапазоне конечных значений частоты  $f$ , и для нее реализуем обесцвечивающий фильтр с коэффициентом передачи  $|K(f)|^2 = 1/N(f)$ .

Для определения параметра  $\alpha$  был проведен анализ величины квадратичной метрики  $D = \int_0^{\Delta\tau} [r_n(\tau) - \rho^{|\tau|}]^2 d\tau$ , где  $r_n(\tau)$  – нормированная автокорреляционная функция нешумовой помехи  $n(t)$ , действующей в полосе частот  $\Delta F_{\text{п}}$ ,  $\rho^{|\tau|}$  – общий вид нормированной автокорреляционной функции марковского случайного процесса первого порядка. Для рассмотренных условий минимуму величины  $D$  соответствует значение параметра аппроксимации  $\alpha = 1,27\Delta F_{\text{п}}$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕШУМОВЫХ ПОМЕХ

Выражения (4)–(7) позволяют сравнить отношения сигнал/шум  $q_0$  и сигнал/помеха  $q_1$  при оптимальном приеме сигналов в условиях шумовых и нешумовых помех.

На рис. 1 представлены зависимости отношений сигнал/шум  $q_0$  и сигнал/помеха  $q_1$  от коэффициента перекрытия спектров сигнала и помехи  $\lambda = \Delta F_{\text{п}}/\Delta F$ . Кривая 1 соответствует отношению сигнал/шум  $q_0$ , кривая 2 – отношению сигнал/помеха  $q_1$ . Первая из приведенных зависимостей монотонно увеличивается с увеличением  $\lambda$  от 0 до 1. Вторая – монотонно уменьшается с увеличением  $\lambda$  от 0,1 до 1. Увеличение значений  $q_0$  при увеличении  $\lambda$  является следствием уменьшения с увеличением  $\lambda$  энергии помехи со спектральной плотностью мощности вида (7), попадающей в полосу частот сигнала  $\Delta F$  при фиксированной энергии сигнала, которая сосредоточена в полосе частот  $\Delta F$ . Увеличение значений  $q_1$  при уменьшении  $\lambda$  в области значений, близких к 0, является следствием режекции составляющих входного процесса в полосе частот  $\Delta F_{\text{п}} < \Delta F$ . При этом из входного процесса исключается большая часть энергии помехи, а большая часть энергии широкополосного сигнала с энергетическим спектром вида (б), распределенная вне этой полосы частот, сохраняется во входном процессе.

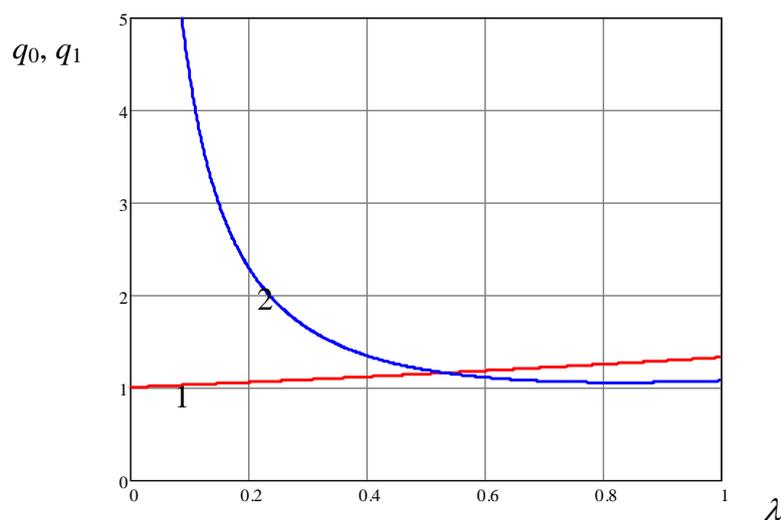


Рис. 1. Зависимости отношений сигнал/шум и сигнал/помеха от коэффициента перекрытия спектров сигнала и помехи

На рис. 2 показана результирующая зависимость отношения  $q_1/q_0$  от коэффициента перекрытия спектров сигнала и помехи  $\lambda = \Delta F_{\text{п}}/\Delta F$ . С увеличением  $\lambda$  действующая в ограниченной полосе частот помеха приближается по своим свойствам к шумовой помехе. При  $\lambda > 0,5$

выполняется  $q_1/q_0 < 1$  и  $q_1 < q_0$ . Это обусловлено неравенством  $\left[ \overline{1/N(f)} \right] \geq \left[ 1/\overline{N(f)} \right]$  для средних значений функций  $1/N(f)$  и  $N(f)$  при отличии спектральной плотности мощности  $N(f)$  от равномерной спектральной плотности мощности белого шума  $N(f) = N_0$  [7]. При этом обеспечивается  $q_1/q_0 > 0,8$ , и оптимальный прием сигнала в условиях нешумовых помех с использованием отбеливающего фильтра обеспечивает отношение сигнал/помеха  $q_1$ , близкое к отношению сигнал/помеха  $q_0$  при оптимальном приеме сигнала в условиях шумовых помех при равенстве энергии шумовой и нешумовой помех, приходящейся на информационный символ. С уменьшением  $\lambda$  действующая в ограниченной полосе частот помеха приближается по своим свойствам к гармонической помехе и отбеливающий фильтр работает в полосе частот  $\Delta F_{\text{п}} < \Delta F$  как режекторный фильтр. При  $\lambda < 0,5$  выполняется  $q_1/q_0 > 1$  и  $q_1 > q_0$ . Вместе с тем отношение  $q_1/q_0$  резко увеличивается с уменьшением  $\lambda$  в области значений  $\lambda < 0,1$ .

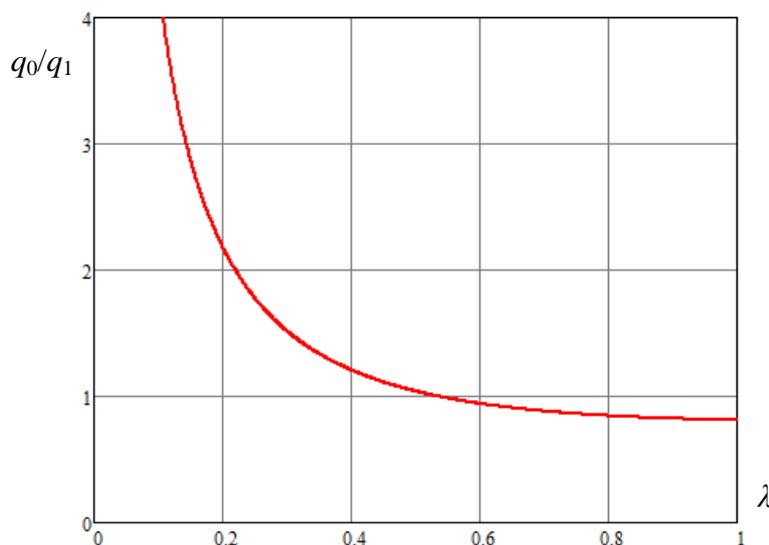


Рис. 2. Зависимость соотношения между отношениями сигнал/шум и сигнал/помеха от коэффициента перекрытия спектров сигнала и помехи

Приведенные результаты расчетов отношения  $q_1/q_0$  характеризуют степень приближения отношения сигнал/помеха  $q_1$  при оптимальном приеме сигналов в условиях нешумовых помех с использованием обеляющего фильтра к отношению сигнал/шум  $q_0$  при оптимальном приеме сигнала в условиях шумовой помехи при таких же энергетических характеристиках сигнала и помехи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования помехоустойчивости РТС передачи информации в условиях нешумовых помех характеризуют возможности повышения достоверности передачи информации при использовании фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП и действии помех в части полосы частот сигнала. При наличии априорной информации о спектральной плотности мощности действующей помехи или ее подходящей аппроксимации и реализации оптимальной обработки принимаемых сигналов с использованием обеляющего фильтра возможно приближение к потенциальной помехоустойчивости, которая обеспечивается при оптимальном приеме сигналов в условиях шумовой помехи при таких же энергиях сигнала и помехи. Полученные результаты ориентированы на использование при

цифровой обработке сигналов в РТС передачи информации с сигналами с расширением спектра, функционирующих в условиях нешумовых помех

### Список используемых источников

1. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г. И. Тузов [и др.]; под ред. Г. И. Тузова. – М. : Радио и связь, 1985. – 264 с.
2. *Ипатов В. П.* Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. – М. : Техносфера, 2007. – 488 с.
3. *Галантерник Ю. М., Гриши А. В., Калинин А. Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М. : МГУЛ, 2003. – 200 с.
4. Современная радиоэлектронная борьба / А. А. Агафонов [и др.]; под ред. В. Г. Радзиевского. – М. : Радиотехника, 2006. – 424 с.
5. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов [и др.]; под ред. В. И. Борисова. – М. : Радиософт, 2008. – 512 с.
6. Радиотехнические системы / Ю. П. Гришин [и др.]; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высш. шк., 1990. – 496 с.
7. Радиосистемы передачи информации / В. А. Васин [и др.]; под ред. И. Б. Федорова и В. В. Калмыкова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 472 с.
8. *Умняшкин С. В.* Основы теории цифровой обработки сигналов. – М. : Техносфера, 2021. – 550 с.

Е. В. Котяшов,  
*доктор технических наук;*  
О. Л. Куваев,  
*кандидат технических наук;*  
А. Н. Наговицына;  
В. А. Чернявский,  
*кандидат технических наук*

## **МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

В статье описан подход к определению рациональной структуры размещения пунктов информации при эксплуатации перспективной многоярусной космической системы, предназначенной для построения высокоточной геоцентрической системы координат и определения высокостепенной (детальной) модели геодезических параметров Земли. Для обоснования структуры размещения пунктов приема информации используется метод решения задачи покрытия области произвольной конфигурации кругами одинакового радиуса. Моделирование показало, что при использовании пяти пунктов приема специальной информации, разнесенных равномерно по долготе, будет обеспечен прием всей накопленной информации, даже при выходе из строя любого пункта.

Ключевые слова: космический аппарат, пункт приема информации, информация.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Задача определения глобальных геодезических параметров, входящих в систему геодезических параметров Земли «Параметры Земли» (система ПЗ-90), решается с помощью космических геодезических систем (КГС) (для РФ – космической системой ГЕОИК). С их помощью получают более 80% всего объема астрономо-геодезических и гравиметрических данных, предназначенных для использования в системах управления; при геодезическом обеспечении навигационных, картографических и других космических систем; создании единой координатной и высотной основы для применения различных видов потребителей.

При обосновании размещения пунктов приема информации в рамках данной статьи рассматривается перспективная космическая система, в состав орбитальной системы которой входят КА с тремя типами бортовой специальной аппаратуры (БСА).

Специфика применения БСА определила орбитальные параметры КА [3–7], входящих в геодезическую космическую систему. К таким КА относятся:

- низкоорбитальный КА, оснащенный гравиградиентометром (НКАГ);
- низкоорбитальный КА, оснащенный аппаратурой прецизионных межспутниковых измерений (НКАМ);
- среднеорбитальный КА (СКА) с радиовысотометром (РВВ).

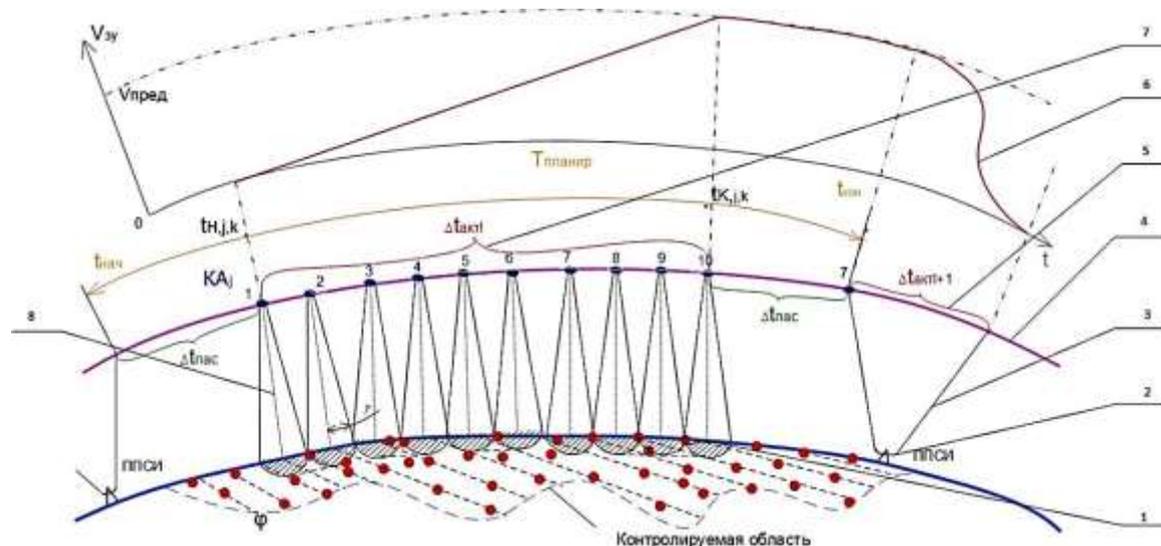
Основные требования к наземным пунктам приема информации (ППСИ) при обосновании их количества и размещения будут следующими [0–2]:

- должны располагаться на территории России;
- должны быть обслуживаемыми;
- должны позволять выполнять прием накопленной информации без потерь.

Качество функционирования космической системы мониторинга геофизической обстановки зависит от своевременной доставки специальной информации без потерь. В этой связи задача определения рациональной структуры размещения ППСИ перспективной космической системы «Геоик-3» представляется актуальной.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В общем случае временной график применения БСА КА космической геодезической системы можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 1.



*Рис. 1. Временной график применения БСА на заданном интервале планирования: 1 – участок просматриваемой земной поверхности; 2 – пункты приема информации; 3 – зоны обзора ППСИ; 4 – участок орбиты  $j$ -го КА; 5 – участки сброса накопленной информации; 6 – график зависимости заполнения объема памяти запоминающего устройства (ПЗУ) КА от времени с ограничениями по конструктивному объему запоминающего устройства (ЗУ) и по объему передаваемой информации на ППСИ на данном витке (интервале планирования); 7 – участки накопления информации КА; 8 – сеансы работы БСА*

Интервал планирования для условий применения БСА можно определить от момента окончания связи с ППСИ до начала следующего сеанса [3]. Порядок взаимодействия КА и ППСИ можно представить следующим образом. В начальный момент времени КА летит в пассивном режиме, ЗУ свободно. Затем КА начинает выполнять измерения с помощью БСА, происходит накопление информации. В этот промежуток времени идет заполнение ЗУ КА. В момент времени, когда ЗУ заполнено полностью, КА переходит в пассивный режим, заполнение памяти прекращается. Далее осуществляется пассивный полет КА. С момента времени попадания в сектор обзора ППСИ идет передача накопленной информации на ППСИ. Таким образом, весь интервал планирования разбивается на участки накопления информации и на участки передачи ее на ППСИ.

Постановка задачи может быть изложена в следующем виде.

Допустим, имеется космическая система из  $N_{КА}$  спутников с баллистической структурой  $X$ . Известны координаты подспутниковых точек КА  $(\varphi_{КА}, \lambda_{КА})$  в любой момент времени на заданном интервале, известны параметры наземной и  $\varphi$  бортовой радиоаппаратуры космической системы:

$V_{ПЗУ}$  – объем памяти запоминающего устройства КА;

$V_{КА}$  – объем информации, полученной специальной бортовой аппаратурой КА на заданном интервале времени;

$V_{ППСИ}$  – объем информации, переданной с КА на ППСИ на заданном интервале времени;

$C_{КА}$  – скорость накопления результатов измерений (БСА производит измерения непрерывно);

$C_{ППСИ}$  – скорость передачи информации на ППСИ.

Пусть  $M = \{\varphi_{ППСИj}, \lambda_{ППСИj}\}$  – множество мест возможного размещения ППСИ ( $j=1..m$ );

$M_0 = \{\varphi_{ППСИk}, \lambda_{ППСИk}\}$  – множество мест расположения существующих (штатных) ППСИ ( $k=1..m_0$ ),  $M_0 \in M$ .

Необходимо определить количество ППСИ  $m^*$  и координаты их расположения, т. е. подмножество  $M^* \subseteq M$  такое, чтобы обеспечивался сброс всей накопленной геофизической информации со всех КА КГС, при допущении, что потери сигнала вследствие особенностей функционирования бортовой и наземной аппаратуры передачи данных, а также вследствие природных явлений отсутствуют.

Размеры района применения ППСИ зависят от параметров орбит КА, характеристик бортовой аппаратуры КА и наземной аппаратуры ППСИ. Для обеспечения гарантированной передачи накапливаемой информации необходимо применение нескольких ППСИ.

Зона радиовидимости бортовой специальной информации на поверхности Земли представляет собой круг, ППСИ считаются однотипными. Тогда задача поиска потребного количества ППСИ может быть сведена к модифицированной задаче покрытия области произвольной конфигурации кругами одинакового радиуса (рис. 2).

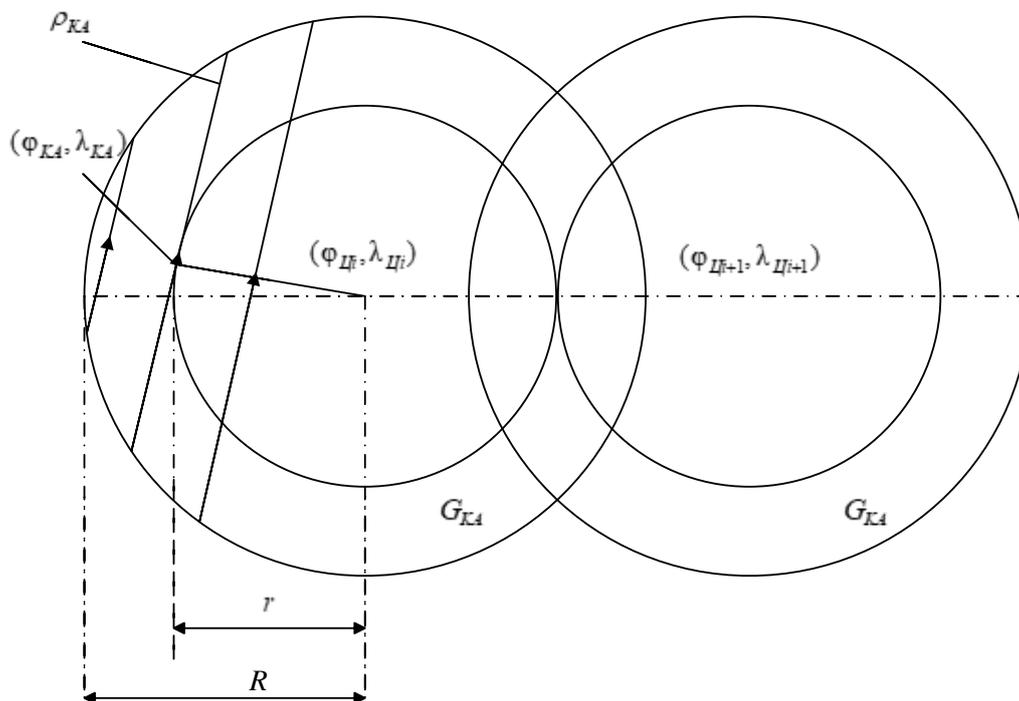


Рис. 2. К задаче покрытия области произвольной конфигурации кругами одинакового радиуса

Исходя из приведенной аналогии, задача поиска мест размещения ППСИ сводится к задаче поиска положения центров кругов в заданной области  $G_{КА}$ , обеспечивающей покрытие области  $G_{КА}$  кругами одинакового радиуса при максимально возможном значении радиуса:

$$\{(\varphi_{Ц_i}^*, \lambda_{Ц_i}^*)\} = \arg \min_{(\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i})} \rho(\{(\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i})\}; G_{КА}), i = 1, \dots, K_{\text{КРУГОВ}}, \quad (1)$$

где

$$\rho(\{(\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i})\}; G_{КА}) = \max_{(\varphi_{КА}, \lambda_{КА}) \in G_{КА}} \min_{i = 1, \dots, K_{\text{КРУГОВ}}} r((\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i}); (\varphi_{КА}, \lambda_{КА})).$$

На рис. 2 используются следующие обозначения:

$\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i}$  – координаты центра круга  $(\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i}) \in G_{КА}$ ;

$G_{КА}$  – область Земли, на которой возможно разместить ППСИ;

$\varphi_{КА_j}, \lambda_{КА_j}$  – координаты  $j$ -й подспутниковой точки КА;

$\rho_{КА}$  – подспутниковое расстояние, соответствующее длине трассы КА в зоне радиовидимости ППСИ, где будет принята вся информация с борта КА  $\rho_{КА} = f(V_{КА})$ ;

$r$  – радиус круга зоны радиовидимости при полном сбросе информации.

Угловое расстояние  $r((\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i}); (\varphi_{КА}, \lambda_{КА}))$  от центра  $i$ -го круга до одной из точек множества  $G_{КА}$  по теореме косинусов для сферических треугольников определяется соотношением

$$r((\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i}); (\varphi_{КА}, \lambda_{КА})) = \arccos(\sin(\varphi_{Ц_i}) \cdot \sin(\varphi_{КА}) + \cos(\varphi_{Ц_i}) \cdot \cos(\varphi_{КА}) \cdot \cos(\lambda_{Ц_i} - \lambda_{КА})). \quad (2)$$

В нашей постановке задачи структура ППСИ должна быть выбрана таким образом, чтобы информация принималась без потерь вследствие ее устаревания и переполнения объема ЗУ КА. Исходя из этого, последовательность поиска рациональной структуры размещения ППСИ будет состоять из следующих этапов.

1. Задается положение первого (начального) ППСИ  $\{(\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i})^*\}$ ,  $m^* = 1$ .

2. Определяется зона радиовидимости КА  $R$  и подспутниковое расстояние  $\rho_{КА}$ , соответствующее длине трассы КА в зоне радиовидимости ППСИ, где будет принята вся информация с борта КА за виток, т. е.  $V_{\text{ППСИ}} \geq V_{КА}$ , где

$$\begin{aligned} V_{\text{ППСИ}} &= C_{\text{ППСИ}} T_{\rho_{КА}}, \\ V_{КА} &= C_{КА} T_{КА}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $T_{\rho_{КА}}$  – интервал времени полета КА над зоной радиовидимости ППСИ, где гарантированно будет принята вся специальная информация с борта КА;

$T_{КА}$  – период обращения КА.

3. Вычисляется  $\rho_{КА}^*$  – среднее значение подспутникового расстояния для каждого ППСИ:

$$\rho_{КА}^* = \rho_{КА} / m^*. \quad (4)$$

4. Если  $\rho_{КА}^* \geq R$ , то осуществляется переход к п. 6.

5. Определяется радиус окружности  $r$ , соответствующий  $\rho_{КА}^*$ :

$$r((\varphi_{Ц_i}, \lambda_{Ц_i}); (\varphi_{КА}, \lambda_{КА})) = \arccos(\sin(\varphi_{Ц_i}) \cdot \sin(\varphi_{КА}) + \cos(\varphi_{Ц_i}) \cdot \cos(\varphi_{КА}) \cdot \cos(\lambda_{Ц_i} - \lambda_{КА})). \quad (5)$$

Осуществляется переход к п. 6.

6. Добавляется ППСИ:  $m^* = m^* + 1$ . Переход к п. 3.

7. Определяются координаты всех ППСИ на расстоянии не менее  $2r$  друг от друга, исходя из возможностей их размещения.

8. Определена рациональная структура ППСИ.

Структурная схема последовательности поиска этапов представлена на рис. 3.

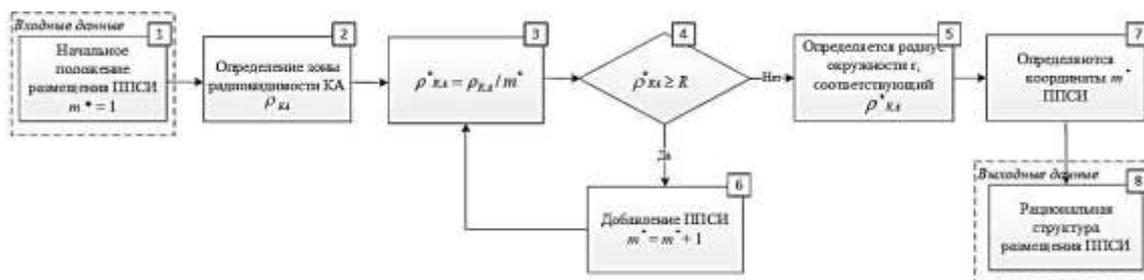


Рис. 3. Схема поиска рациональной структуры размещения ППСИ

## ПОИСК РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Задача определения рациональной структуры размещения ППСИ решалась для следующих исходных данных:

- а) в настоящее время в космическом комплексе «Геоик» штатный ППСИ располагается в г. Сарепуле. Предполагается, что сеть ППСИ будет развернута с учетом имеющегося задела;
- б) орбитальный сегмент КГС состоит из следующих космических аппаратов [6]:
  - 1 СКА, параметры орбиты представлены в табл. 1;
  - 2 НКАМ, параметры орбиты представлены в табл. 2;
  - 1 НКАГ, параметры орбиты представлены в табл. 3.

Таблица 1

### Параметры орбиты СКА

Параметр	Значение
Тип орбиты	Полярная круговая
Большая полуось, км	7927
Эксцентриситет	0,001
Наклонение, град	99,1
Средняя высота, км	925
Аргумент широты перигея, град	0

Таблица 2

### Параметры орбиты НКАМ

Параметр	Значение
Тип орбиты	Полярная круговая
Большая полуось, км	6831
Эксцентриситет	0
Наклонение, град	89
Средняя высота, км	460
Аргумент широты перигея, град	0
Расстояние между КА, км	170–270

Таблица 3

### Параметры орбиты НКАГ

Параметр	Значение
Тип орбиты	ССО
Большая полуось, км	6628
Эксцентриситет	0
Наклонение, град	96,5
Средняя высота, км	250
Аргумент широты перигея, град	0
Драконический период, сек	5370

в) объем бортового ЗУ. Для всех КА рассматривались следующие варианты:

– 512 МБ;

– 1024 МБ;

г) скорость накопления результатов измерений:

– НКАГ – 21,4 кбит/с;

– НКМ – 90 кбит/с;

– СКА – 102 кбит/с;

д) скорость сброса специальной информации на ППСИ. Для всех КА рассмотрены два варианта:

– 1 Мбит/с;

– 10 Мбит/с;

е) геометрические характеристики зоны радиовидимости, Для всех КА и ППСИ приняты следующие значения:

– угол полураствора БСА – 0,001 град.;

– предельный угол высоты над местным горизонтом – 3 град.

Применяя вышеизложенный подход к решению задачи, было определено минимальное количество ППСИ для КА с различным типом БСА:

НКАГ – 4 ППСИ;

НКМ – 3 ППСИ;

СКА – 2 ППСИ.

На основе полученных результатов были сформированы следующие предложения по расположению ППСИ (табл. 4). Выбор был обоснован готовностью инфраструктуры для размещения ППСИ, имеющимся заделом и возможным максимальным разнесением пунктов по широтному поясу территории России.

Таблица 4

#### Варианты размещения ППСИ на территории России

№ п/п	Наименование населенного пункта	Географические координаты	Примечание
1	г. Калининград	54 <sup>0</sup> 43' с. ш. 20 <sup>0</sup> 30' в. д.	
2	г. Сарапул	56 <sup>0</sup> 28' с. ш. 53 <sup>0</sup> 48' в. д.	На основе существующего
3	г. Енисейск	58 <sup>0</sup> 28' с. ш. 92 <sup>0</sup> 08' в. д.	
4	с. Галенки	44 <sup>0</sup> 02' с. ш. 131 <sup>0</sup> 45' в. д.	
5	г. Анадырь	64 <sup>0</sup> 44' с. ш. 177 <sup>0</sup> 31' в. д.	
6	г. Краснознаменск	55 <sup>0</sup> 36' с. ш. 37 <sup>0</sup> 02' в. д.	Используется как резервный при однопунктной схеме

Исходя из вариантов размещения ППСИ, были сформированы варианты построения сети ППСИ, включающие различные сочетания предложенных населенных пунктов (табл. 5).

Таблица 5

#### Варианты состава ППСИ

№ п/п	Рассматриваемое количество ППСИ	Состав
1	1	г. Сарапул (г. Краснознаменск)
2	2	г. Сарапул – с. Галенки
3	3	г. Сарапул – г. Енисейск – с. Галенки
4	4	г. Калининград – г. Сарапул – г. Енисейск – с. Галенки
5	5	г. Калининград – г. Сарапул – г. Енисейск – с. Галенки – г. Анадырь

С помощью разработанного программно-моделирующего комплекса [7] было проведено имитационное моделирование функционирования КГС со следующими параметрами:

интервал моделирования – 3 месяца;

шаг интегрирования – 1 с;

количество учитываемых гармоник ГПЗ – 8;

при моделировании орбитального движения КА учитывалось влияние сил притяжения Солнца и Луны.

На рис. 4–6 представлены зоны обзора ППСИ и траектории полета КА с различными типами БСА.

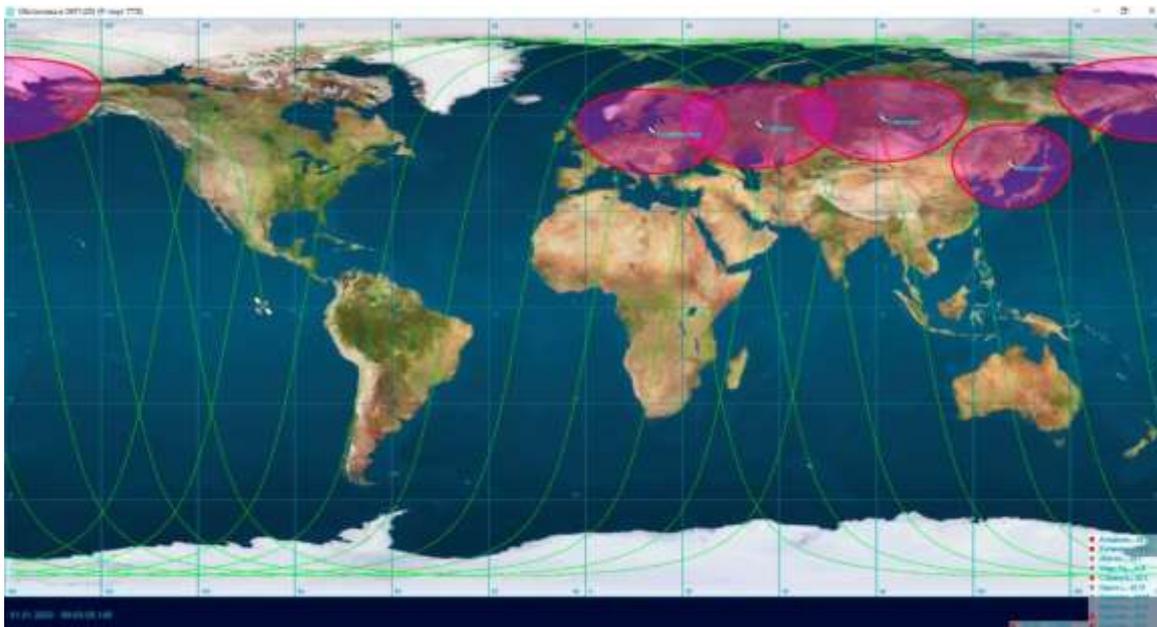


Рис. 4. Трасса полета НКАГ

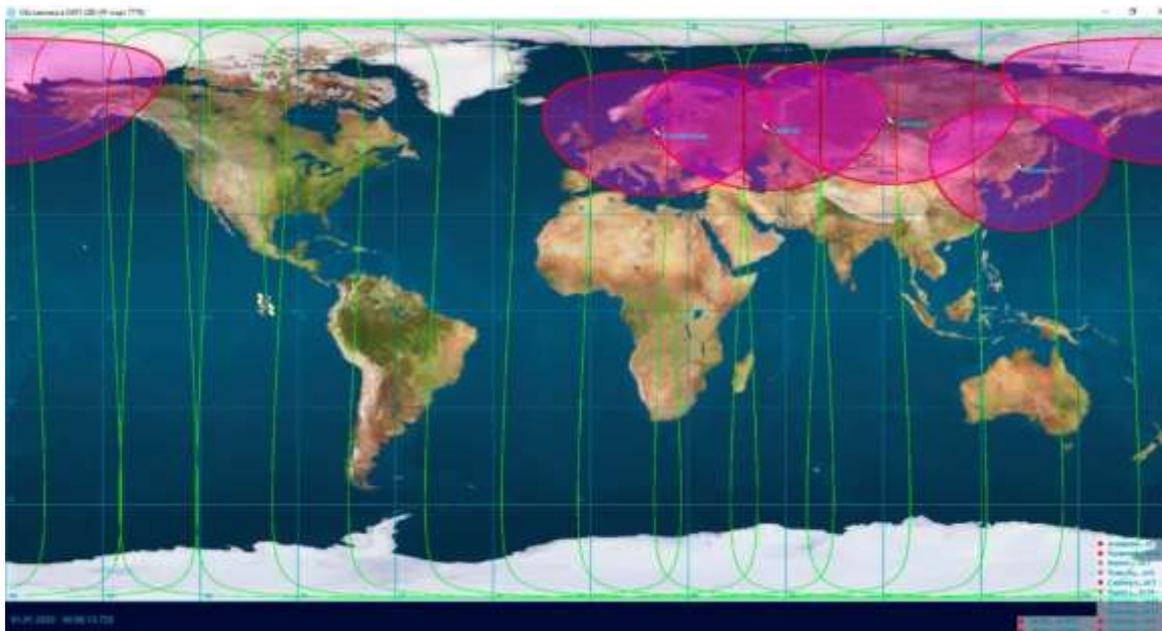


Рис. 5. Трасса полета НКАМ

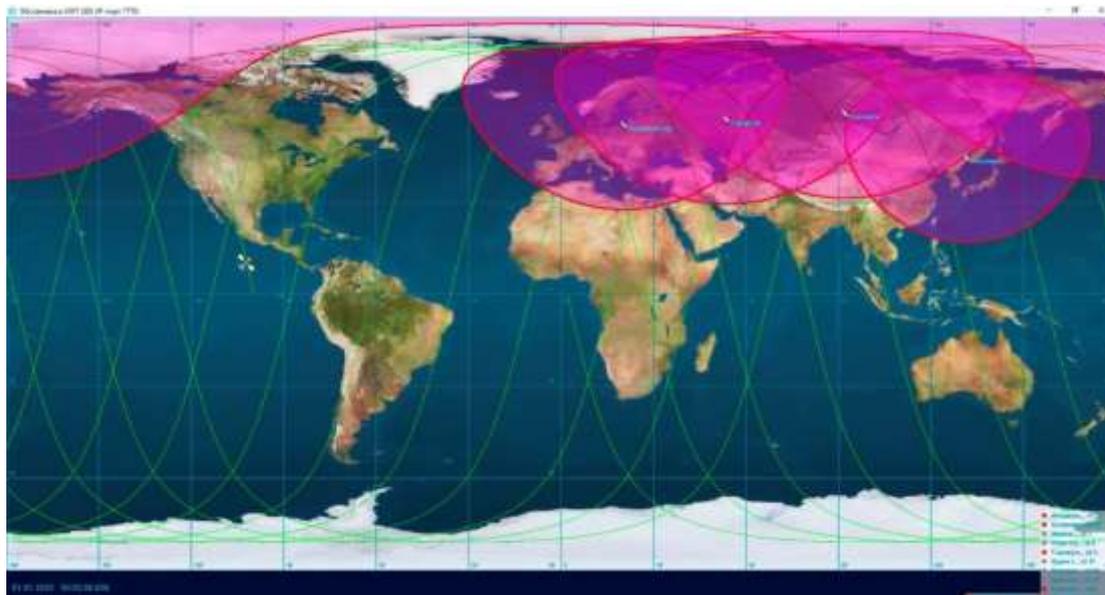


Рис. 6. Трасса полета СКА

Результаты моделирования функционирования КА с различной БСА при накоплении и передаче целевой информации представлены в табл. 6–8.

Таблица 6

**Результаты моделирования функционирования НКАГ**

Количество ППСИ	Скорость передачи информации, Мбит/с	Количество выполненных измерений, шт.	Количество переданных измерений, шт.	Количество измерений, потерянных из-за переполнения памяти, шт.	Доля потерянных измерений, %	Максимальная длительность накопления информации без передачи на ППСИ, мин	Заполненность ПЗУ КА (макс.), %
1	1	11750162	11360274	3972331	25.26528	726.66720	100.0
	10	15518182	15442242	0	0.0		22.36595
2	1	15629110	15553170	0	0,0	328.3248	19.47742
4	1	15111414	15079974	0	0.0	265.83408	8.18236
5	1	14881232	14861272	0	0	169.16688	5.20715

Таблица 7

**Результаты моделирования функционирования НКМ**

Количество ППСИ	Скорость передачи информации, Мбит/с	Количество выполненных измерений, шт.	Количество переданных измерений, шт.	Количество измерений, потерянных из-за переполнения памяти, шт.	Доля потерянных измерений, %	Максимальная длительность накопления информации без передачи на ППСИ, мин	Заполненность ПЗУ КА (макс.), %
1	1	5529200	5436402	10169215	64.77861	629.50032	100.0
	10	15380190	15347308	0	0		100.0
2	1	9581188	9488390	6098203	38.89311	345.00096	100.0
3	1	12625364	12532566	3034408	19.37709	199.16640	100.0
4	1	15263224	15252844	0	0.0	183.83328	32.1302
5	1	14947650	14937270	0	0	90.33408	20.49197

Таблица 8

**Результаты моделирования функционирования СКА**

Количество ППСИ	Скорость передачи информации, Мбит/с	Количество выполненных измерений, шт.	Количество переданных измерений, шт.	Количество измерений, потерянных из-за переполнения памяти, шт.	Доля потерянных измерений, %	Максимальная длительность накопления информации без передачи на ППСИ, мин	Заполненность ПЗУ КА (макс.), %
1	1	7609978	7535020	3293861	30.2082	52.66656	100.0
	10	10322954	10322954	0	0.0		63.09062
2	1	10225236	10206730	0	0	52.66656	100.0
3	1	10225236	10213824	0	0	52.66656	34.92552
4	1	10225236	10225236	0	0	52.66656	17.76072
5	1	10225236	10225236	0	0	52.66656	16.92056

Общая информация по результатам моделирования применения КА с различной бортовой специальной аппаратурой приведена в табл. 9.

Таблица 9

**Информация по результатам моделирования применения КА с различной бортовой специальной аппаратурой**

№ п/п	Параметры	НКАГ	НКАМ	СКА
1	Межвитковое расстояние, град	0.06124	0.00889	0.07061
2	Период обращения, сек	5364	5621	6205
3	Минимальное угловое расстояние между просмотренными точками на экваторе, град	0.03062	0.00444	0.03531
4	Минимальное расстояние между просмотренными точками на экваторе, км	3.40459480	0.49419464	3.925
5	Максимальная длительность интервала передачи данных для одного ППСИ за виток, мин	6.50016	9.66672	15.00048
6	Объем информации, накапливаемый в ПЗУ КА за виток, Мбит	14.09	61.96	45

По результатам проведенного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. При обеспечении скорости передачи информации с КА на ППСИ 10 Мбит/с в системе ГКС возможно использование одного наземного пункта (при необходимости можно предусмотреть один резервный).

2. При обеспечении скорости передачи информации 1 Мбит/с прием всей накопленной специальной информации будет обеспечиваться при варианте, включающем четыре ППСИ, разнесенных по долготе. Для СКА и НКАГ достаточно двух пунктов, причем результаты моделирования показали, что наиболее предпочтительным, с точки зрения минимизации времени устаревания информации, является их размещение в г. Сарапул и г. Анадьрь. Для НКАМ прием всей накопленной ими специальной информации будет обеспечиваться только при размещении четырех пунктов, максимально разнесенных по долготе.

3. При размещении ППСИ в пяти пунктах будет обеспечен прием всей накопленной специальной информации, даже при выходе из строя любого ППСИ.

4. Объем ПЗУ 512 МБ позволяет КА накапливать информацию без ее потери, даже при отсутствии связи с ППСИ в течение нескольких витков.

5. Для получения специальной информации ППСИ должны позволять проведение сеансов связи одновременно со всеми КА, входящими в ГКС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные с использованием имитационного моделирования, свидетельствуют о том, что расширение областей поиска оптимальных решений позволит синтезировать структуру размещения ППСИ на всем множестве допустимых альтернатив.

При определении количества пунктов приема информации необходимо учитывать возможности аппаратуры ППСИ по обеспечению скорости передачи информации. При обеспечении скорости передачи информации 1 Мбит/с прием всей накопленной информации будет обеспечиваться при использовании пяти пунктов. Для эксплуатации КА РВВ и КА ГГ достаточно двух пунктов, причем результаты моделирования показали, что наиболее предпочтительным, с точки зрения минимизации времени устаревания информации, является их размещение в г. Сарапул и г. Анадырь. Для КА МСИ прием всей накопленной ими информации будет обеспечиваться только при использовании пяти пунктов. При обеспечении скорости передачи информации с КА всех типов на ППСИ 10 Мбит/с в КГС возможно использование одного наземного пункта (при необходимости можно предусмотреть один резервный).

## Список используемых источников

1. *Тестоедов Н. А., Карутин С. Н.* Космическая геодезия, связь и навигация: история развития, состояние и перспективы // Вестник РАН. – 2021. – Т. 91, № 11. – С. 1074–1082.

2. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга / В. Е. Косенко [и др.] // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2013. – № 27. – С. 14–25.

3. Методика оптимального планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в обзорном режиме / А. М. Березняков [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета – 2013. – № 1 (39). – С. 39–45.

4. Оценка задач и возможностей космической геодезической системы нового поколения ГЕОИК-3. Проблемы и перспективы развития методов и средств выполнения топографо-геодезических и картографических работ / В. Ф. Алексеев [и др.] // Пути совершенствования подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения войск : тр. III межвузов. научно-практ. конф., Санкт-Петербург, 25–26 апреля 2013 г. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – С. 197–201.

5. Методика развертывания и поддержания орбитальных группировок космических систем информационного обеспечения / В. Е. Чеботарев [и др.] // Вестник Сибирского аэрокосмического университета имени М. Ф. Решетнева : сб. ст. / под ред. проф. Г. П. Белякова. – Красноярск : СибГАУ. 2007. – Вып. 10. – С. 45–49.

6. *Котяшов Е. В., Чернявский В. А., Хлебников С. Г.* Методика обоснования баллистического построения орбитальной системы космических аппаратов мониторинга гравитационного поля Земли // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму. – 2022. – № 1-2(163-164). – С. 1–11.

7. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662709 Российская Федерация. Программный комплекс оценивания эффективности применения космических комплексов / Е. В. Котяшов, В. И. Горбулин, А. А. Авксентьев [и др.]. – № 2017619515: заявл. 22.09.2017; опубл. 15.11.2017.

А. Н. Миргородский,

*кандидат технических наук;*

Р. А. Мосягин,

*кандидат политических наук;*

В. М. Моторин,

*кандидат технических наук, доцент;*

В. М. Сальников,

*кандидат технических наук, снс*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСТЫВАНИЯ ЖИДКОСТИ В ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЯХ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Одной из важнейших проблем обеспечения эффективного функционирования защищенных пунктов является отвод теплоты от подземных защищенных пунктов управления, особенно в период их автономной работы.

В статье получено приближенное решение задачи об остывании жидкости, движущейся в канале, на основе совместного применения интегрального преобразования Лапласа и вариационного метода.

Ключевые слова: теория теплопроводности, интегральное преобразование Лапласа, вариационный метод, самосопряженное дифференциальное уравнение Эйлера – Лагранжа второго порядка для функционала, теореме о вычетах.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Аналитическая теория теплопроводности находит самое широкое применение в решении различных технических задач.

Особое значение приобретает проблема отвода теплоты от подземных защищенных пунктов управления, особенно в период их автономной работы. Источником тепловыделений в подземных защищенных пунктах управления являются люди, освещение, технические системы и технологическое оборудование, работающее в основном в переменном режиме. Наиболее целесообразно охлаждать подобные объекты за счет передачи выделяемой теплоты в грунт через так называемые грунтовые теплообменники, представляющие собой замкнутую сеть подземных каналов и скважин.

Особое значение приобретают вопросы нестационарного теплообмена на объектах наземной космической инфраструктуры, где тепловая аппаратура работает в условиях нестационарного режима.

Объекты наземной космической инфраструктуры являются одними из основных элементов космодромов, которые необходимо обеспечивать энергоресурсами. Инженерные сети, такие как водоснабжение, водоотведение, теплоснабжение, потерны эвакуационные и иные коммуникаций, в основном расположены под землей. В составе объектов имеются защищенные командные пункты и убежища для личного состава. Последние имеют энергоисточники, работающие в автономном режиме, которые необходимо охлаждать. Наиболее целесообразно охлаждать подобные объекты за счет передачи тепла в грунт через так называемые грунтовые теплообменники, представляющие собой замкнутую сеть подземных скважин.

Кроме того, в составе стартового комплекса расположен канал для отведения раскаленной струи газов при старте ракеты космического назначения.

Вышеизложенное определяет тепловое взаимодействие сетей, потерн и каналов с грунтовым массивом.

Наиболее подробные решения задач нестационарной теплопроводности для основных геометрических тел (шар, полый цилиндр и многие другие) представлены в монографиях [1, 7, 8].

Впервые решение задачи остывания жидкости в подземном канале предложено Ван-Хеерденом [2]. При этом в решении использован классический метод – интегральное преобразование Лапласа. Окончательное выражение для определения температуры жидкости в канале представлено сложной зависимостью, включающей функции Бесселя первого и второго рода, практическая реализация которых вызывает определенные трудности.

Следует отметить, что во всех случаях применение интегральных преобразований по времени приводит к решениям в виде бесконечных функциональных рядов или несобственных интегралов. При этом для практических расчетов используется только главная их часть. Таким образом, если найти простой метод непосредственного определения функции, эквивалентной главной части точного решения, то ее в полной мере можно назвать приближенной, пригодной для практического использования. Такой метод, основанный на совместном применении интегрального преобразования Лапласа и вариационного метода, предложен П. В. Цоем [3]. Однако нестационарный процесс остывания жидкости в подземном канале автором не исследовался.

### РЕШЕНИЕ САМОСОПРЯЖЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА ЭЙЛЕРА – ЛАГРАНЖА ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА И ВАРИАЦИОННОГО МЕТОДА

Рассмотрим решение задачи Ван-Хеердена этим приближенным методом и покажем, насколько проще выглядит и доступнее для использования в практических расчетах окончательное выражение для определения температуры движущейся в канале жидкости.

Математическая формулировка задачи в обобщенных переменных имеет вид:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau'} = a \left[ \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \eta}{\partial r} \right]; \quad (1)$$

$$Q \frac{\partial \theta}{\partial x} = \lambda_{гр} \frac{\partial \eta}{\partial r} \Big|_{r=R^{\exists}}. \quad (2)$$

где  $\Theta$  – обобщенный коэффициент изменения температуры воды;  
 $\eta$  – обобщенный коэффициент изменения температуры грунта;  
 $\lambda_{гр}$  – коэффициент теплопроводности грунта;  
 $a$  – коэффициент температуропроводности;  
 $Q$  – удельное количество тепла, переносимое жидкостью через поперечное сечение канала за единицу времени;  
 $r$  – расстояние по радиусу от оси канала.

Граничные условия:

$$\Theta = \eta \text{ при } r = R; \quad (3)$$

$$\eta = 0 \text{ при } r = \infty; \quad (4)$$

$$\Theta = 1 \text{ при } r = 0. \quad (5)$$

Начальные условия:

$$\eta = 0, \Theta = 0 \text{ при } \tau' = 0, \quad (6)$$

$$\Theta = \frac{t_a - t_{огр}}{t_{об} - t_{огр}}; \quad \eta = \frac{t_{гр} - t_{огр}}{t_{об} - t_{огр}}; \quad \tau' = \tau - \frac{x}{V}; \quad Q = 0,5 c_B \rho_B V R,$$

где  $c_e$  – теплоемкость воды;  
 $\rho_v$  – плотность воды;  
 $t_{гр}(r, x, \tau)$  – температура грунта как функция радиального и аксиального положения и времени;  
 $t_v(x, \tau)$  – температура жидкости;  
 $V$  – линейная скорость жидкости;  
 $t_0$  – начальная температура.

Применим к задаче (1)–(6) интегральное преобразование Лапласа в виде изображений [4]:

$$\eta(r, \rho) = \int_0^\infty \eta(r, \tau') \exp(-p\tau') d\tau'.$$

Тогда рассматриваемые выше уравнения переписутся так:

$$\rho \eta = a \left[ \frac{d^2 \eta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\eta}{dr} \right], \quad (1')$$

$$Q \frac{d\theta}{dx} = \lambda_{гр} \frac{d\eta}{dr} \Big|_{r=R}, \quad (2')$$

$$\theta = \eta \text{ при } r = R, \quad (3')$$

$$\bar{\theta} = 0 \text{ при } r = \infty, \quad (4')$$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{p} \text{ при } x = 0. \quad (5')$$

Найдем решение уравнения (1') вариационным методом [4]. Для этого преобразуем его к виду

$$a \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\bar{\eta}}{dr} \right) = r p \bar{\eta}. \quad (7)$$

Из теории вариационного исчисления известно, что уравнение (7), так называемое самосопряженное дифференциальное уравнение второго порядка вида

$$\frac{d}{dx} (p y') - q y - f = 0, \quad (8)$$

является уравнением Эйлера – Лагранжа для функционала

$$J = \int_{x_0}^{x_1} [p(x)y'^2 + q(x)y^2 + 2f(x)y] dx. \quad (9)$$

Определив функцию  $y(x)$ , реализующую минимум функционала (9), найдем решение уравнения (8). Для этого воспользуемся методом Ритца.

Пусть  $y^*(x)$  – точное решение, реализующее минимум интеграла (9), а  $J(y^*) = m$  – значение минимума. Если удастся построить функцию  $\tilde{y}(x)$ , для которой значение интеграла  $J(\tilde{y})$  весьма близко  $m$ , то  $\tilde{y}(x)$  будет приближением к истинному решению. Если же удастся найти последовательность функций  $\tilde{y}_n$ , для которой  $J(\tilde{y}_n) \rightarrow m$ , то эта последовательность сведется к решению функционала.

Для фактического нахождения функции  $\tilde{y}(x)$ , дающей значение интеграла  $J$ , весьма близкое к минимальному, рассмотрим семейство функций, зависящее от нескольких параметров:

$$y = \Phi(x, a_1, a_2, \dots, a_n), \quad (10)$$

такое, что при значениях параметров удовлетворены краевые условия граничной задачи.

Ограничим класс допустимых функций функциями семейства (10) и найдем среди них ту, которая дает интегралу (9) наименьшее значение. Подставив в (9) выражение (10) и выполнив необходимые операции дифференцирования и интегрирования, превратим  $J$  в функцию  $n$  переменных  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ . При получении минимума этого функционала числа  $a_i$  должны удовлетворять системе

$$\frac{\partial J}{\partial a_k} = 0 \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (11)$$

Решив это уравнение, получим определенные значения параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , дающие функции  $J(a_1, a_2, \dots, a_n)$  абсолютный минимум. Выбрав в семействе (10) функцию, отвечающую именно этим значениям параметров, получаем требуемое приближенное решение:

$$\tilde{y}(x) = \Phi(x, \bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n). \quad (12)$$

Функционал, соответствующий уравнению (7), можно записать так:

$$J = \int_R^\infty \left[ r \left( \frac{d\bar{\eta}}{dr} \right)^2 + \frac{1}{a} r p \bar{\eta}^2 \right] dr. \quad (13)$$

Для нахождения функции  $\eta$ , реализующей минимум функционала (13), рассмотрим семейство вида

$$\bar{\eta} = \bar{\theta} \exp\left(1 - \frac{r}{R}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{a}_k(p) \left\{ \exp\left[k\left(1 - \frac{r}{R}\right)\right] \cdot \left[1 - \exp\left[k\left(1 - \frac{r}{R}\right)\right]\right] \right\}, \quad (14)$$

удовлетворяющее граничным условиям решаемой задачи  $\bar{\eta} = \bar{\theta}$  при  $r = R$  и  $\eta = 0$  при  $r = \infty$ , что является необходимым требованием вариационного метода. Функцию распределения безразмерной температуры в первом приближении ищем в следующем виде:

$$\bar{\eta} = \bar{\theta} \exp\left(1 - \frac{r}{R}\right) + \bar{a}_1(p) \exp\left(1 - \frac{r}{R}\right) \left[1 - \exp\left(1 - \frac{r}{R}\right)\right]. \quad (15)$$

Подставляя выражение (15) в функционал (13) и произведя операции дифференцирования и интегрирования с учетом условия  $\frac{dJ}{d\bar{a}_1} = 0$ , получаем выражение для коэффициента

$$\bar{a}_1(p) = - \frac{-20 + 44 \frac{pR^2}{a}}{32 + 25 \frac{pR^2}{a}} \bar{\theta}. \quad (16)$$

Тогда решение в изображениях уравнения (7) в первом приближении имеет вид

$$\bar{\eta} = \bar{\theta} \exp\left(1 - \frac{r}{R}\right) - \frac{-20 + 44 \frac{pR^2}{a}}{32 + 25 \frac{pR^2}{a}} \bar{\theta} \exp\left(1 - \frac{r}{R}\right) \left[1 - \exp\left(1 - \frac{r}{R}\right)\right]. \quad (17)$$

Приближенное решение в изображениях для безразмерной температуры грунта (17) подставляем в уравнение баланса тепла (2') и находим выражение для безразмерной температуры движущейся жидкости

$$\frac{d\bar{\theta}}{dx} + \frac{\lambda_{гр}}{QR} \left( \frac{12 + 69 \frac{pR^2}{a}}{32 + 25 \frac{pR^2}{a}} \right) \bar{\theta} = 0, \quad (18)$$

решением которого с учетом граничного условия (5') будет следующее выражение:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{p} \exp\left(- \frac{\xi}{Bi_Q} \frac{a+bp}{d+ep}\right), \quad (19)$$

где  $Bi_Q = \frac{Q}{\lambda_{гр}}$ ;  $\xi = \frac{x}{R}$ ;  $a = 12$ ;  $b = 69 \frac{R^2}{a}$ ;  $d = 32$ ;  $e = 25 \frac{R^2}{a}$ .

Функция, стоящая в правой части этого выражения, имеет две особенности: простой полюс в точке  $p = -\frac{d}{e}$ . Для нахождения оригинала функции (19) воспользуемся формулой обращения преобразования Лапласа [4] и теоремой о вычетах [1].

Для упрощения дальнейших вычислений сделаем замену переменной с тем, чтобы существенно особая точка переместилась в начало координат комплексной плоскости, для чего обозначим  $q = d + ep$ ;  $p = \frac{q-d}{e}$ ;  $dp = \frac{1}{e} dq$  и преобразуем выражение (19) к виду

$$\bar{\theta} = - \frac{1}{p} \exp\left(- \frac{\xi}{Bi_Q} \frac{a+bp}{d+ep}\right) = \frac{F}{q-d} \exp\left(\frac{A}{q}\right). \quad (20)$$

Оригинал решения будем искать по формуле

$$f(\tau') = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} \left[ \frac{F}{q-d} \exp\left(\frac{A}{q}\right) \exp\left(\frac{q-d}{e} \tau'\right) \frac{1}{e} \right] dq. \quad (21)$$

По теореме о вычетах [6]

$$f(\tau') = \text{Res}_{q=d} \left[ F(q) \exp\left(\frac{q-d}{e} \tau'\right) \frac{1}{e} \right] + \text{Res}_{q=0} \left[ F(q) \exp\left(\frac{q-d}{e} \tau'\right) \frac{1}{e} \right].$$

Первый вычет в точке  $q = d$  найдем по выражению для вычета в случае простого полюса:

$$\text{Res}_{z=z_0} f(z) = \lim_{z \rightarrow z_0} [f(z)(z - z_0)] = \frac{F}{e} \exp\left(\frac{A}{d}\right). \quad (22)$$

Второй вычет в точке  $q = 0$ , существенно особой точке, найдем по определению вычета. Для этого подынтегральную функцию преобразуем в (21):

$$F(q) = \frac{F'}{q-d} \exp\left(\frac{A}{q}\right) \exp(q\sigma), \quad (23)$$

где  $\sigma = \frac{\tau'}{e}$ ;  $F' = F \frac{1}{e} \exp\left(-\frac{d}{e} \tau'\right)$ .

После разложения функции в ряд Лорана выделяем члены, содержащие  $(q^{-1})$ . Тогда коэффициент при  $(q^{-1})$  будет вычетом функции  $F(q)$  в точке  $q = 0$ . Записывая функции, составляющие  $F(q)$ , в виде рядов и перемножая их по правилу Коши, после ряда математических преобразований получаем коэффициент при  $(q^{-1})$  в лорановском разложении подынтегральной функции (23) в точке  $q = 0$ , который и является вычетом функции в этой точке:

$$a_{-1} = -F' \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{A}{d}\right)^{n+1} \frac{e_n(\sigma d)}{(n+1)!}, \quad (24)$$

Тогда окончательное решение для температуры жидкости, движущейся в подземном канале, запишется в виде

$$\Theta = \exp\left(-2,76 \frac{\xi}{Bi_Q}\right) \left[ \exp\left(2,385 \frac{\xi}{Bi_Q}\right) - \exp(-1,28Fo') * \frac{e_n(1,28Fo')}{(n+1)!} \right], \quad (25)$$

где  $Fo' = \frac{\alpha \tau'}{R^2}$ .

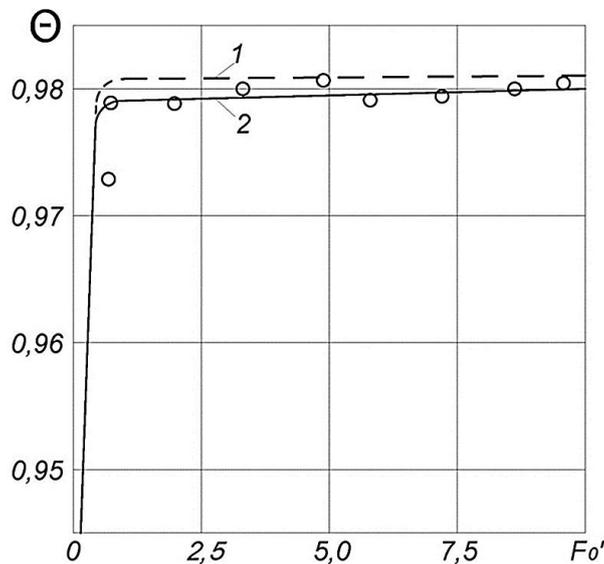


Рис. 1. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных, характеризующих расчет остывания воды, движущейся по подземному каналу:

1 – расчет по Ван-Хеердену; 2 – по формуле авторов; точки – эксперимент, где  $e_n(\sigma d)$  – усеченный показательный ряд,

$$e_n(\sigma d) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\sigma d)^k}{k!}$$

Выражение (25) – это приближенное решение рассматриваемой задачи. Однако оно существенно проще решения, полученного Ван-Хеерденом.

Представленное на рис. 1 графическое сравнение экспериментальных данных и результатов вычислений по формуле (25) и по выражениям Ван-Хеердена [2] показывает их сходимость.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение рассмотренной задачи расчета теплопередачи при остывании жидкости и газов в потерях и подземных каналах значительно легче применять для нестационарных систем.

Результат, полученный при решении задачи, может быть использован не только для расчета теплового взаимодействия грунтовых теплообменников с грунтовым массивом для подземных защищенных пунктов управления, но и для объектов наземной космической инфраструктуры.

Одновременно данное решение будет эффективным для расчета остывания охлаждающих сред в различных массивных теплонапряженных механизмах, например: в дизель-генераторах, турбогенераторах, системах охлаждения газохода стартового комплекса сооружения и другого оборудования значительной тепловой мощности.

## Список используемых источников

1. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
2. *Ван-Хеерден К.* Задача о нестационарном тепловом потоке в связи с воздушным охлаждением угольных копей. – Л., 1959.
3. *Цой П. В.* Методы расчета отдельных задач тепломассопереноса. – М. : Энергия, 1971. – 382 с.
4. *Деч Г.* Руководство к практическому применению преобразования Лапласа Z-преобразования. – М. : Наука, 1971. – 288 с.
5. *Шехтер Р.* Вариационный метод в инженерных расчетах. – М. : Мир, 1971. – 291 с.
6. *Диткин В. Ф., Прудников А. П.* Операционное исчисление. – М. : Высш. шк., 1966. – 400 с.
7. *Дульнев Г. Н.* Теория тепло- и массообмена. – СПб. : НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.
8. *Ткаченко Л. А., Ретина А. В.* Теория теплообмена / под общ. ред. проф. Н. Ф. Кашапова. – Казань : Изд-во Казанского гос. у-та, 2017. – 151 с.

А. И. Петухов;  
А. Э. Султанов,  
кандидат технических наук

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ**

В статье приводится анализ влияния моделей жесткости баков первой ступени ракет-носителей с последовательным соединением ступеней на точность описания частотных характеристик корпуса при продольных колебаниях. Предложен подход, позволяющий сформировать требования по учету особенностей конструкции топливных баков ступени применительно к задаче обеспечения требуемой точности моделирования продольных колебаний в полете.

Ключевые слова: ракета-носитель, продольные колебания, повышение адекватности модели, жесткость топливных баков.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие средств выведения космических аппаратов предполагает планомерное снижение неопределенности возникновения сложных динамических явлений, ограничивающих разработчиков ракет в отношении принятия оптимальных технических решений. Корректный учет ограничений, в том числе связанных с опасными динамическими явлениями, сопровождающими функционирование ракет-носителей (РН) на активном участке траектории, позволяет достичь требуемых показателей конструктивного совершенства. В свою очередь, для отечественных РН актуальность повышения энергетических характеристик в условиях существующих ограничений по районам падений [1], а также по габаритам ракетных блоков [2] представляется в настоящий момент достаточно очевидной.

Сложная взаимосвязь конструктивных особенностей корпуса РН, с одной стороны, и динамических характеристик ракеты космического назначения в целом – с другой, является значительным фактором, сдерживающим повышение характеристик средств выведения. Данный фактор, в том числе, ограничивает использование унифицированных элементов в ракетной технике, что негативно сказывается в отношении стоимости изделий.

Поддержание надежности ракет-носителей при их глубокой модернизации в условиях продольных автоколебаний требует дальнейших исследований в отношении обеспечения необходимого уровня адекватности соответствующих математических моделей. При этом основные проблемные вопросы в части применения современных подходов к моделированию продольных колебаний касаются корректности воспроизведения динамики полостей, заполненных жидким топливом [3].

Расширение номенклатуры использования датчиковой аппаратуры на борту РН позволяет более детально рассмотреть и количественно проанализировать динамические характеристики в условиях полета. Использование телеметрической информации, получаемой по результатам летных испытаний ракет-носителей, в качестве некоторого эталонного портрета дает ценную информацию для поиска путей оптимизации моделей и методов моделирования динамических свойств их составных элементов.

Ценность такой информации, как частоты и формы продольных колебаний корпуса РН заключается в возможности не только оценивать запасы продольной динамической устойчивости, но и прогнозировать по уточненным моделям последствия проводимых доработок в корпусе РН в отношении уровней динамического нагружения. На рис. 1 показана типовая спектрограмма низкочастотной осевой вибрации корпуса РН легкого класса.

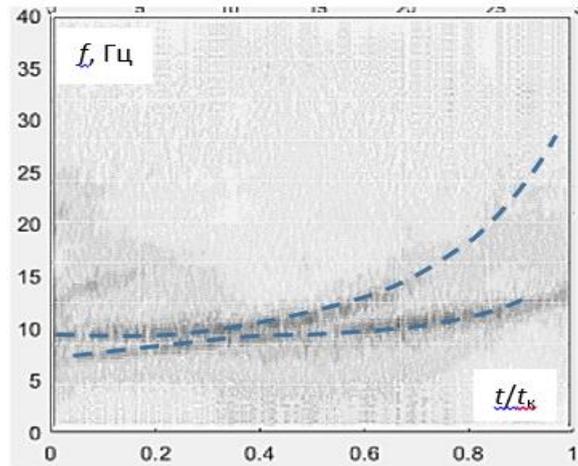


Рис. 1. Спектрограмма низкочастотной осевой вибрации корпуса РН легкого класса

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Ракета-носитель (РН) как колебательная система представляет собой совокупность элементов с постоянной и переменной жесткостью. В процессе функционирования на активном участке траектории при выработке топлива также происходит значительное изменение массы. Эти факторы предопределяют существенную нестационарность ракеты-носителя как колебательной системы.

В качестве объекта исследований рассматривались топливные баки ракет, выполненные по несущей схеме. Специфика силового взаимодействия жидкого топлива и тонкостенных элементов баков отражается в характеристиках жесткости при продольных колебаниях.

Характеристики жесткости рассматривались в классической постановке как функция высоты столба жидкости. Расчетная схема представлена на рис. 2. Для данной схемы характерным является рассмотрение перемещения центра масс жидкости в  $j$ -м баке как отношение нагрузки, создаваемой массой топлива, к перемещениям, связанным с деформацией как обечайки, так и днища.

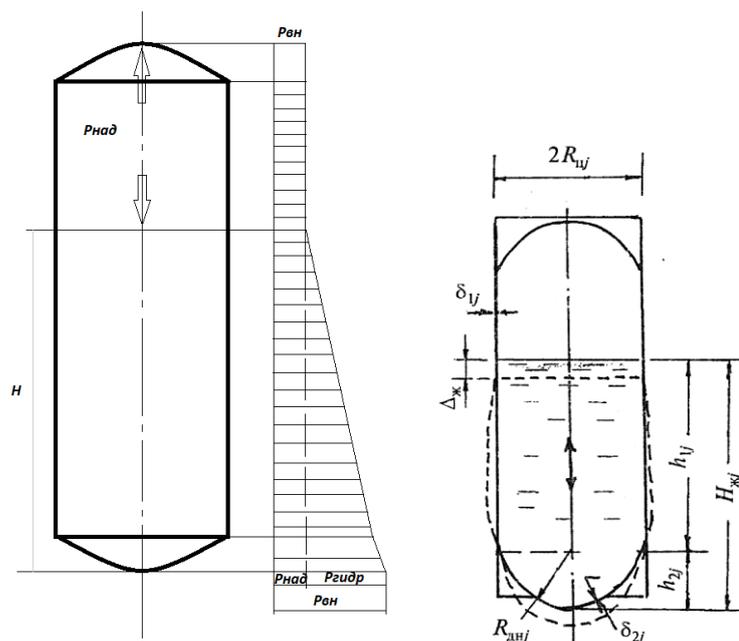


Рис. 2. Схема нагружения топливного бака

Для указанной схемы известно аналитическое решение, описывающее рассматриваемые характеристики следующего вида [12]:

$$k_{жж} = \frac{\pi \left[ R_1^2 h_1 + \frac{1}{6} h_2 (3R_1^2 + h_2^2) \right]^2 E}{\left[ \frac{R_1^3 h_1^3}{3\delta_1} + (1-\mu) \frac{R_2^3 (h_1 + h_2)^2 h_2}{2\delta_2} + \frac{R_1^3 R_2^2 (h_1 + h_2)^2}{4F_{ш}} \left( 1 - \frac{h_2}{R_2} \right)^2 \right]},$$

- где  $R_1$  и  $R_2$  – радиус обечайки и радиус днища;  
 $h_1$  и  $h_2$  – высота столба жидкости до шпангоута и высота жидкости от шпангоута до нижней точки бака;  
 $F_{ш}$  – площадь шпангоута бака;  
 $\delta_1$  и  $\delta_2$  – толщина обечайки и толщина днища;  
 $E$  и  $\mu$  – коэффициент упругости и коэффициент Пуассона для материала бака.

Данное выражение достаточно корректно описывает рассматриваемые характеристики для баков классической формы: цилиндрической обечайки и обечайки со сферическим днищем. При этом для баков более сложной формы, что характерно для многих отечественных ракет-носителей, данное выражение не применимо.

Современные методы оценивания жесткостных свойств через моделирование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов позволяют получить искомые характеристики. Причем в отличие от аналитических выражений такой подход к моделированию частотных характеристик РН сопряжен со значительными затратами ресурсов на подготовку исходных данных. В этой связи в качестве методики исследований выбран сравнительный анализ влияния характеристик жесткости баков по различным моделям на выходные динамические характеристики корпуса в отношении продольных колебаний.

Для моделирования характеристик жесткости топливных баков произвольной осесимметричной формы использовалась геометрическая модель сегмента конструкции с углом относительно оси, равным  $90^\circ$ .

В использованной при исследованиях геометрической модели учитывалась за счет параметризации возможность корректного перестроения при изменении уровня топлива (рис. 3).

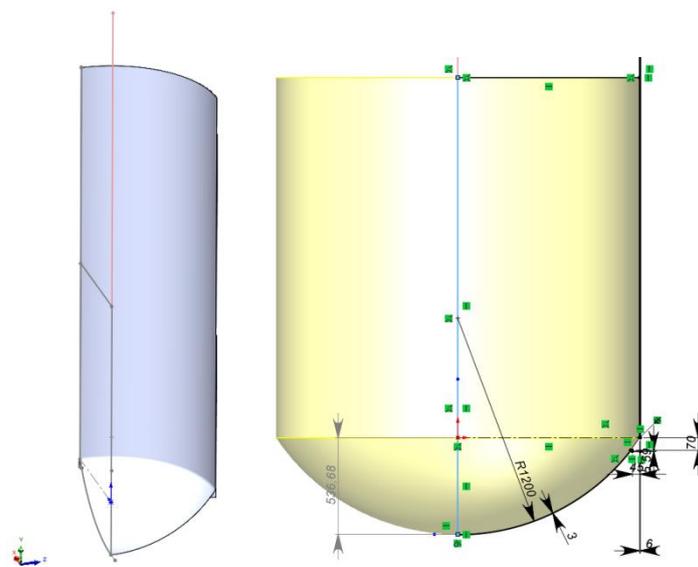


Рис. 3. Геометрическая модель топливного бака РН

Для оптимизации расчетной схемы применены условия циклической симметрии для пересчета данных от сегмента бака. Силовое взаимодействие жидкого компонента топлива и упругих оболочек бака задавалось через распределенное по высоте и периметру давление. Пересчет на жесткость осуществлялся по соответствующим оценкам результирующих сил (рис. 4).

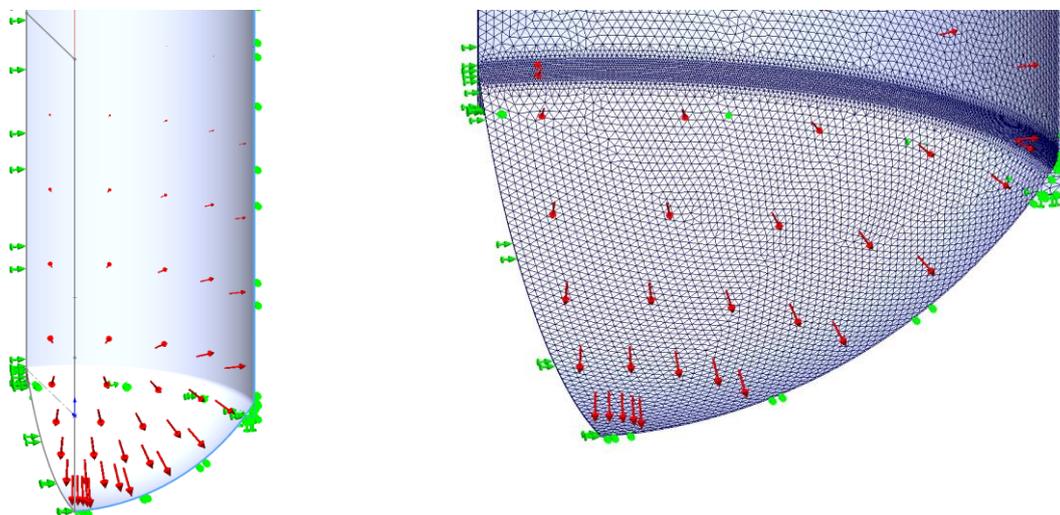


Рис. 4. Расчетная схема для определения жесткостных свойств

Результатом расчетов в САЕ-программе являлись зависимости деформации соответственно обечайки и днища (рис. 5), из которых определялись результирующие перемещения центра масс топлива.

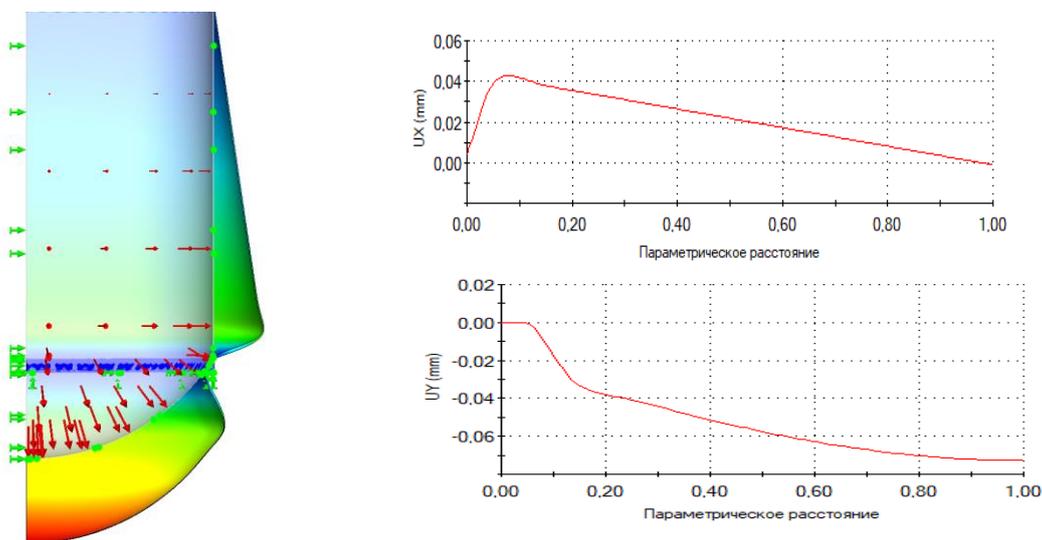


Рис. 5. Результат моделирования НДС бака при продольных колебаниях РН

Жесткость бака рассчитывалась по формуле

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{mg}{\delta} = \frac{\rho V g}{\delta},$$

где  $\delta$  – толщина стенки;

- $P$  – результирующая сила от воздействия топлива;  
 $m$  – масса топлива;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $V$  – объем топлива.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

В результате проведенных численных экспериментов с описанной расчетной схемой в САЕ-программе получены уточненные относительно аналитического выражения (1) зависимости жесткости в баках РН от высоты столба жидкости, что соответствует исходным данным для модели продольных колебаний.

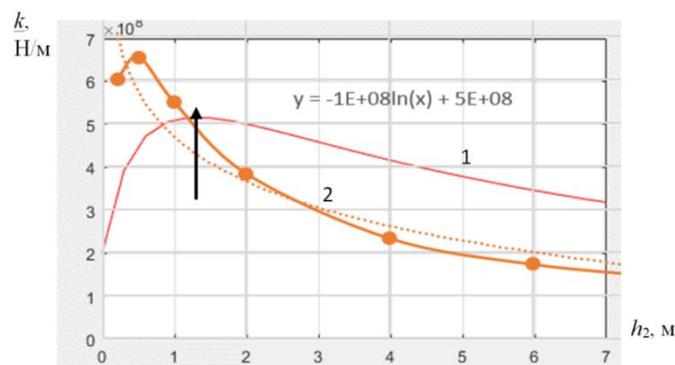


Рис. 6. Характеристики жесткости по моделям: аналитической (1) и конечно-элементной (2)

Сопоставление характеристик жесткости баков, полученных по различным моделям, указывает на сходимость численных значений только при уровне топлива  $h_2$ , равного половине диаметра обечайки (радиусу обечайки бака  $R_2$ ), что показано на рис. 6 стрелкой.

В математической модели продольных колебаний, позволяющей проанализировать влияние жесткостных характеристик баков на частотные характеристики корпуса, первые учитывались в виде функции интерполяции вида

$$k_j(h_2) = A_j + B_j \ln(h_2) + C_j,$$

где  $A_j$ ,  $B_j$ ,  $C_j$  – соответствующие коэффициенты интерполяции.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ВО ВРЕМЯ ПОЛЕТА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ЖЕСТКОСТИ БАКОВ

Для определения степени влияния отдельных отклонений в жесткости корпуса РН на проявление частот собственных колебаний применялся следующий подход. По известной информации о распределении жесткости и массы с использованием метода начальных параметров определялись частоты продольных колебаний для первых трех тонов. Путем синхронного варьирования массами, имитирующими топливо в баках, были получены зако-

ны изменения этих частот с течением безразмерного времени полета  $t / t_k$ . Для этого задействовались комбинированные стержневые модели с сосредоточенными массами.

В проведенном исследовании использовалась динамическая модель двухступенчатой РН легкого класса со стартовой массой 180 т.

Одними из наиболее значимых параметров, характеризующих величину коэффициента усиления амплитуд продольных колебаний корпуса ракеты, можно считать частоту соответствующего тона  $\omega_{kj}$  и коэффициент формы этих колебаний  $U_j$  [7].

Модель продольных колебаний ракеты-носителя с учетом зависимостей жесткости подвеса сосредоточенных масс от топлива описывается системой дифференциальных уравнений вида:

$$\ddot{x}_j + \frac{\delta_k \omega_k}{\pi} \dot{x}_j + \omega_k^2 x + \sum_{n=1}^2 K_{x_j s_n} \ddot{s}_n = \frac{U_j \delta \bar{P}}{M} \delta \bar{p}_k;$$

$$\ddot{s}_n + \frac{\delta_s \omega_s}{\pi} \dot{s}_n + \omega_s^2 s + \sum_{j=1}^m K_{s_n x_j} \ddot{x}_j = 0,$$

где  $x, s$  – обобщенные координаты колебаний корпуса и жидкости (топлива);  
 $U_j$  – формы колебаний ( $j = 1..m$ );  
 $\delta \bar{P}, \delta \bar{p}_k$  – относительные вариации тяги и давления в камере двигателя.

В зависимости от решаемой задачи и потребной детализации рассмотрения колебательной системы для ее исследования применяют модели различной размерности. В рамках рассматриваемого класса задач и интересующего диапазона частот, ограниченного верхними значениями 30–50 Гц, допустимо и оправданно использовать модели малой размерности, удовлетворительно описывающие основные закономерности проявления в полете продольной вибрации корпуса РН в контексте интересующих динамических параметров.

При описании продольной вибрации РН с конструктивно-компоновочной схемой «тандем» в рамках данных исследований использовались преимущественно одномерные трех-массовые комбинированные (осцилляторно-стержневые) модели колебательных систем. Схемы моделей показаны на рис. 7.

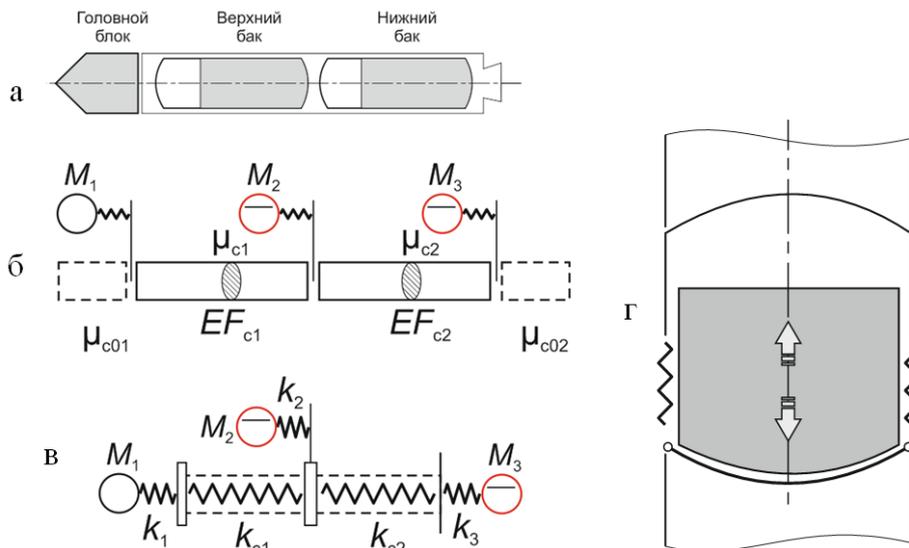


Рис. 7. Схема построения модели продольных колебаний корпуса ракет-носителей:  
 а – компоновочная схема; б – стержневая модель;  
 в – модель с сосредоточенными массами; г – модель колебаний топлива в баке

Сопоставление данных, полученных по различным моделям жесткости баков с анализом спектрограммы вибрации корпуса исследуемой ракеты-носителя, позволяют выявить и оценить отклонения, характеризующие точность моделирования. Так, на рис. 8 представлены зависимости отклонений в частотах продольных колебаний по данным моделей от натурных испытаний РН. Видно, что максимальная сходимость с данными летных испытаний наблюдается для моделей баков, полученных на основе геометрического моделирования с привлечением МКЭ. При этом модель с постоянной жесткостью баков дает существенную погрешность в сторону занижения частоты второго тона колебаний. Модель с переменной жесткостью дает для данного тона отклонение в сторону завышения частоты.

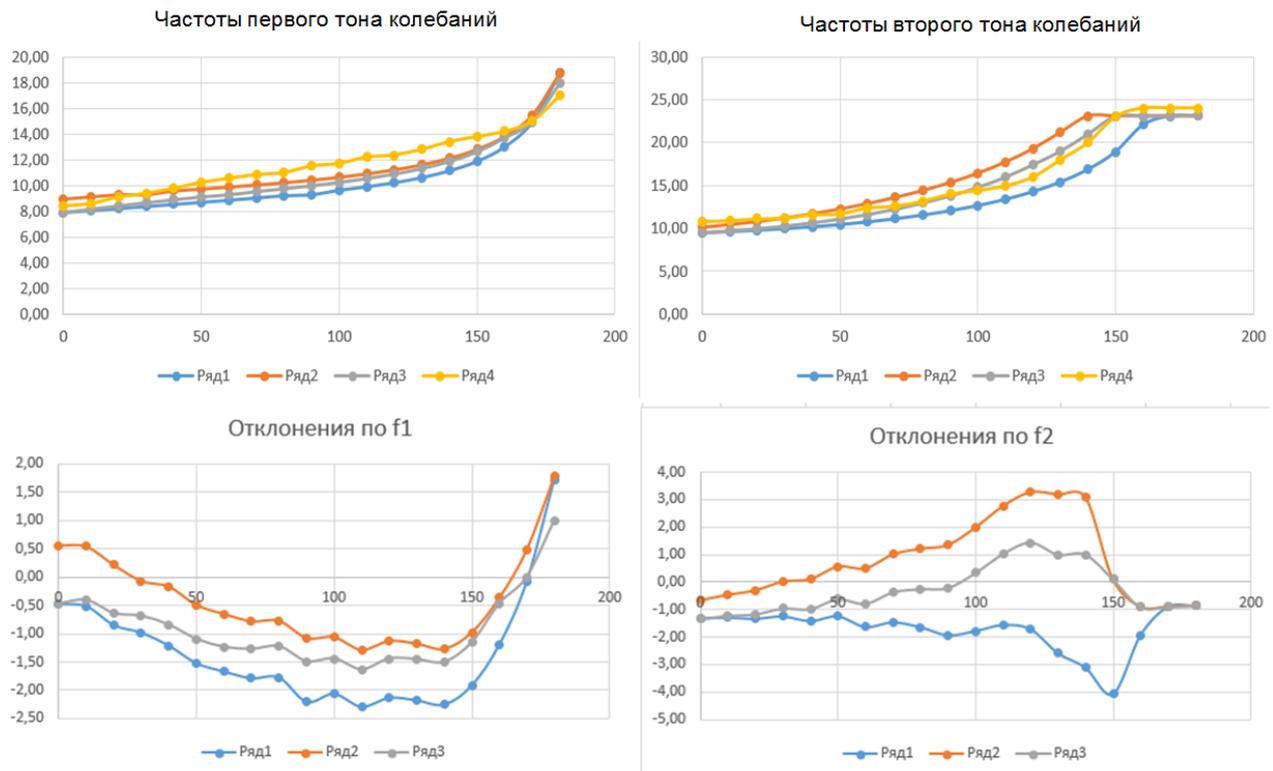


Рис. 8. Результаты сопоставления зависимостей частоты продольных колебаний с данными, полученными по результатам летных испытаний РН

Вместе с тем для данных по частотам первого тона все использованные модели дают сопоставимую погрешность, что можно связать с учетом в рассмотренной модели других значимых факторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ сопоставления данных, полученных на основе обработки ТМИ с борта РН во время ее летных испытаний, с результатами математического моделирования позволяет сформулировать требования к математическим моделям продольных колебаний в соответствии с потребной точностью получаемых оценок.

Важной особенностью спектральной картины осевой вибрации РН в полете является то, что частоты для смежных тонов, как правило, пересекаются. Это проявляется через их сближение. Проведенные исследования показали, что величина максимального сближения оказывается достаточно чувствительным параметром для оценивания жесткости днищ топливных баков. Это, в свою очередь, позволяет формировать новые методы контроля динамических характеристик РН по данным ТМИ, получаемым в процессе летных испытаний. В результате

становится возможным выявление фактов опасного изменения динамики корпуса в отношении возникновения и развития автоколебательных процессов. Предложенный подход позволяет построить систему контроля уровня надежности средств выведения при снижении степени неопределенности в критичных параметрах ракет.

Разработанный подход к контролю параметров жесткости корпуса основывается на результатах математического моделирования и демонстрирует возможность выделения информативных признаков отклонений этих параметров на основе инвариантных соотношений. Соотношение частот в области перехода первого тона колебаний во второй либо второго – в третий, свойственное практически всем ракетам и их функционирующим ступеням, с высокой степенью повторяемости указывает на отклонение жесткости отдельного днища топливного бака.

### Список используемых источников

1. *Костюков В. Н.* Синтез инвариантных диагностических признаков и моделей состояния агрегатов для целей диагностики // Омский научный вестник. – 2000. – Вып. 12. – С. 77–81.
2. *Костюков В. Н.* Синтез спектральной матрицы вибрации машины и ее распознавание для целей диагностики // Омский научный вестник. – 2000. – Вып. 12. – С. 64–71.
3. *Рабинович Б. И.* Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1975. – 416 с.
4. *Натанзон М. С.* Продольные автоколебания жидкостной ракеты. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
5. *Микишев Г. Н., Рабинович Б. И.* Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость. – М. : Машиностроение, 1971. – 559 с.
6. *Петухов А. И., Султанов А. Э.* Использование мультимодельного подхода для моделирования продольных автоколебаний в ракетах-носителях // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 688. – С. 175–183.
7. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617761. Программа расчета частот и форм продольных колебаний ракет-носителей на жидком топливе / А. И. Петухов, А. Э. Султанов. – № 2024613059; опубл. 03.04.2023.
8. *Султанов А. Э., Перфильев А. С., Герасименко С. Ю.* Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты-носителя, снижающие надежность агрегатов двигательных установок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 3. – С. 56–64.
9. Особенности анализа телеметрической информации о перегрузках, получаемой при лётной эксплуатации изделий ракетно-космической техники / А. Ю. Бондаренко [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – № 4(109). – С. 48–53.
10. *Elberg D., Costa W.* Design of Rockets and Launch Vehicles. – М. : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2022. – P. 669–675.
11. *Лебедев Е. Л., Перфильев А. С., Султанов А. Э.* Анализ параметров вибрационного нагружения корпуса ракет-носителей как фактора повышения интенсивности выработки ресурса сварных соединений топливных баков // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 361–167.
12. *Волчков О. Д.* Прочность ракет-носителей. – М. : Изд-во МАИ, 2007. – 780 с.

А. В. Белошицкий<sup>1</sup>,

*доктор педагогических наук, профессор;*

Н. А. Дедик<sup>2</sup>;

Е. И. Мещерякова<sup>3</sup>,

*доктор педагогических наук, профессор*

<sup>1-3</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил

«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж.

## **ПОДГОТОВКА ОФИЦЕРОВ-ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ ВОЕННЫХ ВУЗОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ: ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМАТИКА**

В статье [в контексте развития концепции познавательной мотивации преподавателей военных вузов, изложенной Л. А. Иноземцевой и Н. С. Кужекиным (Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687)] предлагаются направления разрешения проблем, связанных с переподготовкой офицеров для осуществления педагогической деятельности как нового для них вида военно-профессиональной деятельности. Обосновываются необходимость и возможности разработки индивидуальной траектории профессионального развития офицера-преподавателя в образовательной среде военного вуза. Представляются характеристики инновационного метода перехода в зону для ближайшего развития субъектов с использованием индивидуальной траектории профессионального развития офицера-преподавателя в системе традиционных и инновационных методов организации и проведения переподготовки.

Ключевые слова: переподготовка офицеров, педагогическая деятельность, индивидуальная траектория профессионального развития офицера-преподавателя.

Одним из направлений комплектования преподавательских должностей в военных вузах является подготовка к педагогической деятельности офицеров, имеющих опыт службы в войсках, в системе переподготовки и повышения квалификации военных вузов. За сравнительно небольшой период времени переподготовки и повышения квалификации офицерами не только осваиваются предусмотренные учебной программой дисциплины, но и в совместной с профессорско-преподавательским составом деятельности формируются знания, умения, компетенции, а в целом – готовность к осуществлению нового вида военно-профессиональной деятельности в качестве преподавателей. В процессе переподготовки в деятельности обучающихся и профессорско-преподавательского состава возникают разноплановые проблемы, которые отражают существующие противоречия.

В самом общем представлении противоречия, определяющие психолого-педагогические проблемы переподготовки офицеров для осуществления педагогической деятельности в качестве преподавателей военных вузов, можно сформулировать следующим образом: противоречие между потребностью общества в подготовке офицеров-преподавателей как высококвалифицированных специалистов, обладающих сформированными и развитыми личностно-профессиональными качествами, в полной мере обеспечивающими их успешную военно-профессиональную деятельность в военных вузах и недостатками в осуществлении переподготовки вследствие несформированности теоретико-методологического базиса переподготовки офицеров, недостаточной готовности военных вузов к результативной переподготовке офицерских кадров при реализации современного научно обоснованного методического сопровождения процесса переподготовки.

Опираясь на устоявшееся в педагогической науке представление о том, что проблема – это словесное отражение объективно существующих противоречий, сформулируем психолого-педагогическую проблему переподготовки офицеров для осуществления деятельности в качестве преподавателей военных вузов с помощью следующего обобщенного вопроса: как по-

высить эффективность формирования и развития личностно-профессиональных качеств офицеров-преподавателей в процессе их переподготовки в военных вузах? Ответ на этот обобщенный вопрос должен быть дан в двух направлениях:

1) посредством разработки педагогической наукой теоретико-методологической базы переподготовки офицеров, учитывающей самые разные ее особенности, в том числе и связанные с андрагогикой;

2) с помощью создания и организации внедрения в образовательный процесс современного научно обоснованного методического сопровождения процесса переподготовки.

В связи с тем, что оба указанных направления остаются в теории и практике педагогики недостаточно изученными, но при этом важными и во многом определяющими развитие современного военного образования, их можно рассматривать в качестве актуальных, значимых, требующих вдумчивого анализа и разработки исследователями.

Обозначенная психолого-педагогическая проблема, безусловно, является многоаспектной. Целью настоящей статьи становится представление результатов исследования одного из аспектов проблемы, а именно – обоснования возможностей повышения эффективности переподготовки на основе разработки индивидуальной траектории профессионального развития офицера-преподавателя. Грамотно разработанная траектория позволяет не только ускорить процесс становления офицера-практика в качестве преподавателя военного вуза, но и усилить познавательную мотивацию становления в новой профессионально-педагогической деятельности, которую (познавательную мотивацию) Л. А. Иноземцева и Н. С. Кужекин определяют как «сложноорганизованную систему внутренних побуждений, таких как смысло-жизненные ориентиры, личностная потребность быть компетентным и др.» [1]. Безусловно, без такой мотивации разрешение обозначенной проблемы не представляется возможным.

Разрабатывая теоретико-методологическую базу переподготовки с учетом особенностей, определяемых спецификой переподготовки офицеров, накопивших определенный войсковой опыт, для которых педагогическая деятельность становится принципиально новым направлением их военно-профессиональной деятельности, важно понимать, что трудности, которые преодолевают и офицеры, и профессорско-преподавательский состав военных вузов, участвующий в переподготовке, имеют не только педагогический, но и психологический характер. Ведь по справедливому утверждению Н. А. Алексеева, «педагогика как наука существует как психопедагогика и принципиально не может быть иной, ибо методологический фон психологического знания является (пусть даже имплицитно) неотъемлемой частью знания педагогического» [2]. Поэтому обозначенную проблему переподготовки офицеров для осуществления педагогической деятельности важно изучать как психолого-педагогическую, а в исследовании выделенного аспекта обоснования возможностей повышения эффективности переподготовки на основе разработки индивидуальной траектории профессионального развития офицера-преподавателя необходимо опираться не только на педагогические, но и на психологические разработки. Приведенное ранее определение познавательной мотивации офицеров-преподавателей – это определение интегративного психологического личностного образования, сформированность которого на должном уровне, безусловно, способствует успешному становлению офицера-профессионала, преподавателя военного вуза.

Процесс переподготовки офицеров-преподавателей имеет существенные особенности по сравнению с переподготовкой других категорий проходящих переподготовку специалистов, поэтому для исследования обозначенной проблемы следует конкретизировать ключевое для него (исследования) понятие. Под профессиональной переподготовкой офицеров для осуществления педагогической деятельности в военном вузе будем понимать процесс освоения субъектом педагогической деятельности, его становление как преподавателя на основе самосозидания им новых свойств, способностей, возможностей, позитивных изменений в уже имеющихся опыте и знаниях, требующий (процесс) инициирования и реализации его собственной активности, направленной на усвоение актуальных научных педагогических

знаний, формирование профессиональных умений преподавателя военного вуза, освоение норм и правил педагогической этики.

В связи с вышеизложенным нельзя не согласиться с Л. А. Иноземцевой и Н. С. Кужекиным в том, что проходящий переподготовку офицер-преподаватель должен «занимать активную позицию в выявлении мотивов, формулировании целей и задач собственной деятельности». Однако можно и нужно не согласиться с тем, что он (офицер-преподаватель) добивается в этом процессе «удовлетворения наиболее глубоких познавательных потребностей и интересов» [1], потому что познавательные потребности как потребности в овладении новыми знаниями и умениями в осуществлении педагогической деятельности (вероятно, авторы различают в системе таких потребностей глубокие и поверхностные) действительно могут и должны быть удовлетворены в процессе переподготовки. Что же касается познавательных интересов, то они не могут быть удовлетворены, но могут быть реализованы в познавательной деятельности, так как каждый из них отражает особую избирательную направленность субъекта на познание и в своей структуре имеет не только мотивационно-ценностный, но и эмоционально-волевой, и содержательно-процессуальный компоненты.

Мы вводим в научный оборот термин «индивидуальная траектория профессионального развития офицера-преподавателя» с целью конкретизации термина «индивидуальная образовательная траектория». Обоснование проектирования индивидуальной образовательной траектории появилось на рубеже прошлого и наступившего столетия в контексте исследования проблем индивидуализации обучения в работах С. А. Вдовиной, С. В. Воробьевой, Г. А. Климова, Н. А. Лабунской, В. С. Мерлина, И. В. Сутеевой, Ю. Ф. Тимофеевой, А. П. Тряпицыной, А. В. Хуторского и др. К настоящему времени индивидуальная образовательная траектория (ИОТ) характеризуется исследователями как форма организации и осуществления не только учебной, познавательной, но и самостоятельной образовательной деятельности, что особенно важно для исследования применительно к переподготовке офицеров-преподавателей военных вузов.

Анализ работ, в которых содержатся различные подходы к характеристике и варианты определения ИОТ, позволяет следующим образом конкретизировать понятие в контексте проводимого исследования: ИОТ офицеров-преподавателей, проходящих переподготовку для осуществления профессиональной педагогической деятельности в военных вузах, – это персональный путь реализации личностного потенциала субъекта образовательной деятельности, определяемый им совместно с преподавателями и командирами с учетом мотивации, а также накопленного в период службы в войсках опыта, интеллектуальных и иных возможностей офицера-преподавателя, на котором (персональном пути) ему необходимо сформировать компетенции, предусмотренные образовательной программой, а также личностно-профессиональные качества преподавателя военного вуза.

В рассматриваемом конкретизированном определении учитываются тактические задачи, которые офицер-преподаватель должен решить в течение относительно непродолжительного периода переподготовки для осуществления профессиональной педагогической деятельности в военном вузе. Однако важнейшим итогом реализации, спроектированной ИОТ офицера-преподавателя, становится подготовка его к решению стратегической задачи, а именно – к самостоятельному проектированию индивидуальной траектории профессионального развития (ИТПР) офицера-преподавателя, действующего в условиях непрерывного образования.

Продолжением исследования становится определение ИТПР, под которой мы предлагаем понимать персональную стратегию профессионального самосовершенствования офицера-преподавателя, выстроенную в контексте совершенствования его личностных и профессиональных качеств по мере накопления опыта осуществления военно-профессиональной педагогической деятельности, основанную на осознании и субъективации профессиональных целей и ценностей, норм и традиций, а также максимально полной реализации духовно-нравственного потенциала межсубъектного взаимодействия в воинском коллективе военного вуза. В основу этого определения, которое становится ключевым, то есть наиболее важным

для проводимого исследования, положены идеи педагогического проектирования, содержащиеся в работах Н. Г. Алексеева, В. С. Безруковой, Б. М. Бим-Бада, Н. М. Борытко, Л. И. Гурье, И. А. Колесниковой, Г. Б. Корнетова, А. М. Моисеева, Л. И. Новиковой, В. В. Серикова, Н. Н. Суртаевой, Ю. К. Черновой, В. З. Юсупова, Н. О. Яковлевой и др., получившие развитие в исследованиях И. Ф. Бережной. Она изучала проектирование ИТПР будущих специалистов – студентов вузов и дала следующее определение: «Индивидуальная траектория профессионального развития – это персональная стратегия профессионального роста студента, совершенствования его личностных качеств, формирования профессиональных компетенций, выстраиваемая на основе осознания и субъективации профессиональных целей, ценностей, норм, а также признания уникальности личности и создания условий для реализации ее потенциала» [3].

Проведенное исследование позволяет утверждать, что процесс переподготовки офицеров-преподавателей становится успешным, если от проектирования ИОТ, которое осуществляется совместно офицером-преподавателем и офицерами (командирами, преподавателями) – участниками переподготовки, происходит переход к самостоятельному проектированию ИТПР офицера-преподавателя. При этом, если проектирование ИОТ можно рассматривать в качестве средства решения тактических задач становления офицера-преподавателя, то проектирование ИТПР офицера-преподавателя – в качестве средства решения стратегических задач становления и развития высококвалифицированного преподавателя-профессионала, способного решать сложнейшие задачи подготовки молодых специалистов – офицеров Российской Армии, обладающих необходимыми и востребованными личностно-профессиональными качествами.

Следуя личностно-ориентированному, деятельностному, контекстному, средовому методологическим подходам и к проектированию ИТПР офицера-преподавателя, и к разработке педагогических технологий, которые реализуются в образовательном процессе – процессе переподготовки офицеров-преподавателей для осуществления ими педагогической деятельности в военных вузах, особенно важно установить наиболее действенные методы, включаемые в содержательно-процессуальные блоки таких технологий. Наряду с традиционными (поэтапного представления учебной информации, иллюстративно-объяснительный и др.) и инновационными (инициирования самостоятельной работы, постановки и решения ситуационных задач, погружения и др.) методами, получившими широкое представление в научной педагогической литературе [4], важно использовать инновационные методы, основанные на психологическом восприятии офицерами-преподавателями нового для них вида военно-профессиональной деятельности с учетом его (восприятия) особенностей, а также специфики профессиональной переподготовки в военных вузах. Одним из таких методов должен стать метод, который мы называем методом перехода в зону для ближайшего развития с использованием ИТПР офицера-преподавателя. При разработке этого метода мы опираемся на учение Л. С. Выготского о зонах актуального и ближайшего развития [5, 6] (психологический аспект), а также на концепцию педагогического сопровождения, помощи и руководства в соответствии с гуманитарной стратегией воспитания, разработанную научной педагогической школой Н. М. Борытко [6] (педагогический аспект). В то же время мы учитываем, что интеграция позиций двух научных областей – педагогики и психологии при установлении характеристик обозначенного метода должна основываться на принципах андрагогики, так как в процесс переподготовки вовлечены взрослые обучающиеся, имеющие определенный опыт военно-профессиональной деятельности и мотивированные для осуществления преподавательской деятельности в военных вузах.

Перечислим основные характеристики использования метода перехода в зону для ближайшего развития с использованием ИТПР офицера-преподавателя.

1. Основываясь на спроектированной ИТПР офицера-преподавателя, устанавливаются: зона актуального и зона ближайшего развития субъекта, которые могут быть выделены для последовательного движения по траектории на указанных в ней этапах. В связи с этим дол-

жен быть использован соответствующий диагностический инструментарий, позволяющий определить актуальные (соответствующие текущему состоянию) уровни: а) знаний и умений, б) готовности (по компонентам) субъекта переподготовки к осуществлению педагогической военно-профессиональной деятельности в вузе (зона актуального развития), а также уровни потенциального состояния, которые могут быть достигнуты субъектом самостоятельно или во взаимодействии с другими субъектами процесса переподготовки (зона для ближайшего развития) через некоторый промежуток времени. Количество итераций будет определяться количеством этапов, установленных для ИТПР офицера-преподавателя. Следует отметить, что мы рассматриваем не зону ближайшего, а зону для ближайшего развития субъекта переподготовки, подчеркивая тем самым детерминирующий характер внутренней доминанты профессионального саморазвития офицеров-преподавателей, у которых уже достаточно развиты мотивационный, коммуникативный, когнитивный и волевой потенциалы.

2. Разрабатывается алгоритм педагогического сопровождения продвижения офицера-преподавателя по пути освоения им программы переподготовки в соответствии с ИТПР. Педагогическое сопровождение, определяемое Н. М. Борытко как «создание и развитие разносторонних условий для принятия субъектом развития оптимальных решений в различных ситуациях жизненного выбора» [6], будет успешным, если «строится в контексте гуманитарной парадигмы, то есть отвечает требованиям обусловленности целостности педагогического процесса внутренними закономерными причинами самодвижения субъектов, нелинейного и кризисного характера их саморазвития, необходимости оказания содействия в поступательном развитии» [6] проходящих переподготовку офицеров-преподавателей. Тем самым предлагаемый метод может выступать в качестве ведущего в системе педагогического сопровождения переподготовки офицеров-преподавателей для достижения установленных целей. При определенных условиях (например, недостаточные подготовленность к освоению образовательной программы или мотивированность офицера-преподавателя, проходящего переподготовку) для эффективного применения метода перехода в зону для ближайшего развития с использованием ИТПР офицера-преподавателя может быть использован скаффолдинг (*scaffolding*) [7], что в дословном переводе означает «строительные леса» и достаточно точно отражает смысл использования соответствующих приемов, которые образуют данный способ педагогического взаимодействия: перед обучающимся ставится задача, которую он может решить лишь с помощью более опытного субъекта, первоначально оказывающего ему помощь в поиске решения, но затем постепенно сокращающего эту помощь, то есть убирающего своеобразные «строительные леса».

3. Использование метода базируется на следующих принципах андрагогики, которые становятся методологическими принципами осуществления научно-исследовательской и практической деятельности по проектированию и реализации ИТПР офицера-преподавателя: личностно-ориентированному подходу соответствуют принцип признания ведущей роли обучающегося и принцип формирования новых образовательных потребностей, деятельностному подходу – принцип рефлексивно-ценностного отношения к профессиональному опыту обучающегося взрослого, принцип диверсификации целей, содержания и методов обучения взрослых и принцип выработки новых смыслов образования, контекстному подходу – принцип экзистенциальной обусловленности выбора способов организации процесса обучения взрослых и принцип своевременной актуализации результатов обучения, средовому подходу – принцип возрастающей (непрерывной) интеллектуализации среды образования и принцип приоритетности саморазвития в самореализации субъектов.

Рассмотренный метод перехода в зону для ближайшего развития субъектов с использованием ИТПР офицера-преподавателя в системе переподготовки и повышения квалификации в военных вузах обеспечит достижение установленных целей и решение поставленных задач, если реализация этого метода будет осуществляться на основе глубокого понимания психолого-педагогических характеристик и особенностей переподготовки, влияния на этот процесс внешних (объективных) и внутренних (субъективных) факторов, специфики функцио-

нирования образовательной среды военного вуза, а также научно обоснованного методического сопровождения проектирования и реализации в процессе переподготовки ИТПР офицера-преподавателя.

### Список используемых источников

1. *Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С.* Динамика системы познавательной мотивации в процессе становления преподавателя военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 262–266.
2. *Алексеев Н. А.* Психологическое знание в составе педагогического исследования // Образование и наука. – 2007. – № 2 (44). – С. 56–66.
3. *Березная И. Ф.* Педагогическое проектирование индивидуальной траектории профессионального развития будущего специалиста : автореф. дисс. ...д-ра пед. наук. – М., 2012. – С. 40.
4. Интерактивные методы формирования специальных навыков в процессе подготовки сотрудников по должности служащего «Полицейский» : моногр. / Е. И. Мещерякова [и др.]. – Воронеж : Изд-во Воронежск. и-та МВД России, 2019. – С. 95.
5. *Выготский Л. С.* Мышление и речь. – Изд. 5-е, испр. – М. : Лабиринт, 1999. – 352 с. – URL: <http://www.studylib.ru/doc/2684115/1.-s.-vygotskij> (дата обращения: 23.12.2023).
6. *Борытко Н. М.* Гуманитарно-целостная стратегия воспитания // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. – 2008. – № 1. – С. 40–44.
7. *Марголис А. А.* Зона ближайшего развития, скаффолдинг и деятельность учителя // Культурно-историческая психология. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 15–26.

А. В. Пастушков,  
*кандидат педагогических наук, доцент;*  
В. Н. Прищепа,  
*кандидат военных наук;*  
А. В. Северенко,  
*кандидат технических наук*

## **ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СТРЕЛЬБЫ ИЗ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ В УСЛОВИЯХ СЛУЖЕБНО-БОЕВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ ВСЛЕДСТВИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

Представлен обоснованный анализ между уровнем подготовленности в стрельбе и различными показателями физической подготовленности. На основании полученных результатов дано обоснование возможности комплексования физической и огневой подготовки в процессе обучения стрельбе из стрелкового оружия.

Ключевые слова: физическая нагрузка, физическая подготовленность, физические упражнения, огневая подготовка, результаты стрельбы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Практика боевой деятельности показывает, что оперативность действий военнослужащих на сегодняшний день в различных локальных конфликтах зависит прежде всего от высоких личностных и психологических качеств, от уровня физической подготовленности военнослужащих, от их компетенции в совершенстве владения стрелковым оружием и уверенном использовании его в сложной, оперативно меняющейся обстановке. Известно, что в ряде инцидентов военнослужащие недостаточно профессионально используют приемы рукопашного боя и применяют индивидуальное стрелковое оружие при выполнении боевых задач, что часто ведет к невыполнению поставленной задачи, а иногда – и к реальной угрозе их жизнедеятельности.

Кроме того, известно, что профессиональная деятельность военнослужащих в значительной мере зависит от их физической подготовленности. Успешность обучения любому виду стрельбы тоже зависит от уровня развития физических качеств и функционального состояния организма. В связи с этим возникла необходимость рассмотреть вопрос о возможности развития определенных физических качеств, влияющих на точность стрельбы из стрелкового оружия у военнослужащих, т. е. о возможности использования теории переноса тренированности.

### **ВЗАИМОСВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКОЙ И СТРЕЛКОВОЙ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ**

В бою или в условиях, приближенных к боевым, огонь из стрелкового оружия солдаты ведут, как правило, в состоянии физического напряжения, и к этому их нужно готовить заблаговременно (Н. L`Etang, 1981).

Тесная взаимосвязь между физической и военно-профессиональной деятельностью неоднократно доказывалась большим числом авторов (Л. А. Вейднер-Дубровин, 1960; Ю. К. Демьяненко, Л. Ф. Евсеева, 1982). Большая работа в указанном направлении проведена в рамках темы НИР «Огонь» (научно-исследовательская лаборатория ВИФК).

Различные стрелки мирового класса для снятия нервного напряжения и регулирования предстартового состояния используют физические нагрузки прямо перед стрельбой в виде ходьбы, бега, легких гимнастических упражнений. Здесь имеется в виду то, что физические нагрузки далеко не всегда влияют негативно. Что же касается физической тренировки в режиме подготовки спортсменов-стрелков к соревнованиям, то все те из них, которые были опрошены (НИР «Огонь»), признают: в системе подготовки стрелка физические нагрузки непременно должны иметь место, причем преимущественно такие, которые развивают общую и статическую выносливость. Вместе с тем все опрошенные полагают обоснованным использование разнообразных физических нагрузок и в перерывах между стрельбой прямо на соревнованиях (рис. 1). По их мнению, это необходимо для предотвращения утомления и устранения усталости. Однако в данном вопросе единой точки зрения не существует.

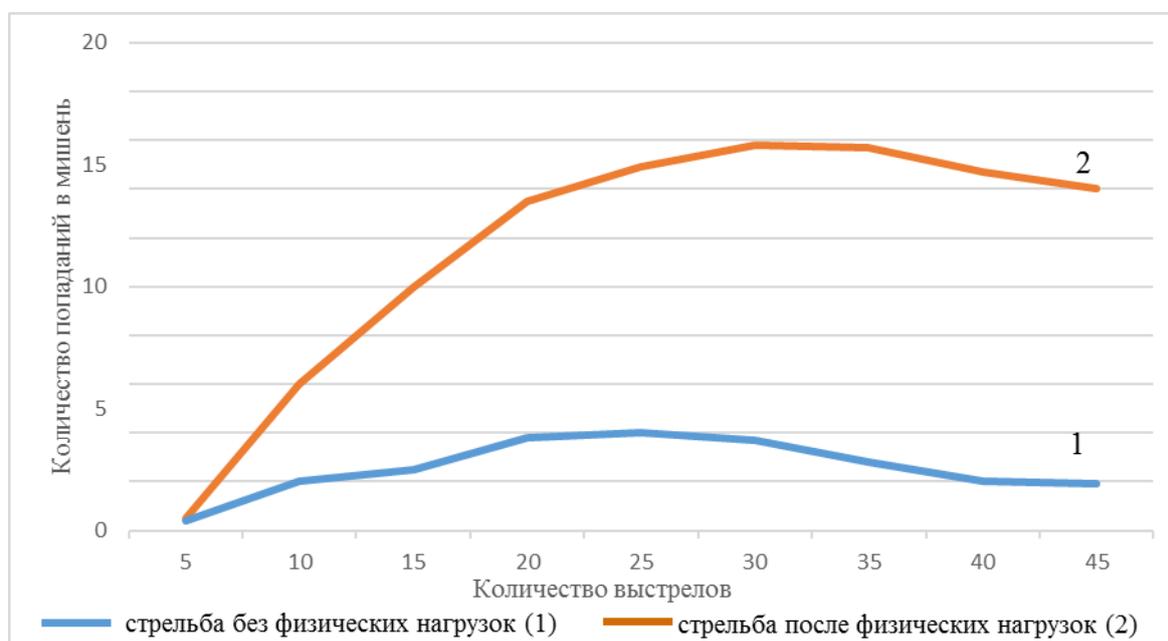


Рис. 1. Результативность тренировочного дня во время выполнения упражнений стрельбы

Некоторые современные авторы, в том числе и авторы учебников, указывают на необходимость нормализации функционального состояния организма перед стартом соревнований. В качестве важного элемента подобного процесса выступают средства физической подготовки, т. е. физические упражнения. Выделяют три наиболее значимые целевые установки, которые могут быть допущены в процессе разминания:

1) разминание совокупного характера, типа специального разминания «стрельбы вхолостую»;

2) «эмоциональная и психологическая настройка»;

3) «расслабление и идеомоторная настройка».

В отношении физической подготовки стрелков главным физическим качеством, как и в любом ином виде спорта, является выносливость, причем как общая, так и специальная.

Очень сильные стрелки – спортсмены, которые представляют сборные команды Российской Федерации, Соединенных Штатов Америки, Германии, Румынии, Финляндии – используют для развития своей общей физической подготовки:

– бег малой и средней интенсивности;

– плавание;

– гимнастические упражнения, которые направлены на развитие силы и силовой выносливости в достаточно существенных по объему количествах.

Обратимся к главным выводам научных исследований о воздействии физической нагрузки на результаты стрельбы в процессе служебно-боевой деятельности. Так, И. П. Беловодченко (1959) установил, что у военнослужащих, подготовленных к производству стрельбы на фоне сильных воздействий разноплановых физических нагрузок, в ходе тактических учений значительно меньше снижается эффективность стрельбы по сравнению с другими участниками эксперимента.

Кроме того, было определено, что в ходе нескольких дней тактических учений итоги стрельбы в максимальной степени становятся иными после применения физических нагрузок, которые свойственны данному типу специальной работы. Максимальные изменения отмечаются при стрельбе из положения стоя. Степень многосторонней физической подготовленности военнослужащих представляет собой очень важный фактор для стабильности стрельбы при поэтапном проведении тактических учений. При этом важное значение для неизменности таких результатов имеет преимущественное развитие скоростной и общей выносливости. В обычных условиях (в состоянии неустоимости) отличий в стрельбе из автомата Калашникова (АК-74) у военнослужащих, отлично и недостаточно физически подготовленных, в большинстве случаев не наблюдается. Но под влиянием физических нагрузок, всплеска эмоциональности и психического напряжения эти различия проявляются и достигают существенных значений. А меткость стрельбы из АК-74 у военнослужащих, недостаточно физически подготовленных, значительно уменьшается, тогда как у отлично подготовленных она на протяжении многодневного наступления в конечном счете не изменяется.

Военнослужащие с отличными показателями физической подготовленности более оперативно и эффективно осуществляют боевые приемы и действия (рис. 2). А значение высокого показателя физической подготовленности проявляется в большей степени, чем тяжелее обстановка, в которой действует личный состав.

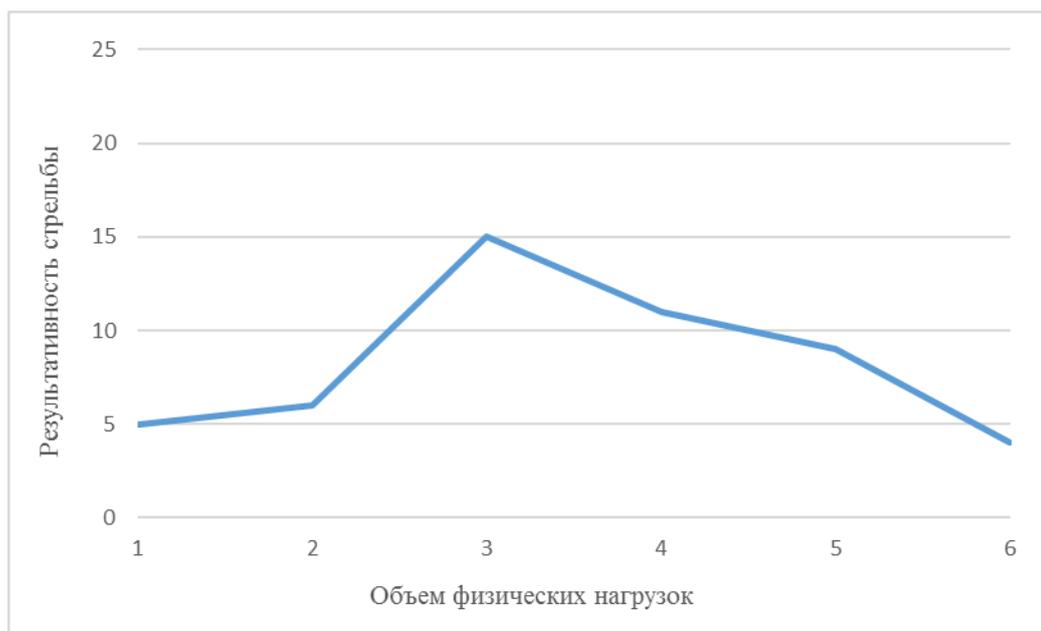


Рис. 2. Эффективность выполнения упражнений стрельбы

Сильное воздействие физической нагрузки, основным свойством которой являются психофизиологические изменения в организме человека, по причине увеличения индуцирования

нервной деятельности ведет к ухудшению результатов стрельбы. Негативное влияние физической нагрузки особенно сильно проявляется тогда, когда работа совершается в процессе мускульной активности или сразу вслед за ней. При этом очевидные изменения в эффективности стрельбы происходят в тех случаях, когда требуется наиболее тонкое координирование своих действий, в большей мере при недостаточности точек опоры.

Негативное влияние физических нагрузок возникает только при изначальных выстреливаниях на фоне физического перенапряжения. В будущем же при постоянной тренировке в схожих условиях данное неблагоприятное влияние физических нагрузок довольно быстро снижается. Хоть физические нагрузки и влекут за собой определенные ухудшения итогов стрельбы обучающихся при резких приемах, когда навык осуществления выстрелов при физическом перенапряжении недостаточный, однако при проведении тренинга с определенными нагрузками приобретается иная, имеющая большое значение особенность – возрастает устойчивость ведения стрельбы на фоне влияния затруднений, возникших как результат физической нагрузки.

Очевидно, что активное возрастание устойчивости стрельбы из стрелкового оружия происходит благодаря обретению новых приемов в осуществлении выстрела (мгновенное прицеливание и скоростное осуществление выстрела). Кроме того, нарабатывается умение неравномерного увеличения усилий, направленных на спусковой механизм, по сравнению с нерезким усилием в привычных условиях.

На итоги стрельбы воздействует не только физическая нагрузка, но и ряд иных факторов – длительность военной службы, степень военной профессионально-должностной подготовленности, навык в использовании оружия. Форма влияния физических нагрузок на итоги стрельбы в направлении и проявлении улучшений (или ухудшений) находится в зависимости не столько от какой-то специфики производимых стрелковых тренировок, сколько от насыщенности задействования нагрузок, показателя физической натренированности военнослужащих (прежде всего от степени сформированности такого качества, как выносливость), твердых знаний, умений в стрельбе, а также от психологической устойчивости и адаптационных возможностей военнослужащего. В наибольшей степени проявившиеся преобразования данных стрельбы впоследствии либо при осуществлении физического напряжения осуществляются тогда, когда физическая нагрузка по силе мышечной деятельности доходит до субмаксимальных величин.

Эффективность стрельбы из стрелкового оружия под воздействием физических нагрузок становится иной, как правило, по двум характеристикам: перемещается средняя точка поражения, возрастает разброс пуль на мишени. Причины, которые влияют на интенсивность возрастания разброса пуль на мишени, бывают следующими:

- физиологические (покачивающаяся стойка стрелка, покачивания оружия);
- психологические (ошибки в прицеливании и осуществлении выстрела).

Установлено, что в стрельбе из стрелкового оружия уровень физической подготовленности играет немаловажную роль. Средства физической подготовки в сочетании со стрелковым тренировочным процессом обуславливают и формируют признак устойчивости и точности при стрельбе из стрелкового оружия.

## **ВЫВОД**

Таким образом, использование комплексирования физической и огневой подготовки является неотъемлемой частью процесса обучения стрельбе из стрелкового оружия, а применение физических упражнений для регуляции предстартового состояния стрелка может стать одним из приемов оперативного приведения организма в состояние полной готовности к стрельбе.

### Список используемых источников

1. *Беловодченко И. П.* Устойчивость результатов стрельбы из автомата в ходе многодневных тактических учений в зависимости от характера предварительной подготовки // Труды института. – Л. : ВДКФФК и С, 1959. – Вып. 24 – С. 14–16.
2. *Вейднер-Дубровин Л. А.* Некоторые вопросы изучения зависимости между физической подготовленностью и боевой выучкой личного состава // Труды института. – Л. : КВИФК и С, 1960. – Вып. 28. – С. 148–162.
3. *Демьяненко Ю. К., Евсеева Л. Ф.* Теоретическое обоснование рационального построения учебного процесса по физической подготовке на начальных этапах обучения курсантов // Военно-профессиональное обучение и физическая подготовка. – Л. : ВДКИФК и С, 1982. – С. 66–70.
4. *Поципун А. А.* Научно-педагогические основы обучения стрельбе из боевого оружия : моногр. – СПб. : УМВД России и ВИФК, 2001. – 240 с.

М. А. Чебурков;  
Е. И. Шабаков,  
кандидат технических наук, доцент

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДГОТОВКИ ОБУЧАЮЩИХСЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ И НЕИНВАРИАНТНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

В статье предложен вариант математического описания подготовки обучающихся в вузе с учетом нелинейных, неинвариантных свойств образовательного процесса. Совокупный объем знаний, получаемых обучающимися в ходе подготовки, описан математической моделью с применением многомерных матриц. В основе предложенной математической модели подготовки обучающихся с учетом нелинейных и неинвариантных свойств образовательного процесса лежит учебный план подготовки специалистов, данные о квалификации профессорско-преподавательского состава, особенности памяти обучающихся (запоминания, усвоения и забывание полученных знаний).

Ключевые слова: подготовка обучающихся, учебный план, нелинейность, неинвариантность, внешние источники информации.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача совершенствования современной системы высшего образования, состоящая в повышении качества подготовленности выпускников вузов, может быть решена путем внедрения компетентностного подхода в образовательный процесс. Суть компетентностного подхода состоит в формировании у обучающихся способностей решения задач в определенной области деятельности на основе имеющихся знаний, умений, а также личностных качеств.

Такой подход должен содержать математическое обеспечение системы оценивания результатов образовательного процесса и выработку корректирующих действий, позволяющих оперативно оценивать уровень сформированности компетентности обучающихся на любом этапе освоения образовательной программы. Ядром такого подхода должна стать математическая модель подготовки обучающихся в учебном заведении, которая удовлетворяет требованиям системного подхода и отражает упорядоченную совокупность элементов, обособленных от внешней среды, а также взаимодействует с ней как целое для достижения поставленных целей [1]. Любой составляющий элемент такой модели должен быть представлен в виде собственной математической модели в рамках единых правил описания.

Сложность модели подготовки обучающихся определяется ценностно-ориентированными механизмами функционирования множества взаимосвязанных основных и поддерживающих процессов, целевым назначением, особенностями и характером деятельности образовательной организации. Механизмы взаимодействия могут иметь различное физическое содержание начиная с физики и механики и заканчивая взаимодействиями, относящимися к субъекту обучения (например, психологией, анатомией и педагогикой) [2]. К таким взаимодействиям у обучающихся относятся процессы научения и забывания [9].

На сегодняшний день наиболее распространенным подходом к оцениванию уровня сформированности компетенций является детерминированный матричный подход [3]. Так как компетенции имеют междисциплинарный характер, в формировании каждой из них могут участвовать одновременно несколько дисциплин, в том числе разнесенных во времени (изучаемых в разных семестрах), а также отдельные темы отдельных дисциплин. В то же время одна дисциплина может одновременно участвовать в формировании нескольких компетенций. Следовательно, процесс формирования компетенций будет носить многопараметрический характер, для описания которого в матричном виде необходимо использовать мерность пространства определения, отличную от векторной или общепринятой двухмерной матрич-

ной. Поэтому модель организации подготовки обучающихся в учебном заведении должна иметь, в общем случае, многомерный характер.

Таким образом, цель публикации состоит в формулировании математической модели подготовки обучающихся с учетом нелинейных и неинвариантных свойств образовательного процесса, учитывающей такие процессы памяти, как научение и забывание, имеющие нелинейный и нестационарный характер.

## МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

Процесс подготовки обучающихся в учебном заведении можно представить как систему, включающую в себя следующие взаимосвязанные компоненты: субъектно-объектный, организационный, формирующий и диагностико-результативный. Воздействие этих компонент образовательного процесса направлено на обучающегося с целью формирования компетентного специалиста, соответствующего требованиям заказчика. Субъектно-объектный компонент включает в себя всех субъектов, участвующих в создании, управлении и развитии, а также процессы, происходящих в вузе (начальники, преподаватели, обучающиеся, инженерно-технический персонал) Организационный компонент включает в себя совокупность нормативно-правовых актов, законов, подзаконных актов и приказов министерств, а также требований, предъявляемых к выпускнику. Формирующий компонент включает в себя методы организации учебного процесса, технологии проведения учебных занятий, а также внутренние факторы, оказывающие влияние на формирование профессиональных компетенций у обучающегося. Диагностико-результативный компонент объединяет в себе технологии, критерии и показатели оценивания сформированных знаний, умений и навыков, критерии сформированности компетенций обучающегося, а также формы, методы и приемы изучения, анализа и оценки функционирования образовательной организации.

Основной целью воздействия данных компонент на обучающихся является формирование заданного объема знаний, умений и навыков, который соответствует требованиям заказчика подготовки. Поэтому необходимо осуществлять оценку объема знаний обучающихся на протяжении всего периода обучения.

Таким образом, в ходе организации образовательной деятельности необходимо оценивать возможность формирования требуемого объема знаний обучающихся, выполнять контроль сформированного объема знаний, а также осуществлять оценивание остаточного объема знаний обучающихся с целью поддержания качества подготовки на требуемом уровне в течение всего периода обучения [4].

В основе построения математической модели подготовки обучающихся с учетом нелинейных и неинвариантных свойств образовательного процесса предлагается использовать функционально-структурный подход, при котором образовательный процесс в вузе разбивается на структуру из последовательных и в значительной степени функционально завершенных циклов обучения. В качестве такого цикла наиболее естественно и удобно выбрать цикл обучения в одном семестре. При таком выборе процесс обучения будет представлять собой последовательно реализуемые циклы (семестры) обучения, причем выход каждого из предыдущих циклов служит входом последующего цикла (семестра) обучения.

Модель подготовки в семестре предлагается построить по методу так называемого «черного ящика» [5]. Формулирование модели в этом случае сводится к постулированию структуры аппроксиматора, связывающего входные и выходные параметры «черного ящика» и корректно отображающего свойства обучающей системы. Следует отметить, что метод «черного ящика» не предусматривает учет семантического (информационного) наполнения объема знаний.

В качестве основной переменной, действующей в разрабатываемой модели, предложено использовать объем знаний, который можно подразделить на следующие группы:

- исходный объем знаний, определяемый учебным планом;
- объем знаний, полученный обучающимися непосредственно в процессе обучения;
- объем знаний, усвоенный обучающимися по завершении обучения в семестре с учетом усвоения объема знаний из других дисциплин и дополнительных источников знаний, то есть в процессе «научения» обучающихся. Процесс «научения» или «переполнения» является важным элементом обучения и с математической точки зрения представляет собой нелинейный процесс.

При переходе обучающихся на старшие курсы объем усвоенных ранее знаний будет уменьшаться. Это объясняется особенностями забывания объема знаний обучающимися. Процесс забывания носит зависимый от времени характер, то есть является нестационарным во времени.

В работах [5, 6] отмечено, что уравнения, широко применяемые в физике и технике, успешно могут применяться для описания смежных областей научного знания, например, биологии, экономики и педагогики. В работе [7] исследованы вопросы применения теории точных наук в области подготовки инженерных кадров, что позволило описать состояние подготовленности обучающегося на рассматриваемый момент времени с учетом программы подготовки. За счет перехода в математическом описании к многомерным пространствам с многомерными матрицами в работе [8] была построена многомерная матричная модель, учитывающая нелинейное и нестационарное состояния системы, которая позволяет осуществить обработку многомерных (гиперспектральных) изображений. Модель [8] берется в данной работе за основу.

Многомерные матрицы представляют собой весьма специфический математический объект, недостаточно широко освещенный в научно-технической литературе. Основы теории многомерных матриц изложены в монографии Н. П. Соколова [10], в которой изложен глубоко теоретизированный подход к рассматриваемой проблеме использования многомерных матриц, без демонстрации практических примеров применения к реальным многомерным процессам и системам.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Поскольку в качестве основы для распределения учебного времени при организации образовательной деятельности в учебном заведении используются учебный план распределения учебного времени между дисциплинами, его данные целесообразно применить в качестве исходных при разработке такой модели. Учебный план в целом может быть представлен в виде двухмерной матрицы временных затрат

$$[a_{ij}], \quad (1)$$

где  $a_{ij}$  – количество часов, отводимых на изучение  $j$ -й дисциплины в  $i$ -м семестре;

$i$  – номер семестра, в котором изучается дисциплина,  $i = \overline{1, n_i}$  (здесь  $n_i$  – общее число семестров обучения);

$j$  – номер (индекс) дисциплины, которая согласно учебному плану изучается в  $i$ -м семестре,  $j = \overline{1, n_j}$  (здесь  $n_j$  – максимальное количество дисциплин, изучаемых в  $i$  семестрах, при этом  $i = \overline{1, n_i}$ ).

Так как число дисциплин, изучаемых в каждом  $i$ -м семестре, может отличаться друг от друга, размер матрицы  $n_j$  по измерению  $j$  определяется максимальным числом изучаемых дисциплин среди всех семестров обучения, а ячейки матрицы (1), в которых отсутствуют дисциплины, заполняются нулями.

Преподаватель проводит занятия с обучающимися в рамках учебных занятий, отведенных учебным планом на изучение  $j$ -й дисциплины в  $i$ -м семестре. Как правило, организационно изучение одной дисциплины в  $i$ -м семестре обеспечивает один ведущий преподаватель. Он разрабатывает тематический план изучения  $j$ -й дисциплины в  $i$ -м семестре, в котором распределяет учебное время по темам дисциплин. Тематический план состоит из  $k = \overline{1, n_k}$  тем. Дополнив матрицу учебного плана (1) третьим измерением  $k$ , содержащим информацию о распределении времени учебного плана в  $i$ -м семестре в  $j$ -й дисциплине, можно получить матрицу временных затрат

$$[a_{ijk}], \quad (2)$$

детализированную до каждой темы изучаемых дисциплин.

Так как число  $n_k$  тем в разных дисциплинах  $j = \overline{1, n_j}$  может быть различным, целесообразно в качестве  $n_k$  выбрать максимально возможное число тем в изучаемых дисциплинах во всех семестрах.

С формальной точки зрения процесс обучения обучающегося преподавателем состоит в переводе временной компоненты, заложенной в учебный план, в объем знаний, доведенных до обучающегося в результате процесса обучения. Этот процесс для каждой дисциплины и каждого преподавателя должен учитывать две составляющие: во-первых, распределение учебного материала по темам изучаемой дисциплины, во-вторых, качество доведения информации каждым преподавателем в каждой теме изучаемой дисциплины.

Поэтому можно предполагать, что преподаватель будет передавать знания обучающимся в  $i$ -м семестре по  $j$ -й дисциплине по всем ее  $k = \overline{1, n_k}$  темам. Однако эффективность такой передачи может быть разной в силу особенностей содержания темы, подготовленности как обучающихся, так и преподавателя к изучению конкретной темы. Можно говорить о том, что знания от педагога неравномерно распределяются по темам изучаемой дисциплины.

Такие неравномерные передаточные свойства в теории систем принято учитывать с помощью интеграла суперпозиции [8]. В случае дискретных многомерных систем аналогом интеграла суперпозиции могут служить последовательно вычисляемые операции поэлементного умножения и внутриматричного суммирования по координате  $k$  рассеивания:

$$[b_{ijk}] = \overset{n_k}{S}_k [a_{ijk}] \boxtimes [h_{ijk\hat{k}}], \quad (3)$$

где  $[b_{ijk}]$  – потенциально возможный объем знаний, доведенный по завершении обучения по  $\hat{k}$ -й теме  $j$ -й дисциплины в  $i$ -м семестре;  
 $[h_{ijk\hat{k}}]$  – матрица коэффициентов взаимного рассеивания объема знаний по  $k$  темам преподаваемой  $j$ -й дисциплины в  $i$ -м семестре;  
 $\hat{k}$  – условное обозначение индекса темы после завершения рассеивания объема знаний, т. е. после завершения вычисления операции матричной суперпозиции.

Математическая операция поэлементного умножения двух матриц обозначается символом  $\boxtimes$ . Для матриц, имеющих одинаковую мерность и одинаковый размер по каждому индексу, указанная операция позволяет получить результирующую матрицу того же размера и той же мерности. При этом каждый элемент результирующей матрицы равен произведению элементов матриц-сомножителей, имеющих одинаковые индексы.

Операция внутриматричного суммирования многомерной матрицы  $[a_{i,j,\dots,l,\dots,u}]$  вдоль произвольной координаты  $l$  обозначается знаком  $\overset{n_l}{S}_{l=1} [a_{i,j,\dots,l,\dots,u}] = [a_{i,j,\dots,l-1,l+1,\dots,u}]$  и выполняется как

поэлементное сложение всех элементов исходной матрицы с индексом 1 для всех индексов  $(i, j, \dots, u)$ .

В частности, для кубической матрицы  $[a_{ijk}]$  внутриматричное суммирование вдоль индекса, например  $k$ , выполняется следующим образом:

$$\sum_{k=1}^{n_k} [a_{ijk}] = \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} [a_{ijk}] = \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} [a_{i\bar{j}1} | a_{i\bar{j}2} | \dots | a_{i\bar{j}k}] = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} [a_{i\bar{j}1} + a_{i\bar{j}2} + \dots + a_{i\bar{j}k}] = [a_{ij}], \quad (4)$$

Внутриматричное суммирование по одному индексу уменьшает мерность результирующей матрицы на единицу.

От квалификации преподавателя зависит, какая часть потенциально возможного объема знаний будет доведена до обучающегося. Наиболее простым и доступным методом оценивания успешности работы преподавателя является применение метода экспертных оценок с использованием четырехбалльной системы – от «неудовлетворительно» до «отлично». Это может быть учтено в виде матрицы качества преподавания  $[d_{ijk}]$   $k$ -й темы  $j$ -й дисциплины в  $i$ -м семестре при преподавании, а объем знаний  $[e_{jki}^y]$ , полученных обучающимися в  $i$ -м семестре по  $k$ -й теме  $j$ -й дисциплины, можно определить путем поэлементного умножения матрицы (3) на матрицу квалификации преподавателя

$$[e_{jki}^y] = [d_{ijk}] \boxtimes [b_{ijk}] = [d_{ijk}] \boxtimes \sum_{k=1}^{n_k} [d_{ijk}] \boxtimes [h_{ijk}]. \quad (5)$$

Следует отметить, что числовые данные матрицы  $[e_{jki}^y]$  формируются в процессе обучения без учета дополнительных источников объема знаний и взаимодействия этих источников с изучаемыми дисциплинами и конкретными темами в дисциплинах. К таким дополнительным объемам знаний можно отнести знания, полученные в ходе предыдущих этапов обучения (в школе или при обучении в предыдущих семестрах), а также знания, полученные из сторонних источников информации (интернет, телевидение, печатные издания, библиотека и т. п.).

Объем знаний, полученных из дополнительных источников информации будет влиять на процесс заполнения памяти обучаемых, т. е. на процесс «научения». В рамках разрабатываемой модели объем знаний, полученных из дополнительных источников, предлагается учитывать с помощью матрицы  $[e_{ijk}^{ct}]$ , каждый  $(i, j, k)$ -й элемент которой определяется объемом знаний, дополнительно полученных при обучении в  $i$ -м семестре в  $j$ -й дисциплине по  $k$ -й теме. Объем знаний при завершении обучения в произвольном семестре будет иметь вид

$$[e_{ijk}] = [e_{ijk}^y] + [e_{ijk}^{ct}]. \quad (6)$$

Зная объем знаний, полученных обучающимся по всем  $k$  темам в  $i$ -м семестре в  $j$ -й дисциплине  $[e_{ijk}]$ , рассчитывается объем знаний, полученных по  $j$ -й дисциплине в  $i$ -м семестре:

$$[e_{ij}] = \sum_{k=1}^{n_k} [e_{ijk}], \quad (7)$$

а также объем знаний, полученных в ходе обучения в  $i$ -м семестре в целом:

$$\langle e_i \rangle = \sum_{j=1}^{n_j} [e_{ij}] = \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} [e_{ijk}]. \quad (8)$$

Многомерные матрицы взаимодействия можно задавать на основе экспериментальных исследований конкретного учебного процесса по конкретной специальности и конкретному набору обучающихся, например с помощью метода экспертных оценок.

Полученный объем знаний запускает в памяти обучающегося процессы восприятия, запоминания, узнавания и забывания. Для учета особенностей данных процессов предложена методика [9], основу которой составляет кривая научения. Под кривой научения в работе рассматривается взаимосвязь запомненного и переданного объема знаний в ходе освоения учебного плана.

В работе [9] утверждается, что не существует универсальной кривой научения, однако существующие общие закономерности позволяют строить упрощенные (частные) модели подготовки для конкретных обучающихся в конкретных условиях, допуская возможность их анализа современными математическими методами.

### ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ

Кривая научения обучающихся по характеру изменения функции схожа с кривой запоминания сигнала в технических приложениях, например с характеристической кривой в устройствах преобразования светового потока в электрический сигнал [11]. Общие закономерности кривой научения и характеристической кривой состоят в том, что кривые на начальных участках медленно нарастают, затем наступает процесс линейного усвоения объема знаний (сигнала) и далее следует участок насыщения, когда рост условного объема знаний (или накопленного сигнала) замедляется и может совсем остановиться.

Такие кривые имеют два перегиба и хорошо описываются с помощью степенного полинома третьего порядка. В работе [11] представлены результаты натурального эксперимента и последующего имитационного моделирования с аналоговым запоминающим устройством типа «графекон», в основе которого лежало представление характеристической кривой различными методами аппроксимации, в том числе с помощью степенного полинома. Эксперименты показали, что полином третьей степени дает наилучшие результаты по аппроксимации характеристической кривой. Поэтому нелинейную зависимость  $q = f(e)$  объема знаний  $q$ , оставшихся в памяти обучающихся после получения общего объема знаний  $e$ , предлагается описать полиномом вида

$$q = \sum_{r=0}^n p_r e^r = \sum_{r=0}^n \langle p_r \rangle \cdot e^r, \quad (9)$$

где  $p_r$  – коэффициенты аппроксимирующего полинома,  $r = \overline{0, n}$ ;

$\langle p_r \rangle$  – вектор коэффициентов аппроксимирующего полинома;

$n$  – степень аппроксимирующего полинома.

Для использования такого полинома в модели подготовки обучающихся необходимо осуществить переход к матричной форме записи выражения (9).

Следует предположить, что степень усвоения материала обучающимися в разных семестрах может быть разной. Это особенность приведет к различным значениям вектора коэффициентов аппроксимирующего полинома  $\langle p_r \rangle$  в каждом  $i$ -м семестре.

Для учета указанного различия вектор коэффициентов аппроксимирующего полинома  $\langle p_r \rangle$  необходимо расширить до матрицы коэффициентов аппроксимирующего полинома  $[p_{ir}]$ , что требует, во-первых, введения индекса номера семестра  $i$ ; во-вторых, приведения порядка индексации в соответствии с принятым в начале статьи правилом индексации. Для выполнения правила индекс  $r$  в матрице  $[p_{ir}]$  должен изменяться в пределах  $l = \overline{1, n_r}$ , вследствие чего выражение (11) преобразуется к виду

$$q = \sum_{r=1}^{n_r} \langle p_r \rangle e^{(r-1)}, \tag{10}$$

где  $n_r = n + 1$ .

С учетом введенных математических операций с матрицами и индексов  $i$  и  $r$  матрица коэффициентов аппроксимирующего полинома составит

$$[p_{ir}] = [p_{1r} | p_{2r} | \dots | p_{n_r r}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & \dots & p_{n_r, n+1} \\ p_{12} & p_{22} & \dots & \\ \vdots & \vdots & & \\ p_{1n+1} & p_{2n+1} & & \end{bmatrix}, \tag{11}$$

а вектор остаточных знаний будет определяться выражением

$$\langle q_i \rangle = S \sum_{r=1}^{n_r} \{ [p_{ir}] \} \boxtimes [e_{ir}], \tag{12}$$

где  $n$  – степень аппроксимирующего полинома,  $n = n_r - 1$ ;

$[e_{ir}]$  – матрица степеней, каждый элемент которой вычисляется по правилу

$$e_{ir} = \underbrace{e_i \times e_i \times \dots \times e_i}_{r \text{ раз}}, \text{ или } [e_{ir}] = \underbrace{\langle e_i \rangle \boxtimes \langle e_i \rangle \boxtimes \dots \boxtimes \langle e_i \rangle}_{r \text{ раз}};$$

$r$  – кратность поэлементного перемножения вектора  $\langle e_i \rangle$ .

Объем остаточных знаний  $\langle q_i \rangle$  после обучения в  $i$ -м семестре может быть использован в качестве дополнительного источника знаний при обучении в последующих семестрах обучения или при дальнейшем применении других форм обучения (курсов повышения квалификации, магистратуры, курсов переподготовки и т. д.). В этом случае между окончанием обучения в  $i$ -м семестре и началом обучения в последующих семестрах (или на соответствующих курсах повышения квалификации) существует интервал времени  $t_u$ , в течение которого у обучающихся происходит процесс «забывания» полученного ранее объема знаний. Следовательно, объем накопленных знаний со временем уменьшается. Указанный процесс носит нестационарный характер [9] и, как правило, аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. В результате объем дополнительных знаний  $\langle q_{i+1} \rangle$ , сформированных у обучающегося к началу нового этапа обучения, например в  $(i+1)$  семестре, может быть оценен в соответствии с выражением

$$\langle q_{i+1} \rangle = \langle q_i \rangle \exp(-zt_u), \tag{13}$$

где  $z$  – коэффициент забывания, определяемый в ходе оценивания компетентности обучающихся, например с помощью метода экспертных оценок.

Таким образом, полученные выражения (3)–(5), (12), (13) позволяют объединить в единую последовательность передачу и усвоение объема знаний обучающимися на протяжении всего процесса обучения в вузе, на курсах переподготовки, сборах, стажировках, а также оценить влияние на обучение дополнительных источников объема знаний.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение рассмотренной модели целесообразно использовать в организации учебного процесса на стадиях: разработки структурно-логической схемы обучения по специальности, распределения нагрузки как между дисциплинами, так и между темами внутри дисциплины, обоснования периодичности и объема повторения изучаемого материала, изучения возмож-

ностей и оптимизации применения технических средств обучения, автоматизированных обучающих систем, в том числе реальных образцов техники, совершенствования многоэтапной системы подготовки обучающихся, включая обучение в различных учебных заведениях, на курсах переподготовки, стажировке в войсках и на предприятиях промышленности, а также для оценивания влияния дополнительных источников информации на объем знаний, получаемых обучающимся.

### Список используемых источников

1. *Кунтурова Н. Б.* Особенности оценивания профессиональной компетентности будущих специалистов в процессе их подготовки в вузе // Научно-технические ведомости : Информатика. Телекоммуникации. Управление / СПбГПУ. – 2009. – № 5(86). – С. 194–198.
2. *Рымкевич П. П., Горшков А. С.* Модели современного мира в механике, физике, технике и экономике : учеб. пособие. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 28 с.
3. *Борзых В. Э., Шалкина Т. Н., Николаева Д. Р.* Метод математического моделирования процесса оценивания профессиональных компетенций выпускников вуза // Современные проблемы науки и образования : электрон. журн. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/121-17882> (дата обращения: 18.12.2023).
4. *Алтухов А. И., Калинин В. Н., Чебурков М. А.* Об опыте формирования и оценивания компетенций по дисциплинам профессионального цикла в системе военного образования // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 204–209.
5. *Хуанг Т. С., Шрейбер В. Ф., Третьяк О. И.* Обработка изображений : тр. Ин-та инженеров по электронике и радиотехнике. – 1972. – Т. 59, № 11. – С. 59–89.
6. *Моисеев Н. Н.* Математика ставит эксперимент. – М. : Наука, 1979. – 223 с.
7. Применение теории точных наук в области подготовки инженерных кадров / П. П. Рымкевич [и др.] // Вестник СПГУТД. Сер. 3 : Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2017. – № 1. – С. 120–126.
8. *Титков Б. В., Шабakov Е. И.* Оператор линейной фильтрации объемного изображения в имитационном моделировании телевизионной системы // Техника средств связи. Сер. : Техника телевидения. – 1984. – Вып. 2(6). – С. 69–76.
9. *Новиков Д. А.* Закономерности итеративного научения. – М. : Ин-т проблем управления РАН, 1998. – 77 с.
10. *Соколов Н. П.* Введение в теорию многомерных матриц. – Киев : Наукова думка, 1971.
11. Моделирование узлов телевизионной системы на ЭВМ / А. Р. Алетин [и др.] // Техника средств связи. Сер. : Техника телевидения. – 1977. – Вып. 4(6). – С. 49–55.

В. П. Огородников,  
*доктор философских наук, профессор*

## ОБЪЕКТИВНЫЕ И СУБЪЕКТИВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗВИТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Рассматриваются основные факторы становления космической техники: объективные и субъективные. Анализ производится в соответствии с принципом диалектического единства исторического и логического. Показывается, что развитие техники опирается на развитие производства материальных и духовных благ. В свою очередь, развитие производства стимулируется научно-техническим прогрессом и образованием, что демонстрируется в статье на примере развития отечественной космонавтики.

Ключевые слова: объективное и субъективное, астрономия и космология, наука, образование и производство, производительные силы и производственные отношения, военно-космическая деятельность.

Величайший мыслитель античности Аристотель, обосновывая первый закон логики – закон тождества, писал: «...иметь не одно значение – значит не иметь ни одного значения; если же у слов нет значений, тогда утрачена всякая возможность рассуждать друг с другом, а в действительности – и с самим собой; ибо невозможно ничего мыслить, если не мыслить что-нибудь одно» [1]. Закон запрещает путать и подменять понятия в рассуждении (т. е. употреблять одно и то же слово в разных значениях или вкладывать одно и то же значение в разные слова), создавать двусмысленность, уклоняться от темы.

Поэтому, прежде чем рассуждать об объективных и субъективных предпосылках развития космической техники, необходимо определить понятия «объективный» и «субъективный». В обыденной речи эти понятия часто используют, говоря о позиции или высказываниях какого-либо лица. Так, могут утверждать, что некий человек весьма пристрастен, предвзят в своих взглядах, т. е. субъективен. Если же некоторое лицо демонстрирует всю беспристрастность в обсуждении какого-то вопроса, то говорят, что этот человек высказывает объективные взгляды или просто – что он объективен. Такая интерпретация рассматриваемых терминов далека от философской и не может быть использована в данной статье.

В философии под «субъективным» понимают всё, что принадлежит человеческому сознанию – чувственной и рациональной его сторонам. Субъективное – это не только ощущения, восприятия, представления, понятия, суждения, умозаключения, но и волевые характеристики человека, его взгляды и убеждения; то, во что он верит или не верит, его знания, характер и уровень образования (действительный, а не «бумажный»). Субъективное – это и все формы общественного сознания, вся сфера духовной культуры. В материалистической философии субъективное есть различные формы отражения сознанием (конечно, не зеркальное) объективного. В этой смысловой связке «объективное» – все, что находится вне человеческого сознания; всё, что ему не принадлежит. Однако распространенной ошибкой является указание на объективное как на нечто, независимое от сознания. В этом контексте все результаты материальной деятельности человека (их Марк Тулий Цицерон называл «второй природой» [2]) объективны, но зависят от сознания только потому, что являются воплощением целей, желаний, воли и других моментов сознания.

Следовательно, объективное и субъективное неразрывно связаны с деятельностью человека – как материально-преобразующей, так и духовно-творческой. В целях изучения этой деятельности мы выделяем ее объективные и субъективные детерминанты.

Сказанное, безусловно, относится и к объективным и субъективным факторам развития космической техники. Объективный фактор развития космической техники – это конкретно-исторический уровень развития материального производства, на котором может создаваться космическая техника. С другой стороны, развитие материального (а сегодня и духовного)

производства детерминируется уровнем развития техники, в том числе космической. В этой диалектической связи не надо искать что-то абсолютно первичное или абсолютно вторичное. Однако определяющим моментом является именно материальное производство – в этом процессе совершенствуется техника, и благодаря этому возрастает производительность труда.

Техника неразрывно связана с человеческой деятельностью и познанием. *Homo sapiens* стал таковым только тогда, когда начал регулярно производить и использовать искусственно изготовленные средства труда – технику.

Развитие техники как системообразующего ядра производительных сил осуществляется в определенной форме производственных отношений (прежде всего, отношений собственности на средства производства), которая имеет свойство отставать от уровня развития производительных сил, сдерживая это развитие.

В период разложения родового строя (около 5–10 тысяч лет назад), обусловленного качественным скачком в развитии материального производства, резким повышением производительности труда, человек стал достаточно независим от окружающей природы, перешел от приспособления к ней ко все более полному приспособлению природы для удовлетворения своих насущных потребностей.

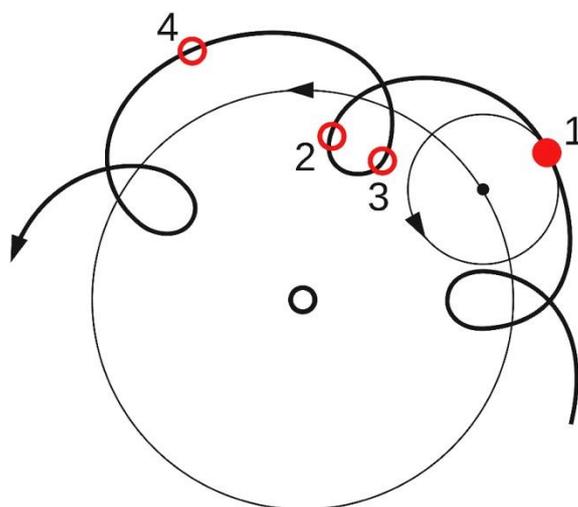
Революция в производстве привела к первой социальной революции – переходу к классовому обществу и государственному строю. Революция в бытии шла рука об руку с революцией в сознании – именно на этом переломе у разных народов мира (и в разное время) появляются мифы о полетах человека в космос. Сначала с использованием «естественных» средств – миф о полетах вавилонского царя Этана на орле (около 3 тысяч лет до н. э.), а потом и с использованием технических приспособлений – древнегреческий миф об Икаре, взлетевшем к Солнцу на крыльях из орлиных перьев, скрепленных воском (около 2 тысяч лет до н. э.).

Дальнейшее развитие техники и материального производства было воплощено уже не в мифах, а в конкретных конструкторских разработках летательных аппаратов. Начинается история полетов в древнем Китае. Еще в III–IV веках до н. э. китайцы изобрели и использовали, даже в практических целях, воздушных змеев. К X веку нашей эры относится изобретение в Китае пороха. Китайцы сразу же использовали порох в первых ракетах, которые привязывались к «огненным стрелам». В китайском языке термин «огненные стрелы» стал синонимом ракет. Кроме стрел ракеты широко использовались для фейерверков. Изобретение пороховой ракеты явилось мощной предпосылкой для дальнейшего развития ракетной техники.

Но прошли тысячелетия, прежде чем человек изобрел управляемые летательные аппараты тяжелее воздуха. Первой таким летательным аппаратом стал вертолет Леонардо да Винчи (1452–1519), имевший радиус винта 4,8 м. Изобретение и изготовление такого сложного устройства опирались на лучшие достижения материального производства того времени. Надо отметить, что эпоха Возрождения, ярчайшим представителем которой был Леонардо, имеет своей главной характеристикой расцвет европейской науки и искусства. В свою очередь, этот расцвет был подготовлен техническим прогрессом, разорвавшим тенеты отживших феодальных производственных отношений.

На этом фоне, на рубеже эпохи Возрождения и Нового времени, в Европе появляются новые открытия и изобретения, приблизившие космос к человеку, а человека – к космосу. Возникает естествознание, одним из первых представителей был Николай Коперник (1473–1543). Открытие Коперником гелиоцентрической системы [3] потрясло ученых не только принципиально новой трактовкой старого эмпирического материала, но и решением тех важных для практики мореплавания задач, которые не могли быть решены с позиций геоцентрической системы Клавдия Птолемея (100–170). Птолемея в своем знаменитом «Альмагесте» объяснял весьма причудливое движение «светил» по небосклону тем, что планеты (в число которых входило и Солнце) движутся вокруг Земли не по «правильным» орбитам, а совершают движение по малому кругу вокруг неких невидимых центров, которые, в свою

очередь, движутся вокруг Земли. Если планета движется вокруг одного невидимого центра, который обращается вокруг Земли, то это будет соответствовать одному эпициклу. «Эпицикл» – это «круг, движущийся по другому кругу». Если же этот невидимый центр принять обращающимся по другому малому кругу, вокруг второго невидимого центра, то тогда имеет место двойной эпицикл.



*Рис. 1. Эпициклы планеты, находящейся на орбите вокруг Земли (Земля – в центре)*

Такая схематика весьма запутывала и не давала возможности составить точные астрономические таблицы. Во времена Коперника мореплавание было уже основой активной торговли, во многом способствуя развитию экономики. Гелиоцентрическая система позволила Копернику и его последователям вооружить моряков новыми, достаточно точными астрономическими таблицами. Важнейшим следствием открытия Коперника было освобождение не только естественных, но и гуманитарных наук от царивших тогда (и имеющих влияние и сегодня) антропоцентризма и антропоморфизма. Благодаря этому и вместе с этим началось освобождение всей науки и от теологии [4].

Концепция Коперника, с одной стороны, – яркий пример активного воздействия субъективного фактора на становление материального производства, а с другой – того обстоятельства, что действие субъективного фактора, воплощение мысли в деятельности возможны лишь на определенном уровне развития материального производства. Идеи Коперника получили действительное практическое воплощение только с началом реального освоения космоса. Сильная в те времена католическая церковь объявила гелиоцентризм ересью и жестоко преследовала последователей Коперника. Надо отметить, что сила церкви, как мощного субъективного фактора социального развития, во все времена была обратно пропорциональна силе материального производства, производительности труда, научно-технического и социального прогресса в конкретном обществе. Наиболее знаменитой жертвой католицизма стал Джордано Бруно (1548–1600).

Джордано Бруно сочетал в своих мировоззрении весьма противоречивые взгляды. С одной стороны, как католический монах, он разделял взгляды неоплатонизма. С другой стороны, Бруно был приверженцем натурализма эпохи Возрождения.

Опираясь на гелиоцентрическую концепцию Коперника, Бруно развил множество идей, опередивших его век на несколько столетий. Так, в работе 1584 года «О бесконечности, Вселенной и мирах» [5], он высказал мысль о множестве миров Вселенной, которые могут быть обитаемыми, и при этом говорил, что мир един и однороден. Развенчание геоцентризма и антропоцентризма было тем субъективным фактором, который направил человеческую

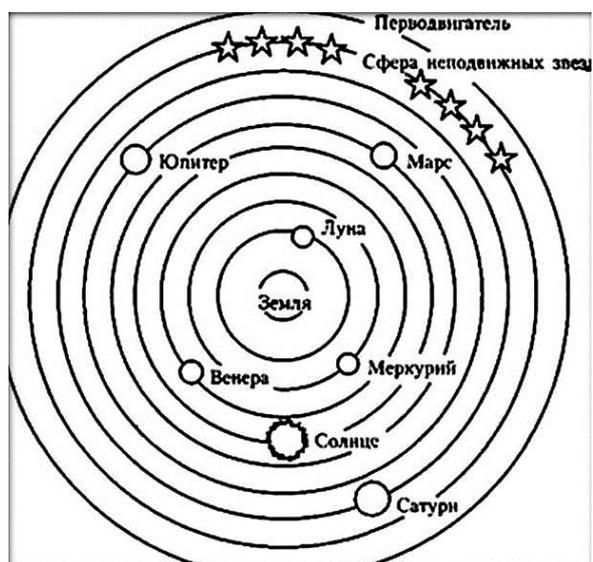
мысль в сторону освоения космоса. Ведь зачем изучать космос, если Земля является центром Вселенной?

Последователем Коперника был и выдающийся итальянский ученый Галилео Галилей (1564–1642). Галилей оказал мощное влияние на науку своего времени – физику, механику, астрономию, философию и математику. Сочетая в себе, как и многие представители естественной науки того времени, гений теоретика и инженерную умелость, Галилей изобрел и самостоятельно изготовил телескоп-рефрактор с 32-кратным увеличением.



*Рис. 2. Телескоп Галилея*

Телескоп Галилея продемонстрировал тесную связь между применяемой наукой техникой и научной теорией в естествознании. Новый прибор для наблюдения небесных тел произвел настоящую революцию в космогонии и космологии – получены факты, подтверждающие гелиоцентрическое учение Коперника, разрушена существовавшая более двух тысячелетий концепция Аристотеля о системе идеальных небесных сфер, которую образуют движущиеся вокруг Земли планеты и замыкает «сфера неподвижных звезд».



*Рис. 3. Идеальные сферы Аристотеля*

Кроме того, Галилей установил великое множество звезд и их огромную удаленность от Земли, обнаружил четыре спутника Юпитера, горы и кратеры на Луне.

Однако до появления объективного фактора – промышленной революции (рубеж XVIII–XIX веков для наиболее развитых европейских государств) все эти открытия, хотя и стали основой многих фантастических представлений о возможности космических путешествий, но не могли подтолкнуть к планированию производства космической техники.

В эпоху промышленной революции (XVIII–XIX века) в Европе происходит всё возрастающая индустриализация производства и на этой основе – переход к капиталистическим производственным отношениям, усиление роли науки в техническом прогрессе. Усиление влияния науки в данный период показывает, что становление объективных предпосылок технического прогресса стимулирует и развитие субъективных предпосылок этого процесса.

В XVIII–XIX веках научные открытия и изобретения стали систематически использоваться в материальном производстве [6].

К середине XX века ситуация вновь радикально меняется – научные открытия стали определять развитие новой техники, в том числе и техники научного поиска. Наступила эпоха научно-технической революции. Открытие закономерностей микромира привело к созданию электронной промышленности, электронного микроскопа, синхрофазотрона, компьютера, сети Интернет, различной «цифровой» техники. Без всего этого немыслимо и создание ракетно-космической техники, появление космической деятельности.

Не секрет, что с момента возникновения классового общества и государства основные производительные силы всё больше направлялись на служение привилегированному классу и на производство военной техники. Почти все основные открытия и изобретения науки вначале «апробировались» в разработке и производстве нового, более совершенного оружия. Не миновало эта закономерность и космическую технику.

Первая в мире баллистическая ракета дальнего действия «Фау-2» была разработана немецким конструктором Вернером фон Брауном и принята на вооружение вермахта в конце Второй мировой войны. Главари «III рейха» называли эту ракету «оружием возмездия». Но до производства атомной бомбы даже такое мощное средство доставки не могло сломать ход событий в войне, не смогло вырвать у нас нашу Победу. Боевые пуски «Фау-2» применялись с целью запугивания, поражая в основном мирное население Великобритании (преимущественно – Лондона). Вместе с тем «Фау-2» стала первым в истории объектом, совершившим в 1944 году суборбитальный космический полет, достигнув при вертикальном запуске высоты 188 км. После Второй мировой войны «Фау-2» явилась прототипом разработки первых баллистических ракет в США, СССР и других странах.

Объективной предпосылкой всех этих разработок явилось мощное развитие производительных сил общества, техники как важнейшей составляющей этих сил. Формой бытия производительных сил являются производственные отношения, в которых главным является отношение собственности на средства производства. Отставание производственных отношений от развития производительных сил является, по Марксу, причиной социальной революции, в ходе которой производственные отношения меняются в сторону наибольшего соответствия потребностям развития производительных сил. При этом на различных этапах развития общественных производительных сил частная собственность на средства производства то доминирует над государственной, то уступает ей первенство в производственных отношениях.

Доминирование частной собственности сопровождается приоритетом рыночной экономики. До определенного уровня развития производительных сил рынок способствует развитию производства. Но в развитом индустриальном обществе рыночная экономика начинает тормозить развитие производительных сил. Почему? И как это связано с рассматриваемой проблемой соотношения объективных и субъективных факторов в развитии космической техники?

То, что на определенной ступени развития производительных сил рыночная экономика как форма бытия частной собственности начинает тормозить развитие всего материального

и духовного производства, впервые блестяще показал К. Маркс в своем знаменитом «Капитале».

Любопытно, что подобные мысли высказывает и виднейший экономист-теоретик XX века, один из авторов концепции «индустриального общества» Джон Кеннет Гэлбрейт (1908–2006), которого трудно представить как марксиста. В своем главном труде «Новое индустриальное общество» (1967) Джон Гэлбрейт пишет, что материальное производство второй половины XX века не может полагаться на рынок, всё в нем должно быть тщательно спланировано и рассчитано [7].

В своеобразном духовном завещании, последней своей работе, «Экономика невинного обмана: правда нашего времени» (2004) Джон Гэлбрейт убедительно доказывает, что величайшим заблуждением является либеральное представление о том, что критерием социального прогресса является рост ВВП. Наука и искусство Нового времени достигли высочайших вершин в творчестве именно потому, что они не зависели от искусства продаж и управления потребительским спросом. В XX веке особенно показательна деградация творчества в модернизме и постмодернизме в связи с тем, что художники ориентируются на потребительский спрос, на прибыль, как и во всем капиталистическом производстве [8]. Но главным заблуждением либерального миропонимания является вера в рыночную экономику, которая способна автоматически регулировать экономику и управлять ею и всей общественной жизнью. Всё дело в том, что «никто ничего не сможет продать, если не будет управлять потребительским спросом» [9].

На проходившем 27 марта 2017 года III Санкт-Петербургском международном экономическом конгрессе «Форсайт «Россия»: Новое индустриальное общество. Перегрузка» выступал сын Джона Гэлбрейта – Джеймс Гэлбрейт (профессор Университета Техаса). В его выступлении прозвучали гораздо более жесткие формулировки. Опираясь на идеи отца, Джеймс Гэлбрейт предложил освободить экономику от «жирных котлов» – олигархов и банкиров, которые паразитируют на достижениях техники информационного общества, тормозя его развитие и заботясь только о своей прибыли – прибыли ростовщиков» [10].

Практическим подтверждением учения об определяющей роли производственных отношений в плане развития производительных сил является развитие космической деятельности в СССР. Наше первенство в освоении космоса было обеспечено осуществленной в СССР индустриализацией производства (на основе государственной формы собственности) вместе с коллективизацией сельского хозяйства.

Проведенная в исторически короткие сроки (в 30–40-е годы прошлого столетия) индустриализация, была связана с запуском в СССР девяти тысяч промышленных предприятий. В результате Советский Союз занял первое место в Европе и второе в мире по объему выпускаемой промышленной продукции. Но этого бы не случилось, если бы в тот же период не произошла не менее грандиозная по своим масштабам и результатам коллективизация сельского хозяйства. Коллективизация позволила ликвидировать голод, а индустриализация – экономическую разруху как последствия Первой мировой и Гражданской войны. Достаточно сказать, что заготовка зерна увеличилась более чем вдвое, а бюджет государства значительно пополнился за счет налогов с образовавшихся и укрепившихся колхозов. Эти достижения были объективным фактором, позволившим не только победить фашистскую Германию и ее сателлитов в ходе Великой Отечественной войны 1941–1945 годов, но и создать материальную базу для восстановления разрушенного в ходе войны народного хозяйства. Данные экономические успехи явились также объективной предпосылкой для строительства ракетно-космической техники, развертывания в СССР космической и военно-космической деятельности.

Субъективной предпосылкой всех успехов в экономике и политике стала проведенная в СССР всего за 20 предвоенных лет культурная революция. Культурная революция имела следующие цели.

1. Ликвидация неграмотности.

С 26 декабря 1919 года до начала 1940-х годов с безграмотностью населения было покончено. СССР стал страной всеобщей грамотности, около 40% представителей прежних социальных низов получили специальное образование на «рабфаках» – рабочих факультетах при институтах и университетах, они поступили без экзаменов в эти вузы и успешно их закончили. Рабочие факультеты сыграли важную роль в деле подготовки высокообразованных кадров на заре становления молодого советского государства, явились тем субъективным фактором, который послужил становлению промышленности нашей страны, подготовке нового поколения ученых, многие из которых трудились потом в сфере производства космической техники.

2. Создание социалистической системы народного просвещения и образования, формирование советской интеллигенции.

В СССР была создана система образования, не признающая ни классовых, ни национальных, ни половых, ни каких-либо иных различий при приеме в средние и высшие учебные заведения системы народного образования.

В капиталистических государствах, где население разделено на правящую элиту, владеющую средствами производства и политической властью, и эксплуатируемое ею трудовое население, система образования разделена на две неравные части – учебные заведения для детей элиты и для основного населения. Такое разделение может быть не закреплено законодательно, но поддерживается высокой стоимостью обучения в элитных школах и вузах. Так, например, стоимость обучения в одном из самых престижных университетов Европы – в Оксфорде, в зависимости от факультета, колеблется от шести с половиной до шестнадцати тысяч фунтов стерлингов в год, плюс плата за проживание и обслуживание, которая составляет около восьми тысяч, материальное обеспечение – 5–6 тысяч фунтов в год. А вскоре после восстановления разрушенного войной народного хозяйства система образования в СССР была по праву признана одной из лучших в мире.

На сегодняшний день в нашей стране после проведенной коммерциализации образования многие представители социальных низов не имеют возможности получить высшее образование по выбранной специальности. Конкурс умов зачастую подменяется конкурсом кошельков.

3. Развитие науки, литературы и искусства, борьба с антинаучным мировоззрением.

Передовое производство немислимо без передовой науки. Особенно в эпоху научно-технической революции. Понимая это, молодое советское государство не жалело средств на развитие всех отраслей науки – от фундаментальной до прикладной. Только перечисление всех научных достижений СССР, выдающихся ученых, академиков, лауреатов Государственных и даже Нобелевских премий заняло бы несколько страниц. Сомневающимся в успехах советской науки можно указать на принятый в философии критерий истины – практику.

Успешное достижение сложнейших целей, поставленных вскоре после победы в Гражданской войне, определило и нашу Победу в Великой Отечественной войне, и послевоенную победу в освоении космоса. Президент США Д. Кеннеди отмечал, что «СССР выиграл космическую гонку за школьной партой».

Сказанное позволяет заключить, что все наши успехи в области индустриализации, коллективизации, в области образования и науки и в области освоения космоса объективно были определены полным приоритетом государственной (правда, ее во всех конституциях СССР неправомерно отождествляли с общенародной) собственности на средства производства.

В системе рыночных экономических отношений невозможно планирование (тем более – долгосрочное) деятельности государства. Стихия рынка создает в управлении государством ситуацию, хорошо описанную в басне И. А. Крылова «Лебедь, Щука и Рак». Эти персонажи, взявшиеся везти воз, тащили его, как известно, в соответствии со своими предпочтениями в разные стороны. Результат – «воз и ныне там». Когда усилия «товарищей» велики, «воз»

разрывается, что мы нередко наблюдаем в обществе сегодня (распад СССР, деструктивные процессы во многих странах).

Но вернемся к достижениям в развитии космической техники. Именно в годы «великого перелома» – годы индустриализации и культурной революции – оживляются исследования в области создания космической техники.

В СССР при опоре на разработки Константина Эдуардовича Циолковского (1857–1935) разворачиваются работы по созданию ракетной техники. Начало было положено в 1921 году в Газодинамической лаборатории (ГДЛ), ее основатель – Н. И. Тихомиров (1859–1930), и в Группе изучения реактивного движения (ГИРД) под руководством С. П. Королёва (1907–1966). Первые испытания ракетных двигателей В. П. Глушко были проведены в 1929-м (ЭРД) и в 1931-м (ЖРД). Первые пуски ракет конструкции М. К. Тихонравова (1900–1974) и Ф. А. Цандера (1887–1933) произведены в 1933 году. В 1933 году на базе ГДЛ и ГИРД был создан Реактивный научно-исследовательский институт (РНИИ), его начальником назначен И. Т. Клейменов (1898–1938), заместителем – С. П. Королёв. В 1946 году принимается правительственное постановление о создании ракетостроительной промышленности. В это же время полным ходом идут разработки отечественного ядерного оружия. Необходимо было ответить на вызов США, совершивших в конце Второй мировой войны бесчеловечный акт – атомную бомбардировку мирных жителей японских городов Хиросима и Нагасаки. Общее количество погибших составило от 90 до 166 тысяч человек в Хиросиме и от 60 до 80 тысяч человек – в Нагасаки. Бомбардировка не была обусловлена какой-либо военной необходимостью и явилась актом устрашения всего мира и в первую очередь «союзника» Америки – СССР.

И опять же, благодаря централизации управления наукой и производством (субъективный фактор), за несколько лет удалось не только создать свою атомную бомбу, но и произвести баллистическую ракету собственной разработки, тактико-технические данные которой значительно превышали эти же данные аналогичных ракет США.

4 октября 1957 года в СССР был запущен первый в мире искусственный спутник Земли. Это знаменовало не только нашу победу в космической гонке, но и начало новых международных отношений и новой политики. Страны НАТО сразу же отказались от программы термоядерного удара по СССР, раскрытой в фултонской речи У. Черчилля.

12 апреля 1961 года Юрий Алексеевич Гагарин стал первым человеком, побывавшим в космосе. Ракета Гагарина за 1 час 48 минут сделала только один оборот вокруг Земли, но это малое количество времени революционно определило новое качество в освоении космоса. Приоритеты в разработке и эксплуатации космической техники, в космической деятельности были за нашей страной вплоть до разрушения СССР в 1991 году.

В результате развала Советского Союза, перехода к «рыночной экономике» были разрушены многие заводы и фабрики, ликвидированы научно-исследовательские институты. Резко снизилась и космическая деятельность России. После разорения народного хозяйства строить новую космическую технику было не на что и даже негде. Многие предприятия и организации оборонно-промышленного комплекса прекратили свое существование или были подвергнуты конверсии – начали выпускать «ширпотреб». На космодроме Плесецк существенно сократились пуски ракет по программе испытаний боевых ракетных комплексов и запуски космических аппаратов. В так называемые «лихие 90-е», после развала СССР, Россия была пущена под откос «демократическими» реформами в экономике, связанными с «шоковой терапией» по Е. Гайдару. Была произведена деиндустриализация, в результате которой гиганты индустрии были приватизированы – куплены по цене, в тысячу раз меньшей себестоимости, и обанкрочены. На месте предприятий создавались гипермаркеты, в которых торговали западными и восточными товарами. Сказанное – ярчайший пример отрицательного действия субъективного на объективное, идеального на материальное.

Стихия рынка поглотила и многие предприятия оборонно-промышленного комплекса, в том числе и космической отрасли. Был развален КБ и завод «Арсенал» имени М. В. Фрун-

зе, едва удержался, но многие годы влачил жалкое существование Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева.

Однако события, которые стали происходить с мая 2000 года, когда к управлению страной пришел Президент В. В. Путин, внушают оптимизм и в отношении перспектив экономического развития России, и в отношении укрепления обороноспособности страны. Последнее немыслимо без развития ракетно-космической техники.

На сегодняшний день Российская Федерация успешно осуществляет пилотируемые запуски в космическое пространство. Российская орбитальная группировка имеет в своем составе спутники системы глобального позиционирования «Глонасс», а также специальную технику и аппаратуру – спутники глобальной системы радиотехнической разведки «Лиана» и космический радиотелескоп «Радиоастрон». Это не считая десятков других действующих космических аппаратов: спутников связи, разведчиков, ретрансляторов, научных аппаратов.

3 февраля 2007 года Президент Российской Федерации В. В. Путин подписал указ № 127 «О федеральном государственном унитарном предприятии «Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева». В соответствии с указом к ФГУП «ГКНПЦ имени М. В. Хруничева» присоединяются четыре федеральных государственных унитарных предприятия ракетно-космической промышленности: «Воронежский механический завод», «Конструкторское бюро химического машиностроения имени А. М. Исаева» (г. Королёв Московской области), «Московское предприятие по комплектованию оборудования «Длина», «Производственное объединение «Полет» (г. Омск).

ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева» ([www.khrunichev.ru](http://www.khrunichev.ru)) является базовым предприятием ракетно-космической промышленности, обеспечивающим в соответствии с федеральными программами России создание, серийное производство и эксплуатацию ракет-носителей легкого и тяжелого классов, разработку и создание космических аппаратов (космических систем) дистанционного зондирования Земли и связи, создание и изготовление космических модулей пилотируемых станций.

Сравнительно недавно поставлены на вооружение С-500, относящиеся к новому поколению ЗРС «земля-воздух» и представляющие собой универсальный комплекс дальнего действия и высотного перехвата с повышенным потенциалом противоракетной обороны. Радиус поражения – до 600 километров.

Развертывание специальной военной операции, в которой Вооруженным силам Российской Федерации приходится сталкиваться со всеми новинками военной техники коллективного Запада, потребовало провести крупную модернизацию имеющейся ракетной техники, а также разработку и внедрение новейшей ракетной техники. В частности, использование противником авианесущих и ракетонесущих кораблей и подводных лодок потребовало создания таких новинок, как гиперзвуковая ракета «Циркон», способной с особой скоростью (9800 км/ч) и точностью поражать как морские, так и наземные цели на удалении до 1000 км. В этом «Циркон» существенно превосходит скоростные возможности американского ЗРК последней разработки, поставляемого уже на Украину *Patriot PAC-3* (5500 км/ч), что делает «Циркон» неуязвимым [11]. Кроме того, военной авиацией РФ успешно применяется сегодня модификация крылатой ракеты

Х-55 – ракета Х555 с дальность полета до 2,5 тысяч километров. На вооружение наших самолетов дальней авиации поступила новейшая крылатая ракета Х-32, также неуязвимая для средств ПВО противника. За пределами возможностей самых современных противоракетных систем Запада находится и стратегическая ракета Х-101 с дальность полета до 5 тысяч километров. Не вызывает сомнений, что успехи Российской Федерации в разработке и применении новейшей ракетной техники основываются на достижениях разработанной в СССР космической техники.

Подводя итог сказанному, еще раз отметим, что главной объективной детерминантой становления ракетно-космической техники является развитие материального производства, в то

время как субъективным фактором этого процесса выступает развитие целенаправленного управления научно-техническим и социальным прогрессом, науки и образования. При этом абсолютизация роли объективного фактора ведет к фатализму, а абсолютизация субъективного – к волюнтаризму.

### Список используемых источников

1. *Аристотель* Метафизика // Антология мировой философии : в 4 т. – М. : Мысль, 1969. – Т. 1. – С. 415.
2. *Марк Туллий Цицерон* О природе богов. Кн. 2, т. LXI. (153). – URL: [jarilo.ru/narod/cicero/nat2.html](http://jarilo.ru/narod/cicero/nat2.html) (дата обращения: 12.06.2023).
3. *Коперник Н.* О вращениях небесных сфер. – М., 1964. – 553 с.
4. *Энгельс Ф.* Диалектика природы // *Маркс К. и Энгельс Ф.* Соч. – Изд. 2-е. – Т. 20. – 356 с.
5. *Бруно Дж.* О бесконечности, Вселенной и мирах // *Бруно Дж.* Философские диалоги. – М. : Алетейа; Новый Акрополь, 2000. – 274 с.
6. *Маркс К.* Экономическая рукопись 1861–1863 годов // *Маркс К. и Энгельс Ф.* Соч. – Изд. 2-е. – Т. 47. – 256 с.
7. *Гэлбрейт Дж.* Новое индустриальное общество. – М.-СПб., 2004. – С. 48.
8. *Гэлбрейт Дж.* Экономика невинного обмана: правда нашего времени. – М. : изд-во «Европа», 2009. – С. 32
9. Там же. – С. 30.
10. *Гэлбрейт Дж.-К.* Государство хищника и отравленная чаша: размышления о политике и экономике в Америке и Европе. – СПб. : СПбГУП, 2017. – С. 23
11. *Макаров Ю. Н., Хрусталева Е. Ю.* Финансово-экономический анализ ракетно-космической промышленности России // Аудит и финансовый анализ. – 2010. – № 2. – С. 145–155.

Н. А. Репях,  
*кандидат философских наук, доцент;*  
А. Н. Хрустова

## **СУДЬБА И ТВОРЧЕСТВО ОТЕЧЕСТВЕННОГО ФИЛОСОФА-КОСМИСТА НИКОЛАЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА СЕТНИЦКОГО**

В статье рассматриваются основные вехи жизни известного отечественного философа-космиста, экономиста, статистика Николая Александровича Сетницкого, представлена характеристика его полемики с концепцией известного русского философа П. И. Новгородцева по вопросам сущности общественного идеала и путях его достижения. Дана оценка его вклада в разработку и пропаганду идей философии общего дела, основателем которой был Н. Ф. Федоров.

Ключевые слова: идеал, социальный идеал, «утопии социализма и анархизма», идеал «бесконечного совершенствования», идеал «конечного совершенствования», нравственный идеал, конечная цель, стадии осуществления идеала, «дробные идеалы», христоролюбивое воинство, христианство и война, насилие, прогресс науки и техники, будущее человечества.

Философия русского космизма как разноплановое, многовариантное и исключительно оригинальное явление в мировой философской мысли представлена различными идейно-теоретическими течениями, школами, философами. Концепции, взгляды многих отечественных космистов были достаточно глубоко исследованы, их имена известны не только современникам, но и сегодня их труды вызывают восторженные отзывы и превосходные оценки за нестандартность и смелость мышления, всестороннее обоснование путей и способов решения различных аспектов взаимодействия Человека и Космоса, предвидение будущего человечества и т. д. В настоящее время не только людям, профессионально занимающимся философской тематикой, но и многим нашим соотечественникам известны такие имена, как Н. Ф. Федоров, А. Л. Чижевский, В. Ф. Одоевский, А. В. Сухово-Кобылин, К. Э. Циолковский, В. И. Вернадский и многие другие философы-космисты.

Вместе с тем, к глубокому сожалению, сохранилось еще достаточно много представителей философии русского космизма, чьи имена мало известны широким слоям российского общества. Их труды, философские взгляды не получили настоящего признания и недостаточно оценены исследователями. По мнению авторов, нуждается в восстановлении доброй памяти и в более глубоком изучении, достойной оценке творчество советского философа-космиста Николая Александровича Сетницкого (1888–1937).

Ученый с мировым именем, экономист, статистик, философ-космист Н. А. Сетницкий родился 12 декабря 1888 года в г. Ольгополе Волынской губернии в семье чиновника. После окончания гимназии поступил на отделение восточных языков Петербургского университета, а после первого курса перевелся на юридический факультет, при этом три семестра учился на физико-математическом. Полученное образование способствовало формированию у Н. А. Сетницкого стремления к целостности знания, что в полной мере сказалось на его научном творчестве.

После окончания университета к 1917 году начинается одесский период жизни Н. А. Сетницкого – начало его творческой биографии. Он примечателен не только знакомством с членами кружка ХЛАМ (в него входят художники, литераторы, артисты и музыканты), но и началом ставшей в определенной степени судьбоносной дружбы с Александром Константиновичем Горским. Именно с этого периода, после знакомства с идеями Николая Федоровича Федорова, Н. А. Сетницкий становится убежденным сторонником его «философии общего дела», продолжателем дела духовного учителя. Он принят на работу в Одесский универси-

тет, издается его первая работа гуманитарного содержания «Статистика, литература и поэзия».

С 1923 по 1924 год Н. А. Сетницкий работает в отделе торговли ВСНХ, затем в течение двух лет – в Комиссариате почт и телеграфов. С 1925 года начинается харбинский период в жизни и творчестве Николая Александровича, который длится почти десять лет. Он работает в экономическом бюро КВЖД, преподает на Харбинском юридическом факультете и в Харбинском Политехническом институте [3]. Именно в это время проявился талант Н. А. Сетницкого как ученого в области философии, истории и этики. За этот период увидели свет 49 публикаций ученого по экономике (издания «Вестник Манчжурии», «Экономический бюллетень КВЖД»). Он ведет активную переписку со многими отечественными философами, среди которых Н. А. Бердяев, Н. О. Лосский. Чаще всего Н. А. Сетницкий подписывает свои работы инициалами либо псевдонимами («Узелков», «Кононов», «Коновалов»).

Работая в Харбине, Н. А. Сетницкий неустанно продолжает дело всей своей жизни – разработку и популяризацию идей основоположника философии русского космизма Н. Ф. Федорова. На личные средства вместе с А. К. Горским они издают первый том «Философии общего дела»; позже Н. А. Сетницкий составляет и издает второй выпуск «Вселенского дела». По инициативе Сетницкого издаются многие работы Горского о Н. Ф. Федорове, Ф. М. Достоевском.

В 1926 году в Харбине издается совместно подготовленный с А. К. Горским труд «Смерт-обожничество». После возвращения из Манчжурии Н. А. Сетницкий работал в Комиссии по эвакуации, а затем в Плановом отделе Московской Казанской железной дороги. Начиная с 1936 года и вплоть до ареста Н. А. Сетницкий работает в должности старшего научного сотрудника Института мирового хозяйства и мировой политики. Именно в это время в числе других сотрудников КВЖД («харбинцев»), а таких более 25 тысяч, Н. А. Сетницкий в 1935 году попадает в поле зрения органов НКВД. Он подозревается в том, что якобы преподавал в «белоземлягских» учебных заведениях, общался с бывшими деятелями колчаковского правительства, японскими агентами. В 1937 году Николай Александрович получает повестку явиться в НКВД, где ему предъявляется обвинение – «измена Родине».

В следственном деле Н. А. Сетницкого оформлен только один протокол допроса, хотя его допрашивали восемь раз, общей продолжительностью 57 часов (некоторые допросы продолжались в течение 17 часов без перерыва). Через два месяца объявляется приговор – к «высшей мере уголовного наказания», который был приведен в исполнение 4 ноября 1937 года. Похоронен Н. А. Сетницкий в братской могиле на Донском кладбище в Москве.

Репрессиям были подвергнуты близкие Н. А. Сетницкого. В декабре арестовали жену Ольгу Ивановну. Приговор как «члену семьи изменника Родины» был вынесен автоматически – восемь лет исправтрудлагеря. И только в 1956 году Николай Александрович и Ольга Ивановна были реабилитированы.

Последовательному приверженцу идей Николая Федоровича Федорова, Н. А. Сетницкому во всем – и в жизни, и в науке – было присуще, как и его учителю, стремление к «вечному идеалу». Этот смысложизненный ориентир всегда изначально выступал как та «высшая цель», ради которой, считал Н. А. Сетницкий, следует мыслить, творить, жить, в конце концов. По-федоровски, как известно, это называлось «общим делом» [5]. Ради этого, убежден Н. А. Сетницкий, можно страдать, терпеть все жизненные невзгоды, воспринимая удары судьбы как проверку на прочность. И не только можно, а и должно.

Свой интерес к проблеме социального идеала Н. А. Сетницкий объясняет прежде всего сложностью и противоречивостью как его содержания, так и достижения. А ведь это напрямую связано с определением смысложизненных для общества вопросов – цели, направленности, основных задач и в целом самого социального развития. В деловой жизни общества, отмечает Н. А. Сетницкий, наметился кризис, так как существующие анархические и социалистические идеалы уже не в состоянии удовлетворить широкие «мыслящие круги». Актуальной стала задача не только глубокого анализа указанных теорий, но и обоснования путей

и средств выхода из создавшегося кризиса. Требуется, по мнению Н. А. Сетницкого, напряженная работа по выдвиганию и обоснованию новых идеалов и путей их достижения [2].

Наиболее ярко теоретические взгляды Н. А. Сетницкого представлены в работе «О конечном идеале», особенно – в первой главе и ее вводной части «Об идеале». Опубликованная работа вызвала широкий резонанс в философских кругах. Так, Н. А. Бердяев назвал ее значительным явлением и наиболее интересным в «федоровской литературе», шагом вперед в христианском учении «об активном признании человека». Всего известно несколько вариантов текста указанной главы. Авторы статьи обратились к тому из них, который является документом из архива дочери Николая Александровича – Е. Н. Берковской. Именно здесь наиболее четко, на наш взгляд, формулирует свои взгляды ученый, используя полемику с достаточно известным отечественным философом П. И. Новгородцевым. Еще студентом в 1912–1913 годах Н. А. Сетницкий познакомился с работами П. И. Новгородцева. И уже тогда у него зародилась идея написать свою собственную работу.

Павел Иванович Новгородцев – видный общественный деятель России конца XIX–начала XX веков. Прежде всего, он известен как один из первых исследователей марксистской теории в истории отечественной философской мысли. А в 1902 году П. И. Новгородцев стал организатором и редактором сборника статей «Проблемы идеализма», ставшего своеобразным манифестом нового направления в русской философии и названного им «системой направленного идеализма». Непосредственные участники и, в определенной степени, последователи П. И. Новгородцева – это достаточно известные русские философы: Г. В. Флоровский, И. А. Ильин, Б. П. Вышеславцев, С. Л. Франк, С. И. Гессен.

Главным философским трудом П. И. Новгородцева считается работа «Об общественном идеале». По замыслу ее автора она должна была стать первым томом трилогии и посвящалась критическому анализу философско-правовых аспектов марксизма. При этом собственно свою положительную теорию, П. И. Новгородцев намеревался изложить в третьем томе.

Обращаясь к произведению П. И. Новгородцева, Н. А. Сетницкий называет его «паразитической книгой» и признает бесспорные достоинства научного труда. Главным из них он справедливо называет основательную проработку значительного по объему теоретического материала, в особенности «тонкую оценку современных учений об идеале». Особую популярность, по мнению Н. А. Сетницкого, работа П. И. Новгородцева приобрела благодаря «погружению» концепций анархизма и социализма в реальную общественную практику. Признавая эти концепции «единственно корректными и формально безукоризненными построениями» в этой области, Н. А. Сетницкий подвергает, как и П. И. Новгородцев в своей работе, «утопии социализма и анархизма» критике.

По мнению П. И. Новгородцева, в обществе наблюдается глубокий кризис политических и общественных идей. Этот кризис обостряется и находит свое проявление не только в крушении старых верований, но и в отношении неизвестных ранее укладов новой жизни, о которых «говорят социализм и анархизм». Общий смысл и значение данного кризиса философ выразил в формуле «крушение идеи земного рая», а выходом из этого кризиса видел «неизбежную замену конечного совершенства началом бесконечного совершенствования». Естественное многообразие и конкретная сложность жизни, пишет П. И. Новгородцев, не могут быть замыслены никакими упрощениями отвлеченной мысли. Жизнь выше теории, наставляет он. И к такому заключению должны прийти в конечном счете и идеи социализма, как и «всякая социально-политическая система, стремящаяся стать учеником жизни».

По сути дела, в полемике с указанными выводами Новгородцева и выстраивает свою систему контраргументов Н. А. Сетницкий. Прежде всего, он отмечает, что, несмотря на подвергаемые критике П. И. Новгородцевым реально существующие внутренние противоречия «утопий социализма и анархизма», идеалы этих доктрин, убежден Н. А. Сетницкий, остаются господствующими в современном европейском сознании [1]. И в целом Н. А. Сетницкий считает, что, несмотря на популярность книги П. И. Новгородцева, она до конца не решила задачу серьезного переосмысления в сознании людей идеалов социализма и анархизма.

В сущности речь идет о принципиальной отрицании этих идеалов. Их реализация – дело времени, и в сознании человека, живущего в начале XX века, утверждает Н. А. Сетницкий, либо уже сформировался идеал, называемый П. И. Новгородцевым «верой в возможность земного рая», либо можно признавать его полное отсутствие. Но вакуума в решении этой проблемы быть не может. Вот тогда и приходит время появления «индивидуальных и коллективных эгоизмов». Что это? В качестве примера крайней формы такого эгоизма Н. А. Сетницкий называет фашизм.

Н. А. Сетницкий указывает на то, что П. И. Новгородцев отрицает не значение идеалов «утопий социализма и анархизма», а их актуальность, реальность осуществления в наличное время. Возможность, видимо, ожидается в будущем. По мнению авторов настоящей статьи, для понимания точки зрения Н. А. Сетницкого целесообразно более детально рассмотреть позицию самого П. И. Новгородцева. Как уже отмечалось, философ считает, что в сознании обобщенного европейца конца второго тысячелетия существует либо идеал, называемый «верой в возможность земного рая», либо отсутствие такового. Существуют ли реальные возможности, задается вопросом П. И. Новгородцев, достижения царства Божия как христианского идеала? Нет, считает он, так как между идеалом и наличной действительностью – глубокая пропасть. Более того, философ убежден, что ход логического развития социализма и следующего с неизбежностью за ним анархизма одинаков. У них не только нет силы совершить переворот в мире, но нет и «возможности закончить собственные свои построения без глубоких внутренних противоречий». Да, они могут быть, считает П. И. Новгородцев, внутренне привлекательны для широких масс, могут влиять на них, но в итоге в своем реальном воплощении обнаруживают «свою недостаточность».

П. И. Новгородцев считает, что идеал, сформировавшийся в XVIII и XIX веках, якобы построен на определенных исходных позициях. Во-первых, человечество либо его избранная часть уже находится очень близко к заветной цели. Во-вторых, можно с уверенностью говорить о существовании идеальной концепции ее достижения. Но в конце XIX века, считает философ, это («земной рай») не только практически нереализуемо, но и вообще должно быть «снято с очереди».

Куда же должна быть направлена общественная энергия и что в этом случае должно выступить в качестве общественного идеала? По Новгородцеву на смену идеи конечного совершенства должна прийти идея «бесконечного совершенствования». Другими словами, идея «веры в земной рай» должна уступить место вере в «человеческое действие и нравственное должностное». А бесконечное развитие личности как новый идеал выражается у Новгородцева в стремлении «не переставать верить и стремиться». Вместе с тем сам философ понимает и то, что указанный идеал становится абстрактным, теряет конкретные очертания.

Не ограничиваясь одной лишь критикой концепции П. И. Новгородцева, Н. А. Сетницкий представляет свое понимание идеала. Он задается вопросом: если считать несостоятельной идею, признающую «веру в возможность земного рая», то что может или должно стать новым идеалом? Если у П. И. Новгородцева по сути дела исчезает даже смысл вопроса «о конечной цели», то таким образом обесмысливается и само действие. Цель есть «необходимый элемент акта, и цель не в неопределенной и отвлеченной формулировке, а в смысле конкретного предела, т. е. определенной задачи» [4], утверждает Н. А. Сетницкий. Он отмечает, что и сам П. И. Новгородцев осознает, к чему может привести «обесмысливание идеала». Поэтому пытается заменить целеустремленность не конкретной целью, а процессом смены форм, усложнением целей.

Н. А. Сетницкий образно представляет «новый идеал» через сравнение с описанными в древних мифах сизифовой работой и пыткой Тантала. И в первом, и во втором случае выражена дурная бесконечность. Казалось бы, у Тантала всякий раз совершенствуется восприятие, ловкость, а Сизиф каждый раз все быстрее вкатывает на гору все большую тяжесть. Но неизменно это заканчивается одним и тем же результатом. Еще более убедителен пример

Н. А. Сетницкого по поводу усложнения целей. Он приводит пример работы архитектора, бесконечно достраивающего и перестраивающего здание, но так и не достигающего совершенства. Такой вот итог «усложнения целей».

Исследуя предпосылки, на которых строятся оба идеала, Н. А. Сетницкий приходит к следующим выводам.

1. Суть первого идеала – в определении идеала «земного рая», что предполагает осознание, понимание конечного совершенства и ориентацию человеческой деятельности на преобразование мира и в конечном итоге практическое достижение идеала.

2. Второй вывод связан с идеей «бесконечного совершенствования». Человеческая мысль, по мнению Н. А. Сетницкого, направленная на усложнение целей, «раздроблена» и не способна поэтому что-либо конкретное создать. В самой же действительности заложена потенция воплощения идеала, мощь и сила его достижения. Цель не как горизонт, который удаляется в бесконечность и реально не достижим. Уже этим, подчеркивает Н. А. Сетницкий, признается «принципиальное бессилие человека [4]. Причем не только мысли человека, но и действия, которые бессильны, слабы и недостаточны.

Оба идеала, таким образом, однозначно противоположны по своей основе. Один построен на признании потенциального могущества человека, а другой – его принципиального бессилия.

Н. А. Сетницкий не принимает позиции П. И. Новгородцева и считает, что предлагаемый им идеал (в любом варианте) не имеет конечной цели. При этом П. И. Новгородцев, призывая идти к «высшей цели», конкретно не указывает ее. Предположить, что под ней понимается можно, считает Н. А. Сетницкий, если исследовать решение П. И. Новгородцевым проблемы абсолютного идеала.

П. И. Новгородцев считал утопичными существовавшие ранее представления об абсолютном идеале и возможности его достижения. Эта критика была главным образом направлена на требования «коренного и всецелого преобразования». Но вот теоретические построения самого П. И. Новгородцева, считал Н. А. Сетницкий, приводят к признанию и бессилия человеческой мысли в определении абсолютного идеала, и невозможности практического достижения хоть каких-нибудь конкретных пределов границ этого направления. Такое понимание П. И. Новгородцевым абсолютного идеала и бесконечности его достижения, убежден Н. А. Сетницкий, ведет к формированию трагических умонастроений личности и даже к ее раздвоению. Указанный трагизм пронизывает и нравственное сознание, где с особой силой проявляется не только раздвоение, но и глубокое противоречие между безусловным идеалом и временными рамками его достижения.

Н. А. Сетницкий приходит к ряду выводов. Прежде всего, пишет он, попытки подвергать критике идеалы, связанные с утопиями земного рая, невозможны. Причем это касается идеалов и анархических, и социалистических. Идеал, уверен Н. А. Сетницкий, не доказывается, а выбирается, и этот выбор однозначно осуществляется из однопорядковых явлений, процессов, предметов и т. д. [1]. Аргументация Н. А. Сетницкого по этому поводу достаточно образная и одновременно убедительная. Голодный, пишет он, будет выбирать между хлебом, мясом и плодами, а строитель – между камнем и металлом. Но вот выбирать между камнем и хлебом невозможно, так как выбор предопределен изначально заданием выбирающего. Этот выбор и выступает, по сути дела, основанием для определения критерия идеала.

Н. А. Сетницкий указывает на особую значимость идеала в жизни людей. Он выступает «крайним заданием», к которому стремится человечество и поэтому эсхатологичен. Идеал всегда конкретен. А значит, предполагает соответствующие пути достижения – конкретные и однозначные, в том числе и в выборе средств, способов и сроков реализации.

С этих позиций, пишет Н. А. Сетницкий, идеал П. И. Новгородцева как «бесконечное совершенствование» либо некорректно сформулирован (и, возможно, за этим «скрывается какой-либо другой идеал»), либо может рассматриваться средством достижения иного идеала.

Отсюда, считает Н. А. Сетницкий, следует делать вывод, что идеал «бесконечное совершенствование» принципиально противоречит идеалу «конечного совершенства».

Идеал «конечного совершенствования» или «законченного совершенства», утверждает Н. А. Сетницкий, – это идеал полноты жизни. Он описан многими, по его мнению, мыслителями прошлого. Наиболее известные из них – Ж.Ж. Руссо, И. Кант, Г. Гегель, О. Конт, Г. Спенсер, К. Маркс. Предлагаемые этими мыслителями проекты различаются, а некоторые даже принципиально противоположны. Однако, несмотря на пути реализации и конечные результаты, их достижение реально и имеет вполне завершённый характер.

А как обстоит дело с «бесконечным совершенствованием»? Наличие предпосылок мощи человеческой мысли и действия, пишет Н. А. Сетницкий, в конечном итоге все равно обеспечивает осуществление проекта «конечного совершенства». В случае «ограниченности человеческой воли и интеллекта» человечество обречено стать на путь трагического раздвоения, утраты и растраты сил и, как следствие, потери самого смысла своего существования [4]. И это тоже будет «совершённый конец». Но, как уже отмечалось ранее, с противоположным результатом.

Н. А. Сетницкий отмечает, что «критика» П. И. Новгородцевым так называемых утопий земного рая не сопровождается демонстрацией собственных исходных позиций. То, о чем он пишет, считает Сетницкий, может рассматриваться в качестве путей к идеалу. И чтобы быть убедительным, П. И. Новгородцев пытается определить его практическое значение нравственным законом. При этом необходимые аргументы он ищет в области религии, однако и здесь всячески пытается уйти от «религиозной эсхатологии».

Нельзя не согласиться с Н. А. Сетницким, который указывает на явную ограниченность влияния религии на общественную жизнь. Религиозные верования принимаются лишь частью общества. И тогда другой ее части, не разделяющей религиозного сознания, уготована, считает он, участь «практической раздвоенности и отвлеченного стремления к достижению нравственного совершенства и выполнения нравственного закона».

Отмечая пессимистические формулировки П. И. Новгородцева по поводу ответственности и бессознательности нравственного идеала (беспредельного и бесконечного), Н. А. Сетницкий указывает на важную роль такого идеала – быть движущей силой человеческой жизни. При этом он не спасает, не преобразует действительность, так как выступает побудительной силой только для части общества. Большинство же, поставленное перед дилеммой «пить – умереть» и «не пить – умереть», сделает, по Н. А. Сетницкому, однозначный выбор в пользу «пить». Более того, есть еще и многое иное, подчеркивает он, что не входит в область регулирования нравственного закона. В конце концов, Н. А. Сетницкий делает пессимистический вывод о том, к чему может привести следование нравственному закону как идеалу. Вариантом выбора, причем имеющим единственную возможность, могут стать описанные Ф. М. Достоевским в романе «Братья Карамазовы» либо провозглашение идеала Великого инквизитора, либо создание религиозного общества, «церкви, руководимой атеистами и скептиками в маске мудрецов». Таким образом, нравственность, лежащая в основе бесконечного стремления к идеалу, ведет к трагизму нравственного сознания, что практически означает отрицание нравственности. Достижение же идеала в религиозном варианте осуществимо, пишет Н. А. Сетницкий, но уже путем катастрофизма. Именно через катастрофическое перерождение в таком варианте может быть достигнуто идеальное состояние общества, считает Н. А. Сетницкий.

Сама теория катастрофизма, пишет он, построена на двух основаниях. Первое связано с неисцелимой немощью человечества, а второе – с силой божества. Катастрофа и есть столкновение пассивности человечества и активности «спасающего и карающего божества». Эта полярность и несоединимость Бога и человека, пишет Н. А. Сетницкий, необходима для того, кто отсылает к эсхатологии, отгораживая свои построения от религии и вообще рассекая и разделяя сферы мысли и действия, идеалы и действительность [4].

Завершая свою работу, Н. А. Сетницкий заключает, что ни идеал «бесконечного совершенствования», в том числе вытекающие из него «бесконечное развитие» и «обеспечение самооценности человеческой личности», ни «трагизм нравственного сознания», ни религиозные катастрофы в качестве последнего прибежища не способны выступать как общественный идеал. Необходима напряженная работа по выдвижению и обоснованию новых идеалов, вместе с тем, считает он, важной задачей становится осуществление таких идеалов.

В этом процессе Н. А. Сетницкий выделяет ряд стадий, в каждой из которых есть свои этапы. Кратко их можно представить следующим образом.

Смысл первой стадии заключается в четком и однозначном определении идеала и формировании цели действия. На начальном этапе стадии происходит определение задачи, которую предстоит решить (фиксация идеала). Второй этап связан с верификацией идеала, а на третий – с его уточнением, корректировкой.

На второй стадии происходит наполнение идеала конкретным содержанием. Третья стадия – это ориентировка, в ходе которой определяются пути достижения идеала и «умения» на них направить свою деятельность.

На четвертой стадии предстоит работа по объединению работы всех людей, достижению определенной целостности, а также концентрации сил и средств для осуществления идеала.

Отметим еще один важнейший момент, конкретизирующий понимание идеала Н. А. Сетницким, – его тезис о так называемых «дробных идеалах» [1]. Он называет четыре группы таких идеалов в следующей иерархии: теологически-религиозные; художественно-фантастические; научно-познавательные; традиционно-бытовые. Отсюда следует, что и поиск «конечного идеала» Н. А. Сетницкий видел в итоге – в христианстве. Конечная цель общества, убежден философ, заключается в достижении не «дробных идеалов», а целостного идеала, который представляет собой сплав, устранение дефектов каждого и интеграцию в единое целое.

Особый интерес у авторов статьи вызвало обращение к работе Н. А. Сетницкого «Христоролюбие и война», написанной в 1933 году. Как известно, в 1900 году была опубликована статья известного отечественного философа Владимира Сергеевича Соловьева «Три разговора о войне, прогрессе и конце всемирной истории». Ссылкой на реплику Генерала в первом «разговоре» и начинает свою статью Н. А. Сетницкий, обращаясь к этой теме. Собственно, сама реплика содержит вопрошание – существует ли христоролюбивое воинство?

Действительно, уже само словосочетание содержит внутреннее противоречие. Зло, и даже ограничение добра, не может быть благословлено церковью. Однако Н. А. Сетницкий не ограничивается обсуждением только этого вопроса, а размышляет более широко над проблемами отношения христианства к войне, взаимоотношения церкви и государства. Вопросы можно сформулировать следующим образом: как соотносятся христоролюбие и война? Противно ли насилие христианской вере? Может ли существовать христоролюбивое воинство? И может ли быть христоролюбие без воинства?

Как известно, практика – критерий истины, и это в полной мере относится к практике социальной. Н. А. Сетницкий обращается к отечественной истории, беспримерным подвигам русских воинов на поле брани, получивших благословение на бой от Пресвятого Сергия Радонежского и признанных позже святыми Дмитрия Донского, Пересвета, Осляби. И наша память всегда будет хранить их имена и беспримерные подвиги во имя защиты Отечества.

Только две цели, пишет Н. А. Сетницкий, могут оправдать насилие – это сохранение человеческой жизни и защита христианства. Исходным основанием для определения отношения к войне, по его мнению, должны выступать цели войны, воодушевление и осознание их воинством. Такой войной в защиту православия было сражение с Батыем, а таким подвигом – самопожертвование русских воинов на Куликовском поле. Это была не только защита христианства, но и человеческой жизни.

Однако и здесь, считает Н. А. Сетницкий, есть явная проблема. Современное христианство, указывает философ, тесно связано с государством. И ни одна из войн современности, убежден он, не должна получать благословение церкви [6].

Обращение к опыту прошлых войн, которые вела Россия, приводит Н. А. Сетницкого к выводу, что все больше и больше теряется «дух, цель, которая оправдывала человеческие страдания, жертвы и кровь». Так, освободительная война 1877 года, по мнению Н. А. Сетницкого, «уже всецело проникнута дыханием секуляризации». Русско-японская война охарактеризована словами солдата из рассказа В. В. Вересаева «На отдыхе» (1904), спрашивающего командира: как это он сражается «за веру, царя и отечество», когда «веры нашей никто не трогает, царя не обижает, а отечество – китайское». А в войне 1914 года, считает Н. А. Сетницкий, «воинство явно и окончательно отделилось от христолюбия» [6].

А что можно сказать о войне будущей. Войне, где на первом месте техника: аэропланы, танки, газы, бактерии. Будет ли в этой войне христолюбивое воинство, вопрошает Н. А. Сетницкий.

Вопросы жизни и смерти, утверждает Н. А. Сетницкий, стали определять «наука и воинство науки». Отсюда, он делает вывод, что нет и не может быть христолюбивого воинства в том смысле, как оно понималось В. С. Соловьевым. Оно не приспособилось к новым видам вооруженной борьбы, для него нет и не может быть благородных целей.

Н. А. Сетницкий резко отрицательно оценивает роль ученых в создании средств насилия и указывает на необходимость осознания ответственности за результаты своей научной деятельности [3]. Ученым ставят задачи, пишет он, – они их решают. А достойны или недостойны цели вооруженного насилия, им до этого нет никакого дела. Однако у науки, убежден он, всегда должны быть достойные цели. И такие цели связаны с осуществлением жизни, а не с подготовкой к смерти и убийству.

Отсюда христолюбивым воинством по Н. А. Сетницкому призвано стать воинство науки, и прежде всего химии. Ученый пишет, что воинство химиков способно проникнуть в строения вещей, выяснить тайну и природу вещества, строить и восстанавливать «качество и жизнь».

Целью науки, убежден Н. А. Сетницкий, должен стать гуманизм. Вместе с тем он критикует и гуманизм, «вознесенный и прославленный государством». Здесь Н. А. Сетницкий следует установкам своего учителя Н. Ф. Федорова, отрицавшего «достоинство самозаконного разума, формулу «человек есть мера всех вещей» [5]. Как известно, в федоровском понимании «человек», поставляющий себя гордынно над миром и одновременно как существо несовершенное, промежуточное – «не зверь, не скот», «не ангел, не дух».

В этой и других работах, как и его духовный учитель Н. Ф. Федоров, Николай Александрович Сетницкий указывает на противоречивое развитие человеческой цивилизации, которая, стремительно двигаясь по пути научно-технического прогресса, приближается к своему краху. Прогресс науки и техники, убежден философ, призван не просто давать людям «комфорт и удобства», а еще хуже – средства для борьбы человека с человеком. Его цель иная – делать все для сплочения человечества во имя своего спасения, для преодоления угрозы смерти и «всяческого распада».

### Список используемых источников

1. Берковская (Сетницкая) Е. Н. Архив Н. А. Сетницкого и А. К. Горского. Библиография // Советская библиография. – 1991. – № 4. – С. 124–135
2. Гачева Г.А. А. К. Горский, Н. А. Сетницкий – последователи А. Ф. Федорова // Начала : религиозно-философ. журн. – 1993. – № 4. – С. 90–101.
3. Макаров В. Г. Русский философ Николай Сетницкий: от КВЖД до НКВД // Вопросы философии : научно-теорет. журн. – 2004. – № 7. – С. 137–157.

4. Русский космизм : Антология философской мысли / сост.: С. Г. Семенова, А. Г. Гачева. – М. : Педагогика-Пресс, 1993. – 368 с.
5. *Репях Н. А., Хрустова А. Н.* Гуманизм космофилософских идей Н. Ф. Фёдорова // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – С. 276–281.
6. *Сетницкий Н. А.* Избранные сочинения. – М. : Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2010. – 736 с.

Ю. А. Загрутдинов<sup>1</sup>,

*кандидат технических наук;*

А. В. Казимиров<sup>2</sup>,

*кандидат технических наук, доцент;*

Е. А. Скорик<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

<sup>3</sup>Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, г. Санкт-Петербург.

## **СПОСОБ ОЦЕНИВАНИЯ МОЩНОСТИ ВЗРЫВА КОМПОНЕНТОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА НА БАЗЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА**

В статье предложена новая методика оценки мощности взрыва смеси компонентов ракетного топлива для ракет-носителей на основе сжиженного природного газа. Посредством применения уравнения электронного баланса определено стехиометрическое соотношение компонентов ракетного топлива и его теплотворная способность. Предложен коэффициент работоспособности взрыва смеси компонентов ракетного топлива по тротилу, который рассчитан методом соотношения теплотворных способностей.

Ключевые слова: авария, взрыв, сжиженный природный газ, ракета-носитель, компоненты ракетного топлива, теплотворная способность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Ракетно-космические комплексы являются настолько сложными техническими системами, что, несмотря на детальную проработку комплекса организационных и технических мероприятий, при их эксплуатации вероятность аварий остается ненулевой [1]. Аварийный взрыв (АВ) ракеты-носителя является наиболее губительным для работоспособности ракетно-космического комплекса, поэтому еще на этапе проектирования необходимо учитывать самые неблагоприятные сценарии аварийных ситуаций при подготовке и пуске ракет-носителей, в том числе и аварийный взрыв [2, 3].

Аварийные взрывы РН могут проходить по различным сценариям, но всех их объединяет следующее: сам взрыв происходит при детонации смеси компонентов ракетного топлива (КРТ), а мощность взрыва зависит от состава и количества смеси КРТ, участвующих в детонации [4]. Если значение доли участвующих в детонации КРТ напрямую зависит от того, как развивается аварийная ситуация, то тротиловый эквивалент взрыва смеси КРТ неизменен [5]. Для эксплуатируемых РН, основанных на различных КРТ, тротиловые эквиваленты АВ определены [2]. В настоящей статье представлен подход к определению тротилового эквивалента взрыва РН на базе сжиженного природного газа (СПГ), что необходимо для разработки сооружений стартовых комплексов и их размещения друг относительно друга.

### **УСЛОВНАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ГОРЮЧЕГО НА ОСНОВЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Состав сжиженного природного газа непостоянен и различается в зависимости от мест его добычи [6]. Принято под природным газом понимать исключительно метан, но для расчетов мощности взрыва КРТ необходимо учитывать вклад всех компонентов в теплоту сгорания такого топлива. Как правило, СПГ состоит в основном из метана и этана, а также содержит следы бутана и пентана, то есть газообразных гомологов метана. Для упрощения расчетов будем считать состав СПГ таким: 40% – этан и 60% – метан, потому что содержание бутана и

пентана незначительны, и, следовательно, их вклад по теплотворной способности можно компенсировать чуть большим содержанием этана.

Итак, рассмотрим вопрос получения теплового эффекта от инициации СПГ в среде жидкого кислорода, который может возникнуть в случае развития аварийной ситуации.

Так как СПГ представляет собой многокомпонентное горючее, то для составления уравнения реакции горения СПГ в кислороде необходимо определить условную химическую формулу такого горючего, исходя из вышеуказанного его состава.

Элементарный состав можно описать обобщенной формулой

$$C_x H_y, \quad (1)$$

где  $C$  и  $H$  – атомы углерода и водорода соответственно;

$x, y$  – индексы в условной химической формуле, показывающие количество атомов соответствующего элемента.

Индексы  $x$  и  $y$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\omega_c \mu_{\text{усл}}}{\mu_c}; \\ y &= \frac{\omega_H \mu_{\text{усл}}}{\mu_H}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\omega_c, \omega_H$  – массовые доли углерода и водорода соответственно во всей смеси, составляющей компоненты топлива;

$\mu_c$  – относительная атомная масса углерода,  $\mu_c = 12 \text{ г/моль}$ ;

$\mu_H$  – относительная атомная масса водорода,  $\mu_H = 1 \text{ г/моль}$ ;

$\mu_{\text{усл}}$  – условная относительная молекулярная масса компонента топлива,  $\mu_{\text{усл}} = 100 \text{ г/моль}$ .

Значения  $\omega_c$  и  $\omega_H$  определяются следующим образом:

$$\omega_c = \sum \omega_i c_i; \quad \omega_H = \sum \omega_i n_i. \quad (3)$$

где  $\omega_i$  – массовая доля  $i$ -го вещества в смеси, составляющей компонент ракетного топлива;

$c_i$  и  $n_i$  – массовые доли  $c$  и  $n$  в  $i$ -м веществе, составляющем компонент ракетного топлива.

Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчета состава компонентов ракетного топлива на основе сжиженного природного газа**

№ вещества	Химическая формула	$\omega_i$	$\mu_c$	$x_i$	$y_i$	$C_i$	$H_i$
1	$CH_4$	0,6	16	1	4	$\frac{1 \times 12}{16} = 0,75$	$\frac{4 \times 1}{16} = 0,25$
2	$C_2H_6$	0,4	30	2	6	$\frac{2 \times 12}{30} = 0,8$	$\frac{6 \times 1}{30} = 0,2$

Определим массовые доли химических элементов в горючем:

$$\omega_c = 0,4 \times 0,8 + 0,6 \times 0,75 = 0,77;$$

$$\omega_{\text{H}} = 0,4 \times 0,2 + 0,6 \times 0,25 = 0,23.$$

Определим индексы при символах в условной химической формуле горючего:

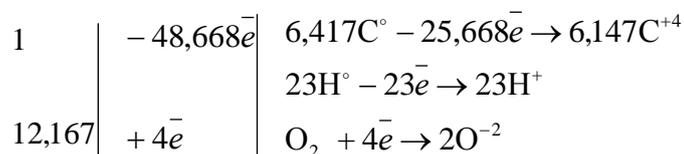
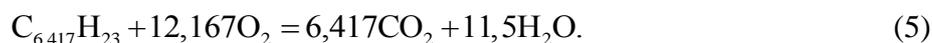
$$x = \frac{0,77 \times 100}{12} = 6,417;$$

$$y = \frac{0,23 \times 100}{1} = 23.$$

Получаем условную химическую формулу горючего:



Далее необходимо определить теоретическое соотношение СПГ и кислорода, подразумевая, что в этом соотношении вещества будут реагировать с максимальным тепловым эффектом. Для этого составим окислительно-восстановительное уравнение горения СПГ в кислороде:



## СПОСОБ ОЦЕНИВАНИЯ МОЩНОСТИ ВЗРЫВА КОМПОНЕНТОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

Из уравнения (5) видно, что теоретическое мольное соотношение компонентов, при которых образуются полные продукты их взаимодействия, – это соотношение  $x = 12,167$ . То есть для сгорания одного килограмма СПГ до полных оксидов необходимо 10,6 кг кислорода.

Теперь появляется возможность определить теплотворную способность рассматриваемого топлива. Так как целью расчетов является определение максимального тротилового эквивалента, будем определять теплотворную способность топлива при нормальных условиях, считая, что инициация топлива происходит при  $T = 293 \text{ K}$  и  $p = -10^5 \text{ Па}$ .

Для расчета теплотворной способности будем использовать закон Гесса [7]. Согласно этому закону тепловой эффект реакции равен разности энтальпий образования исходных веществ с учетом их стехиометрических коэффициентов.

Итак, определим энтальпию горючего при температуре  $T = 293 \text{ K}$ :

$$I_{\text{гор}}^0 = I_{\text{гор}}(T_{\text{кип}}) + C_{\text{гор}}(293 - T_{\text{кип.гор}}). \quad (6)$$

Так как горючее состоит из метана и этана, то определим их энтальпии.

*Для метана:*

$$I^0 = I^{T_{\text{кип}}}(\text{CH}_4) + C(293 - T_{\text{кип}}).$$

По таблице теплофизических свойств КРТ [7] находим:

$$T_{\text{кип}}(\text{CH}_4) = -162^\circ\text{C} = 111 \text{ K};$$

$$C(\text{CH}_4) = 3,43 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}};$$

$$I^{T_{\text{кип}}}(\text{CH}_4) = -5312 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}};$$

$$I^0(\text{CH}_4) = -5312 + 3,43 \cdot (293 - 111) = -4687,74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Для этана:

$$T_{\text{кип}}(\text{C}_2\text{H}_6) = -89^\circ\text{C} = 184 \text{ К};$$

$$C(\text{C}_2\text{H}_6) = 2,89 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$I^{T_{\text{кип}}}(\text{C}_2\text{H}_6) = -3489 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$I^0(\text{C}_2\text{H}_6) = -3489 + 2,89 \cdot (293 - 184) = -3174 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Энтальпию горючего найдем по формуле

$$I_{\text{гор}}^0 = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot I_i^0 = 0,6 \cdot (-4687,74) + 0,4 \cdot (-3174) = -4082,24 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = -408,224 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Энтальпия жидкого кислорода как индивидуального вещества при стандартных условиях равна нулю. Энтальпии продуктов реакции при  $T = 293 \text{ К}$  будут равны:

$$I^0(\text{CO}_2) = -393,5 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

$$I^0(\text{H}_2\text{O}) = -241,8 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}. \quad [7]$$

Таким образом, мольная теплотворная способность топлива будет составлять

$$H^0 = [6,417 \cdot (-393,5) + 11,5 \cdot (-241,8)] - [-408,224 + 12,167 \cdot 0] = -4897,6 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Знак «минус» указывает на то, что химическая реакция (6) идет с выделением тепла. Это значение получено при сжигании 1 моль СПГ в кислороде, при  $T = 293 \text{ К}$  получим массовое значение теплотворной способности. Так как  $\mu_{\text{усл}}(\text{СПГ}) = 100 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ , то

$$H_{\text{масс}}^0 = \frac{H^0}{\mu_{\text{усл}}} = -\frac{4897,6}{0,1} = 48976 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Полученное значение можно использовать для определения тротилового эквивалента взрыва топлива (смеси КРТ) путем соотношения теплотворных способностей тротила и смеси компонентов рассматриваемого ракетного топлива, как описано в работе [3] на примере других КРТ. Необходимо применить следующую зависимость:

$$k_{\text{тр}(KPT)} = \frac{H_{\text{масс}}^0}{H_{\text{ТР}}}, \quad (7)$$

где  $k_{\text{тр}(KPT)}$  – тротильный эквивалент взрыва смеси КРТ;

$H_{\text{ТР}}$  – теплотворная способность тротила  $H_{\text{ТР}} = 3400 \div 3600 \text{ кДж/кг}$ .

Подставив полученное значение  $H_{\text{масс}}^0$  в формулу (7), получим

$$k_{\text{тр}(KPT)} = \frac{H_{\text{масс}}^0}{H_{\text{ТР}}} = \frac{48976}{3400} = 14,4.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье подробно представлен способ оценивания мощности взрыва КРТ на базе СПГ, который посредством решения уравнения электронного баланса позволяет определить стехиометрическое соотношение и далее максимальную теплотворную способность смеси. Путем соотнесения теплотворных способностей тротила и смеси КРТ на базе СПГ получен коэффициент работоспособности взрыва смеси КРТ по тротилу.

Полученное значение позволяет сделать вывод о том, что смесь КРТ на базе СПГ обладает существенно большей мощностью взрыва по отношению к тротилу. А это приводит к необходимости пересмотреть взаимное расположение сооружений стартового комплекса на генеральном плане, изменить объемно-конструктивные решения сооружений и варианты их посадки. Вероятно, что классические требования по живучести и защищенности, предъявляемые к стартовым комплексам, окажутся невыполнимы по причине экономической нецелесообразности и потребуются разрабатывать принципиально новый подход к проектированию топологической структуры СК, а также к обоснованию объемно-конструктивных решений его основных сооружений.

### Список используемых источников

1. *Загруднинов Ю. А.* Методика оценки параметров воздушной ударной волны аварийного взрыва ракеты-носителя при старте // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму. – 2016. – Вып. 9-10 – С. 96–100.
2. *Сурин Д. В.* Специальные фортификационные сооружения : учебник. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. – 429 с.
3. Методика оценки ущерба объектам инфраструктуры стартового комплекса при аварийном взрыве ракеты-носителя на старте / С. А. Мачнев [и др.] // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму. – 2016. – Вып. 9-10. – С. 67–71.
4. *Карчин А. Ю., Султанов А. Э.* Конструктивно-компоновочные схемы и основные параметры отечественных ракет-носителей и разгонных блоков : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 26 с.
5. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки / Н. Н. Белов [и др.]. – Томск-Нортхэмптон, 2004. – 437 с.
6. Система хранения перспективных ракетных топлив на базе сжиженного природного газа / А. В. Казимиров [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 673. – С. 206–211.
7. *Пономаренко В. К.* Ракетные топлива : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – 428 с.

Е. Л. Кабанов

Военная академия Генерального штаба ВС РФ, г. Москва.

## **ПРОБЛЕМЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ МИРОТВОРЧЕСКИХ СИЛ, ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

В статье рассматриваются проблемы развертывания и функционирования системы управления коллективных миротворческих сил Организации договора о коллективной безопасности (далее – ОДКБ), пути их решения.

Ключевые слова: система управления коллективных миротворческих сил, управление коллективными миротворческими силами, Организация договора о коллективной безопасности, органы военного управления (далее – ОВУ), пункты управления, средства управления, коллективные миротворческие силы (далее – КМС).

Концептуальным документом, определяющим основные подходы государств-членов ОДКБ к вопросам обеспечения коллективной безопасности и развития военного сотрудничества, является Стратегия коллективной безопасности ОДКБ на период до 2025 года, утвержденная решением СКБ ОДКБ 14 октября 2016 года [8].

Стратегической целью ОДКБ объявлено обеспечение коллективной безопасности путем консолидации усилий и ресурсов государств-членов ОДКБ на основе стратегического партнерства, общепризнанных норм и принципов международного права. В основу ее реализации положен принцип обеспечения коллективной безопасности государств-членов ОДКБ через укрепление национальной безопасности каждого из них. При этом одной из основных стратегических задач ОДКБ в сфере обеспечения безопасности является дальнейшее развитие военной составляющей системы коллективной безопасности.

Советом коллективной безопасности ОДКБ 2 марта 2021 года утвержден План развития военного сотрудничества государств-членов ОДКБ на 2021–2025 годы. Одним из приоритетных направлений является развитие компонентов и системы управления Коллективных миротворческих сил (КМС) ОДКБ.

Основа любой военной системы – это система управления, поэтому формирование адекватной системы управления КМС ОДКБ – это наиболее важная и в то же время чрезвычайно сложная задача [5, 9]. В этой связи 15 сентября 2015 года главами государств-членов ОДКБ было принято решение «Об организации управления Войсками (Коллективными силами) ОДКБ», в соответствии с которым вопросы организации планирования, применения и общего руководства группировками Войск (Коллективных сил) ОДКБ были возложены:

1) в *Восточно-Европейском регионе* коллективной безопасности – на Объединенное стратегическое командование Западного военного округа Вооруженных Сил Российской Федерации;

2) в *Кавказском регионе* – на Объединенное стратегическое командование Южного военного округа;

3) в *Центрально-Азиатском регионе*:

– на территориях Российской Федерации, Кыргызской Республики и Республики Таджикистан – на Объединенное стратегическое командование Центрального военного округа;

– при применении группировок Войск (Коллективных сил) ОДКБ на территории Республики Казахстан – на Главное командование Сухопутных войск Вооруженных Сил Республики Казахстан [7].

Такое решение позволило реализовать принцип централизации управления в уже успешно функционирующих национальных системах военного управления, определить подчиненность командования Коллективными силами командующему ОСК (Главному командованию Сухопутных войск на территории Республики Казахстан), которые организуют планирование их применения на территории принимающего государства-члена ОДКБ, а также задействовать боевой потенциал ОСК, а именно все виды разведки, ресурс авиации, высокоточного оружия, сил флота и возможности других видов оперативного обеспечения в интересах проведения совместной операции Коллективными миротворческими силами ОДКБ.

Результаты анализа систем военного управления наглядно демонстрируют новый уровень совершенствования средств обеспечения управления и обмена информацией, что подтверждает опыт ведения военных действий группировками войск (сил) Вооруженных Сил в Сирийской Арабской Республике (далее – САР), проведения миротворческой операции на территории Нагорного Карабаха и в ходе специальной военной операции. Он обусловлен развитием информационных и телекоммуникационных технологий, совершенствованием средств связи, обработки, хранения и распределения информации, активным применением БпЛА различного назначения [4].

Вместе с тем опыт применения КМС в ходе проведенных совместных учений, миротворческих операций с учетом развития новых способов и средств вооруженной борьбы выявил насущную необходимость в совершенствовании системы управления КМС [6].

В связи с тем, что функции и задачи управления КМС ОДКБ распределяются между различными органами, уровнями и подсистемами управления, формируемыми на многонациональной основе, возникают определенные трудности в осуществлении всей совокупности полномочий ОВУ по руководству национальными, разнородными миротворческими контингентами [10].

К основным проблемам развертывания и функционирования системы управления КМС ОДКБ относятся:

- проблема осуществления упреждающего развертывания системы управления КМС в районах (зонах) их применения;
- проблема организации управления на этапе подготовки миротворческой операции миротворческими контингентами с пунктами постоянной дислокации, территориально разнесенными на большие расстояния;
- проблема организации и поддержания взаимодействия между ОВУ и воинскими формированиями различной национальной принадлежности, а также органов военного управления с федеральными органами исполнительной власти (далее – ФОИВ) в районах (зонах) применения миротворческих контингентов;
- проблема организации связи в национальных миротворческих контингентах стран-членов ОДКБ.

Основными причинами названных проблем являются: различия во взглядах военно-политического руководства государств-членов Организации на вопросы формирования и функционирования совместного оборонного пространства; несовершенство общей нормативной правовой базы, определяющей порядок:

- создания и функционирования системы управления КМС ОДКБ в период подготовки к миротворческой операции;
- применения миротворческих контингентов и действий отдельных национальных формирований на территории принимающего государства;
- единого руководства КМС и полномочий отдельных должностных лиц межнациональных органов военного управления на территории принимающего государства;
- формирования и совместной подготовки многонациональных органов военного управления в мирное время, а также назначения должностных лиц с учетом их подготовленности и соответствия замещаемой воинской должности;

- определения границ территории, на которой планируется применение КМС ОДКБ;
- взаимодействия органов военного управления КМС с органами государственной власти на территории принимающего государства при решении миротворческих задач, а также задач территориальной и гражданской обороны, поддержания режимов чрезвычайного и военного положения, информационного взаимодействия в рамках постконфликтного урегулирования;

- развертывания (наращивания) средств управления и создания единой технической основы системы управления КМС в рамках единой региональной системы управления.

К другим причинам следует отнести: недостаточное организационно-техническое обеспечение мероприятий по созданию (развертыванию) и функционированию системы управления; отсутствие системы получения достоверных данных об оперативном оборудовании возможных районов применения КМС; недостаточная оснащенность пунктов управления; технологическая несовместимость средств управления вооруженных сил союзных государств; языковые, этнические и другие различия между должностными лицами многонациональных органов военного управления [1–3].

Пути решения проблем развертывания и функционирования системы управления КМС ОДКБ:

- совершенствование нормативной правовой базы по вопросам создания и функционирования системы управления КМС;

- построение многоуровневой системы совместного планирования применения Коллективных миротворческих сил;

- заблаговременное создание организационного ядра органов военного управления Коллективных миротворческих сил;

- проведение регулярных мероприятий оперативной подготовки по слаживанию органов военного управления КМС с практическим развертыванием пунктов и средств управления;

- проведение рекогносцировки возможных районов применения миротворческих контингентов с целью определения их зон ответственности и возможностей по содержанию и заблаговременному развертыванию средств управления;

- заблаговременная разработка документов, учитывающих различия в технических характеристиках и возможностях средств связи и АСУ национальных формирований и регламентирующих порядок их применения в составе единой системы управления;

- целенаправленная подготовка военных кадров вооруженных сил государств организации в военно-учебных заведениях Министерства обороны РФ для органов военного управления Коллективных миротворческих сил;

- разработка единых наставлений (боевых уставов) по применению КМС для прогнозируемых условий обстановки с учетом опыта локализации (предотвращения) современных военных конфликтов.

Кроме того, следует отметить, что решение многих проблем организации управления КМС напрямую зависит от уровня развития, состояния и возможностей национальных систем военного управления государств-членов организации. Поэтому важной задачей сторон является постоянный анализ состояния национальных систем военного управления, определение степени их соответствия современным требованиям и поиск путей повышения эффективности их функционирования.

Анализ показывает, что проблемы создания (развертывания) и функционирования национальных систем военного управления имеют как общий, так и специфический характер, поскольку эти системы управления создаются и совершенствуются под влиянием различных факторов и условий.

К основным общим проблемам функционирования и развития системы управления КМС ОДКБ относятся:

– в *научно-методической сфере*: несовершенство методического аппарата организации совместной деятельности разнорядовых органов управления в единой системе военного управления, что требует разработки общих алгоритмов работы органов государственного и военного управления при совместном решении задач, методик оценки эффективности мер в области управления КМС;

– в *информационной сфере*: разнородность компонентов информационного и лингвистического обеспечения АСУ министерств и ведомств: баз данных, форм документов, классификаторов и словарей; различие структур и форм представления данных; несовместимость систем классификации и кодирования;

– в *организационно-правовой сфере*: несогласованность деятельности элементов военной организации государства между собой ввиду несовершенства законодательства; нескоординированное развитие систем связи и автоматизированного управления министерств и ведомств (разработка средств и сетей связи ведется независимо друг от друга, основывается на различных организационно-технических принципах, что затрудняет их интеграцию в единое информационное пространство); несогласованное развитие сетей связи в условиях отсутствия общей нормативной правовой базы и единого координирующего органа технологического развития; децентрализованное предоставление ресурсов и услуг сети связи общего пользования; отсутствие единой организационно-технической политики в области создания и развития сетей связи общего пользования, что приводит к применению различных тарифов и стандартов, разобщенному и неэффективному использованию ресурсов, усложнению системного контроля за их качеством, особенно по вопросам обеспечения устойчивости и информационной безопасности;

– в *технической сфере*: быстрое устаревание инженерных систем, систем защиты и жизнеобеспечения на пунктах управления, что не обеспечивает требуемую степень защиты от воздействия современных средств поражения, устойчивое функционирование средств связи и управления, а также необходимые условия для работы органов управления; отставание в развитии государственной технологической и элементной базы, необходимой для разработки и серийной поставки средств управления, что приводит к заимствованию компонентов средств и комплексов связи, а также программного обеспечения к ним; применение в сетях связи общего пользования зарубежного телекоммуникационного оборудования, имеющего недеklarированные возможности и позволяющего управлять сетями связи из-за рубежа, что определяет неприемлемо низкий уровень безопасности и устойчивости функционирования сетей связи общего пользования и специального назначения; недостаточная эффективность мер по предотвращению компьютерных атак на оборудование, обеспечивающее управление сетями связи.

В современных условиях совершенствование и развитие системы военного управления КМС ОДКБ осуществляется по следующим основным направлениям.

1. Направления совершенствования структуры, состава и организации деятельности органов управления: формирование организационно-штатной структуры органов государственного и военного управления мирного времени с учетом задач, выполняемых ими в военное время; установление режима функционирования военной организации государства в целом и каждого ее элемента в мирное и военное время, в период мобилизации, военного и чрезвычайного положения; разработка алгоритмов совместной работы органов государственного и военного управления, методик оценки эффективности мер в области обороны; развитие существующих и разработка новых систем поддержки принятия решений и автоматизированного управления в области обороны; развитие системы искусственного интеллекта в государственном управлении, в том числе и в области управления обороной; подготовка кадров в области управления обороной государства; нормативно-правовое регулирование порядка функционирования органов государственного и военного управления в мирное время, период непосредственной угрозы агрессии и в военное время.

2. Направления совершенствования и развития пунктов управления: оптимизация функций, структуры и состава пунктов управления государством, вооруженными силами и другими войсками; комплексная модернизация пунктов управления за счет оснащения их современными интегрированными комплексами автоматизированного управления, информационного обеспечения и связи; обеспечение совместимости средств технического оснащения пунктов управления различных министерств и ведомств; создание унифицированных полевых подвижных, железнодорожных и воздушных пунктов управления; создание пунктов управления модульного типа; повышение живучести пунктов управления; нормативно-правовое регулирование вопросов создания, функционирования и развития пунктов управления.

3. Направления совершенствования и развития средств управления: совершенствование и развитие технологий отечественного производства телекоммуникационного оборудования, средств связи и автоматизации; создание сети связи для нужд обороны и безопасности государства; создание АСУ КМС открытого типа с возможностью доступа к сети Интернет, для применения в рамках миротворчества; создание современных многофункциональных унифицированных автоматизированных комплексов, средств и систем управления; развитие дублирующих и резервных трактов управления; сопряжение средств управления различных министерств и ведомств; совершенствование противодействия иностранным техническим разведкам, защиты информации и информационной безопасности; повышение эффективности военно-научного сопровождения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области создания систем и средств управления; нормативно-правовое регулирование вопросов создания, функционирования и развития средств управления.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, необходимым условием совершенствования системы военного управления любого государства-члена ОДКБ является своевременное выявление проблем ее функционирования и определение путей их решения. Основные направления развития системы управления КМС ОДКБ находятся как в области совершенствования органов, пунктов и средств управления, так и в области повышения эффективности функционирования ее различных подсистем в условиях нестабильной военно-политической обстановки, которая в зоне ответственности ОДКБ не только остается напряженной, но и принимает все более трудно прогнозируемый характер.

Исходя из этого государства-члены ОДКБ должны быть готовы адекватно и эффективно реагировать на любые вызовы и угрозы, а система управления КМС ОДКБ должна обеспечивать эффективную реализацию органами государственного и военного управления своих функций, задач и полномочий в области миротворческой деятельности.

## **Список используемых источников**

1. Концепция развития автоматизированной системы управления ВС РФ на период до 2027 года. – М. : МО РФ, 2020. – 20 с.
2. Концепция развития систем управления Вооруженных Сил Российской Федерации на период до 2025 года. – М. : ГШ ВС РФ, 2010. – 21 с.
3. Проблемы создания и применения АСУ военного назначения: военно-теоретический труд / С. Н. Медведский [и др.]. – М. : ВАГШ ВС РФ, 2010. – 354 с.

4. Миротворческая деятельность: новые перспективы. Проблемные вопросы применения группировок войск (сил) при проведении миротворческих операций : материалы воен. научно-практ. конф. – М. : ОВА, 2019. – 143 с.
5. О системе управления силами и средствами системы коллективной безопасности ОДКБ : положение : утв. решением СМО ОДКБ от 28 сентября 2007 г. – URL: [https://odkb-csto.org/documents/documents/pravovaya\\_baza\\_odkb/#loaded](https://odkb-csto.org/documents/documents/pravovaya_baza_odkb/#loaded) (дата обращения: 08.02.2024).
6. Проблемные вопросы управления многонациональными контингентами коллективных сил оперативного реагирования в интересах обеспечения военной безопасности государств-членов ОДКБ : материалы Междунар. военно-науч. конф. – Минск, 2016. – 64 с.
7. Об организации управления Войсками (Коллективными силами) ОДКБ : решение СКБ. г. Душанбе, 15 сентября 2015 года. – URL: [https://odkb-csto.org/documents/documents/pravovaya\\_baza\\_odkb/#loaded](https://odkb-csto.org/documents/documents/pravovaya_baza_odkb/#loaded) (дата обращения: 08.02.2024).
8. Сборник документов, регламентирующих вопросы формирования, функционирования и подготовки войск (коллективных сил) Организации Договора о коллективной безопасности. – М. : ОШ ОДКБ, 2017. – 67 с.
9. О создании системы управления силами и средствами системы коллективной безопасности ОДКБ : соглашение. г. Душанбе, 6 октября 2007 г. – URL: [https://odkb-csto.org/documents/documents/pravovaya\\_baza\\_odkb/#loaded](https://odkb-csto.org/documents/documents/pravovaya_baza_odkb/#loaded) (дата обращения: 08.02.2024).
10. О структуре федеральных органов исполнительной власти : Указ Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 21. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_343385/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343385/) (дата обращения: 29.02.2024).

С. Н. Кокшаров,  
*кандидат военных наук;*  
О. Ю. Михеев,  
*кандидат военных наук, доцент;*  
К. Б. Салтыков,  
*кандидат военных наук*

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЧИСЛЕННОСТИ ВРЕМЕННОГО ОРГАНА УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА**

Представлена методика определения рациональной численности временного органа управления организационно-технической системы военного назначения, реализация которой позволит осуществлять научно обоснованный выбор количества должностных лиц для исполнения специальных обязанностей в составе различных функциональных формирований временного органа управления.

Ключевые слова: временный орган управления, должностные лица, рациональная численность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В зависимости от условий складывающейся обстановки, которая оказывает влияние на задействование людского ресурса, существует необходимость в рациональной численности каждого формирования организационно-технической системы военного назначения (ОТС ВН) для выполнения поставленной задачи. Рациональная численность формирования ОТС ВН – это такая численность формирования, которая обеспечивает ему безусловное выполнение поставленной задачи и точно в заданные сроки с высокой эффективностью.

Важнейшим временным формированием ОТС ВН в сложных условиях обстановки является временный орган управления (ВОУ) ОТС ВН, который обеспечивает всестороннюю оценку сложившейся обстановки, повышение оперативности принятия решений и постановки задач формированиям ОТС ВН с целью предоставления им достаточного времени для подготовки к выполнению поставленных задач [1]. Одной из главных задач при комплектовании ВОУ является определение рациональной численности должностных лиц в его составе. При этом практика функционирования ВОУ показывает, что в настоящее время отсутствует научно-методический аппарат для определения рациональной численности ВОУ, что негативно сказывается на эффективности функционирования системы управления ОТС ВН в целом.

С учетом изложенных выше обстоятельств разработка методики определения рациональной численности ВОУ и ее внедрение в практику войск представляются актуальной и целесообразной задачей, особенно в тактическом звене.

### **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ВРЕМЕННОГО ОРГАНА УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

При определении рациональной численности временного органа управления важно учитывать два ключевых аспекта:

во-первых, рассматривать управление как процесс переработки и производства информационного продукта, включающий в себя получение требуемой информации от вышестоящих, подчиненных и взаимодействующих органов управления (ОУ), ее обработку и на этой основе производство нового информационного продукта с последующей его передачей (в части касающейся) вышестоящим, подчиненным и взаимодействующим ОУ;

во-вторых, подходить к информационному аспекту деятельности ВОУ с точки зрения семиотики, т. е. рассматривать обработанную должностными лицами ВОУ информацию и производство ими нового информационного продукта как совокупность знаков и знаковых символов.

Степень достоверности расчета рациональной численности ВОУ предлагается повысить за счет введения коэффициентов, учитывающих условия работы его должностных лиц, т. е. коэффициенты увеличения нагрузки:

– при работе в помещениях, не обеспечивающих нормальные условия жизнедеятельности (отсутствие отопления, санузла и комнаты отдыха, стесненное размещение);

– при использовании средств индивидуальной защиты;

– при работе в интенсивные часы;

– при долгосрочной и непрерывной работе;

– при работе в стрессовой ситуации;

– при работе в ночное время.

Под общей численностью ВОУ будем понимать количество должностных лиц ВОУ, обеспечивающих ими эффективное выполнение работы в сложных условиях обстановки.

Общая численность ВОУ ( $N_{\text{ВОУобщ}}$ ) может быть выражена математической зависимостью:

$$f : A(G_{\text{ВОУ}}, L, S, T) \rightarrow N_{\text{ВОУобщ}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{ВОУ}}$  – совокупный объем информации, полученной, обрабатываемой, производимой и выдаваемой должностными лицами ВОУ;

$L$  – эффективность работы должностных лиц ВОУ с совокупным объемом информации за единицу времени;

$S$  – количество связей должностных лиц ВОУ, включая связи внутри него и связи с должностными лицами вышестоящих, подчиненных и взаимодействующих ОУ;

$T$  – нормативное время для выполнения указанного объема информационной работы.

Значения указанных переменных определяются следующим образом:

– совокупный объем информации ( $G_{\text{ВОУ}}$ ) – суммированием объемов всей полученной, обрабатываемой, производимой и выдаваемой информации должностными лицами ВОУ за установленный период времени;

– производительность труда должностных лиц ВОУ ( $L$ ) – средним количеством знаков и знаковых символов, обрабатываемых должностными лицами ВОУ в получаемой, перерабатываемой, вновь создаваемой и выдаваемой информации за единицу времени при нормативных условиях;

– количество связей должностных лиц ВОУ ( $S$ ) – количеством должностных лиц ВОУ, вышестоящих, подчиненных и взаимодействующих ОУ;

– нормативное время ( $T$ ) – продолжительностью отведенного времени для выполнения возложенных на должностных лиц ВОУ функциональных обязанностей (задач) по приему и обработке поступившей информации, разработке нового информационного продукта и его передаче.

Количество связей должностных лиц ВОУ можно представить в виде информационного графа, вершинами которого являются должностные лица ВОУ, вышестоящих и подчиненных ОУ, а циркулирующая информация между ними показана дугами (рис. 1).

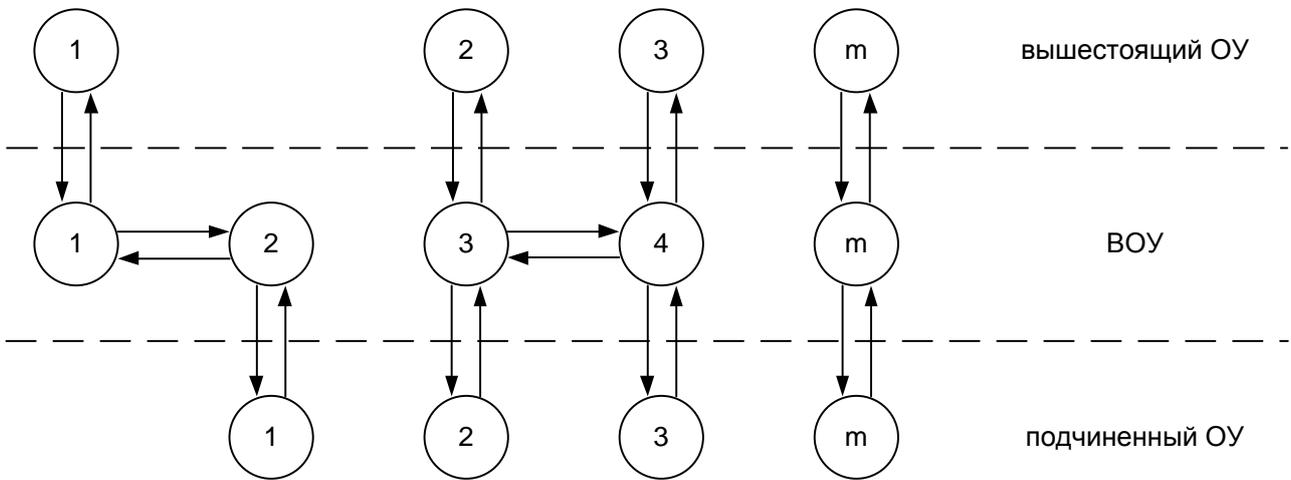


Рис. 1. Информационный граф ВОУ и ОУ

Расчет рациональной численности ВОУ ( $N_{\text{ВОУрац}}$ ) производится по формуле

$$N_{\text{ВОУрац}} = \sum_{j=1}^m N_{\text{рац}j}, \tag{2}$$

где  $N_{\text{рац}j}$  – рациональная численность  $j$ -тых должностных лиц ВОУ ( $j = 1, 2, 3 \dots m$ ).

Рациональная численность  $j$ -тых должностных лиц ВОУ ( $N_{\text{рац}j}$ ) вычисляется по формуле

$$N_{\text{рац}j} = N_{\text{расч}j} \times K_{\text{об}}, \tag{3}$$

где  $N_{\text{расч}j}$  – расчетная численность  $j$ -тых должностных лиц ВОУ;  
 $K_{\text{об}}$  – обобщенный коэффициент, учитывающий увеличение нагрузки на должностных лиц ВОУ в сложных условиях обстановки.

Выполнение всего объема работы ВОУ подразделяется на два этапа:

1) прием и обработка должностными лицами ВОУ входной информации, поступающей в ВОУ («творческий» труд);

2) разработка и доведение должностными лицами ВОУ выходной информации, исходящей из ВОУ (техническое оформление документов).

Расчетная численность  $j$ -тых должностных лиц ВОУ ( $N_{\text{расч}j}$ ) вычисляется по формуле:

$$N_{\text{расч}j} = N_{\text{расч.тв}j} + N_{\text{расч.тех}j}, \tag{4}$$

где  $N_{\text{расч.тв}j}$  – расчетная численность  $j$ -тых должностных лиц ВОУ, выполняющих задачи по «творческому» труду;

$N_{\text{расч.тех}j}$  – расчетная численность  $j$ -тых должностных лиц ВОУ, выполняющих задачи по техническому оформлению документов.

Используя математическую зависимость (1), математическое равенство (4) можно представить в виде уравнения

$$N_{\text{расч}j} = \frac{G_{\text{тв}ij}}{L_{\text{ср.тв}} \times t} + \frac{G_{\text{тех}ij}}{L_{\text{ср.тех}} \times t}, \tag{5}$$

- где  $G_{\text{тв}ij}$  – совокупный объем информации, который содержится в  $i$ -тых документах, обработанных и разработанных  $j$ -тым должностным лицом ВОУ и требующих от него «творческого» труда;
- $G_{\text{тех}ij}$  – совокупный объем информации, который содержится в  $i$ -тых документах, принятых и доведенных  $j$ -тым должностным лицом ВОУ и требующих от него технического оформления документов;
- $i$  – документ, принятый, обработанный, разработанный и доведенный  $j$ -тым должностным лицом ВОУ ( $i = 1, 2, 3 \dots c$ );
- $j$  – должностное лицо ВОУ, осуществляющее работу по получению, обработке, разработке и доведению  $i$ -тых документов ( $j = 1, 2, 3 \dots m$ );
- $L_{\text{ср.тв}}$  – средняя эффективность должностного лица ВОУ по «творческому» труду за определенное время;
- $L_{\text{ср.тех}}$  – средняя эффективность должностного лица ВОУ по техническому оформлению документов за определенное время (2500 зн./час);
- $t$  – установленная продолжительность непрерывной работы должностных лиц ВОУ.

Совокупный объем информации, содержащийся в  $i$ -тых документах ( $G_{\text{тв}ij}$ ) и ( $G_{\text{тех}ij}$ ), рассчитывается по формулам:

$$G_{\text{тв}ij} = \sum_{i=1}^c D_{\text{тв}i} \times Z_i, \quad (6)$$

$$G_{\text{тех}ij} = \sum_{i=1}^c D_{\text{тех}i} \times Z_i, \quad (7)$$

- где  $D_{\text{тв}i}$  – количество  $i$ -тых документов, требующих «творческого» труда;
- $D_{\text{тех}i}$  – количество  $i$ -тых документов, требующих технического оформления;
- $Z_i$  – число знаков и знаковых символов, из которых может состоять  $i$ -тый документ.

Средняя эффективность должностного лица ВОУ по «творческому» труду за определенное время ( $L_{\text{ср.тв}}$ ) рассчитывается по формуле

$$L_{\text{ср.тв}} = t_{\text{об}} \times w_{\text{об}}, \quad (8)$$

- где  $t_{\text{об}}$  – время обработки информации традиционным способом одним должностным лицом ВОУ;

$w_{\text{об}}$  – скорость обработки информации одним должностным лицом ВОУ.

Скорость обработки информации одним должностным лицом ВОУ определяется с использованием датчиков случайных чисел. Каждое значение датчика случайных чисел умножается на среднюю скорость обработки информации (2–5 зн./сек).

Обобщенный коэффициент, учитывающий увеличение нагрузки на должностных лиц ВОУ в сложных условиях обстановки ( $K_{\text{об}}$ ), вычисляется по формуле

$$K_{\text{об}} = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6, \quad (9)$$

- где  $K_1$  – коэффициент, вводимый при работе в помещениях, не обеспечивающих нормальные условия жизнедеятельности;
- $K_2$  – коэффициент, вводимый при использовании средств индивидуальной защиты;
- $K_3$  – коэффициент, вводимый при работе в интенсивные часы;
- $K_4$  – коэффициент, вводимый при долгосрочной и непрерывной работе;
- $K_5$  – коэффициент, вводимый при работе в стрессовой ситуации;
- $K_6$  – коэффициент, вводимый при работе в ночное время.

Значения данных коэффициентов определяются методом экспертных оценок (от 1 до 2).

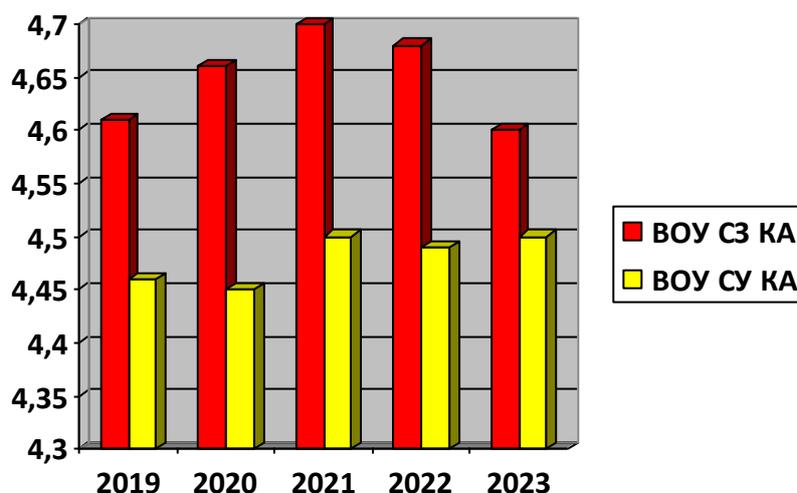


Рис. 2. Средний балл слушателей ВКА имени А. Ф. Можайского за КШВИ

Предложенная методика определения рациональной численности ВОУ апробирована со слушателями ВКА имени А. Ф. Можайского в ходе командно-штабных военных игр (КШВИ), проводимых в период с 2019 по 2023 год. Численность ВОУ по силам запуска космических аппаратов (КА) и состав должностных лиц формирований ВОУ комплектовались с использованием представленной методики, а численность ВОУ по силам управления КА и состав должностных лиц формирований ВОУ – без ее использования. В результате учебно-боевые задачи ВОУ по силам запуска КА решались более эффективно, чем эти же задачи решались ВОУ по силам управления КА. Уровень эффективности отработки учебно-боевых задач слушателями оценивался их средним баллом за КШВИ (рис. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика определения рациональной численности ВОУ может быть эффективным инструментом в руках командиров (начальников), которые принимают решение на применение по предназначению ОТС ВН в сложных условиях обстановки.

Реализация методики позволит обоснованно осуществлять выбор необходимого и достаточного количества должностных лиц для исполнения ими специальных обязанностей в составе различных функциональных формирований ВОУ.

## Список используемых источников

1. Данелян А. П., Кацик В. О., Кокшаров С. Н. Методика оценивания уровня готовности офицеров основных подразделений воинской части к выполнению задач в составе группы боевого управления // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 678. – С. 382–388.

*Avksentyev A. A., Nikolaev Y. A.* Shortest line method using angular distances from object to stars for cosmic object coordinates calculation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 7–14.

The method for cosmic object coordinates calculation using angular distances from object to stars has created. The sequence of actions for object detecting and star identification has written. Formulas for calculation the direction to cosmic object based on the angular distances from object to three stars has estimated. Cosmic object position mistakes are determined taking into account the corner between lines of vising, distances up to object and measuring equipment accuracy.

*Key words:* Shortest line method, cosmic object coordinates, spacecraft, line of vising, mistakes of measurements.

*Belov P. Y., Miroshnik K. S., Khomchenkov A. V.* Method of optimal formation of link layer frame for aggregated traffic in multiservice data transmission network by the criterion of minimum end-to-end delay // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 15–24.

The paper considers a method that can be used in packet telecommunication networks to minimize end-to-end delay in the transmission of multiplexed traffic by optimizing the packet size and placing in one frame of the link layer several packets of the network layer.

*Key words:* Deterministic network calculus, Ethernet frame, telecommunication traffic, end-to-end delay.

*Volodin R. S., Tarakanov M. N., Tsybulnik A. N.* Methodology for calculating the coordinates of observation objects when combining the elliptical and direction-finding positioning methods // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 25–35.

The article proposes a method for the analytical calculation of the spatial coordinates of observation objects on signals from ground-based non-cooperative sources of radio emission when combining elliptical and direction-finding positioning methods. Analytical determination of the location of ballistic objects is obtained in a rectangular coordinate system based on the solution of a system of nonlinear equations under certain restrictions, and its accuracy characteristics are estimated.

*Key words:* object of observation, non-cooperative radiation source, system of nonlinear equations, surfaces (lines) of position, accuracy estimates of spatial coordinates, combination of elliptical and direction-finding methods for determining coordinates.

An optimization of the algorithm for estimating the motion parameters of space objects based on a set of measurements in automated system for the prevention of dangerous situations / A. S. Goryanskiy, A. A. Karytko, V. M. Lizan, D. O. Petrich // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 36–47.

The paper presents an approach to optimizing the algorithm for solving the problem of estimating the motion parameters of space objects based on a set of measurement information is proposed. Optimization is achieved by reducing the dimensionality of the problem being solved by performing an additional procedure for selecting coordinate measurement information. The criterion that ensures the selection of measurement information is based on the calculation of the minimum, average and maximum distance between orbits. A computational experiment was performed on the selection of coordinate measurement information generated by means of observation of objects with similar orbital parameters. The results presented in the article provide a reduction in the computational complexity of the algorithm for estimating the motion parameters of space objects

and a reduction in performance requirements for computing facilities of near-Earth space monitoring systems.

*Key words: algorithm, dynamic object of observation, estimation of orbit parameters, distance between orbits, computational complexity of the algorithm.*

*Konishchev V. S, Kharchenko A. V., Yashkov S. A.* Simulation model of signal processing with penetration into radio information transmission systems with interference compensation in the basis of the sectional cosine transform // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 48–59.

The article describes the algorithmic computer ion model of signal processing with propagation in radio information transmission systems operating in conditions of narrow-band harmonic interference, and also presents the results of modeling the process of interference transmission in the basic cosine transform.

*Key words: signal processing, noise propagation, spatial cosine transform, noise compensation.*

Robust algorithm for segmentation of an optical image formed during the observation of the starry sky / V. V. Lavrov, R. S. Luchkin, O. I. Nemykin, M. E. Prokhorov, Y. G. Ryndin, A. V. Testov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 60–71.

The work is devoted to the development of an architecture for the software implementation of robust top-level algorithms that solve the problems of processing optical images (OI) formed during the observation of man-made near-Earth space objects (CO). The development is based on an adaptive Bayesian approach using an additive loss function, and the apparatus of Boolean algebra is used to represent the structure of the OI CO. This approach made it possible to present the process of processing OI, when the probabilistic description of the set of information objects and the background environment contained in it is a priori unknown, in the form of two stages. At the first stage, the segmentation of the initial OI (SOI) is carried out without taking into account the specifics of a specific functional task (the stage of primary processing). At the second stage, the preliminary decision is clarified taking into account the structure of a priori information. In the work, based on the proposed representation of the structure of SOY, the corresponding algorithms for the primary processing of a single OI are synthesized. Examples of processing OI obtained under field conditions are given.

*Key words: Adaptive Bayesian approach, additive loss function, Boolean matrix, optical image, segmentation.*

*Makhov D. S., Shumbar A. V.* Power allocation module for partial radio channels in aerial robotic technic with multibeam phased antenna array // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 72–78.

An approach is intended to develop a power allocation algorithm in radio channels formed by a multipath phased antenna array of an aerial robotic technic in order to compare stability of information transmission system functionality in different situations. Using a huge variety of power allocation methods according to its noise power condition, the approach decreases the bit error rate in partial radio channels. The key solution of the problem is based on the proportional power allocation using different algorithms while the antennas parameters and translator's power stay the same. Analytical expressions of indicators for algorithm synthesis using mathematical and simulation modeling are given below.

*Key words: aerial robotic technic, multipath phased antenna array, information transmission system, power allocation algorithm, partial radio channel.*

Method of creating mesoscale fields of artificial aerosol formations of the upper tier in order to regulate the conditions of formation and evolution of convective clouds // A. P. Doronin, A. V. Novikov, V. M. Petrochenko, V. V. Filippenok // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 79–86.

The article presents the results of studies to substantiate the application of the method of creating mesoscale fields of artificial aerosol formations (MAF) of the upper tier in order to regulate the conditions of formation and development of convective clouds by changing the temperature regime of the atmospheric boundary layer.

*Key words: convective clouds, artificial aerosol formations, upper-tier clouds, condensation trails, lightning, forest fires.*

Ryzhiy N. V. Features of the application of the method of additive convolution of criteria when choosing a land plot for the placement of objects of various purposes // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 87–94.

The article is devoted to the solution by the method of additive convolution criteria the multi-criteria problem of choosing of objects of various purposes. The formulation of the problem of choosing on the scale the constructions of telescope, designed for observing outer space, has been carried out. At same time, 12 indicators of the quality of land plots characterizing the rationality for the placement of the land plot are examined, a solution to the problem of choosing by the method of additive convolution criteria is presented and conclusions are draw about the advantages and disadvantages of using this method.

*Key words: decision-making, land plot, multi-criteria selection, method of additive convolution of criteria.*

Biryukov D. N., Zakharov O. O., Shestakov I. A. An approach to building an information security audit management system with a priori uncertainty of the characteristics of the object under study // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 95–101.

The problem of the complex application of various tools (tools) interacting with each other for conducting an information security audit is considered. An approach is proposed to build a multi-level system that coordinates audit tools using control signals depending on external disturbances and feedback signals. Some proposals have been formulated for the programmatic implementation of the proposed approach.

*Key words: information security, penetration testing, information security audit, multilevel systems.*

Biryukov D. N., Lebedev S. L., Russu V. Y. Selection of a method for representing functions of executable code of programs for forming a training sample // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 102–111.

Methods for representing the functions of executable program code to form a high-quality training sample for machine learning in order to automate the search for vulnerabilities in executable files are considered.

*Key words: information protection, vulnerability search automation, firmware unpacking automation, information security.*

Nagibin D. V., Platonov A. A., Sabirov T. R. Method for identifying functional and structural specifications implemented in custom integrated circuits // Proceedings of the Military Space

academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 112–120.

The article discusses the issue of automating the process of identifying functional and structural specifications of custom integrated circuits. The approach proposed by the authors is based on an ontological representation of knowledge and is implemented using developed rules for an inference machine. A structure of levels of detail of elements formed in the process of restoring the functional and structural specifications of custom integrated circuits is proposed.

*Key words: custom integrated circuits, inference machine.*

Method for assessing the probability of flying an orbital group of earth remote sensing spacecraft over space-time areas / M. A. Aleksandrov, E. P. Minakov, A. V. Mishcheryakov, S. V. Mishcheryakov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 121–133.

The work is devoted to estimating the probability of an orbital constellation of Earth remote sensing spacecraft flying over space-time regions. A model has been adapted for calculating the probability of a potential flight of an orbital constellation of Earth remote sensing spacecraft over a space-time region. A new method has been developed for estimating the probability of an orbital constellation of Earth remote sensing spacecraft flying over space-time regions using the oblique projection method and the method for calculating the parameters of the unperturbed motion of objects within the framework of Keplerian theory. A model for determining the boundaries of oblique projections of space-time regions has been developed, and an algorithm for estimating the average time of flight of an orbital constellation over this region has been formed. Assessments are given of the use of orbital constellations of Earth remote sensing spacecraft for monitoring spatio-temporal areas for the purpose of timely detection of objects located in these areas.

*Key words: oblique projection, probability of potential flight.*

Arsen'ev V. N., Slatova E. V. Ensuring the required probability of selecting a given object from the multiple of near-earth space observed by a space vehicle // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 134–142.

The problem of substantiating the requirements for the accuracy characteristics of on-board measuring equipment of a spacecraft surveying near-Earth space is considered from the condition of ensuring the required probability of selecting a given object from a set of observables. Its analytical solution was obtained, on the basis of which a technique was developed for determining the variances of measurement errors of particular features of observed objects in various areas of outer space. The proposed methodology makes it possible to redistribute the requirements for the accuracy characteristics of on-board measuring instruments and, as a result, reduce the costs of their modernization.

*Key words: near-Earth space, spacecraft, measuring instruments, observation conditions, accuracy characteristics, formation of requirements.*

Functional model of information-converting elements of aircraft on-board equipment complexes / A. S. Bukirev, S. V. Ippolitov, A. Y. Savchenko, M. I. Yatsechko // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 143–165.

An analysis of the existing methods and means of control used on board modern aircraft has been carried out. The necessity of increasing the depth of the search for the failure site using machine learning methods is substantiated, which will automatically create diagnostic models that are difficult to formalize, while increasing the intensity of recovery, and, as a result, the level of

combat readiness. A functional model for diagnosing information-transforming elements has been developed.

*Key words: functional model, technical diagnostics, information-transforming elements, aircraft, machine learning, artificial intelligence.*

Voronin O. I., Tsvetkov A. V. The method of forming the parameters of the system for maintaining the operability of the technical means of the RVSN connection in the conditions of a fractal fault flow // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 166–175.

This scientific article describes a method for forming the parameters of the system for maintaining the operability of the technical means of connecting the RVSN in conditions of a fractal fault flow, which is an ordered set of actions aimed at optimizing the system parameters according to the criterion of a readiness coefficient not lower than that set at the stages of operation of technical means.

*Key words: health maintenance system, fractal flow, malfunctions, technical tools.*

Zubarev A. V., Karagodin V. V., Rybakov D. V. Application of the frequency response method for evaluating the technical condition of power transformers // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 176–184.

The article presents an analysis of the technical condition of power transformers of military infrastructure facilities. The classification of failures and characteristic faults of power transformers, methods for their determination are given. It is shown that in order to assess the technical condition of power transformers (to identify damage to the windings) during their operation and to make a decision on extending the technical life of power transformers that have worked out the assigned service life, it is possible to use one of the modern methods – the method of frequency characteristics. The theoretical foundations of this method are described. The use of this method will prevent emergencies during the operation of power transformers, plan the withdrawal of equipment for repair with the greatest efficiency, as well as make informed decisions about extending the technical life of power transformers that have developed.

*Key words: power transformer, technical resource, malfunctions, technical condition, frequency characteristics.*

A method for determining minerals and their content fractions on the visible surface of non-atmospheric celestial bodies based on the analysis of reflection spectra / V. V. Kakaev, S. V. Kulikov, S. V. Logunov, D. S. Fedorenko // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 185–193.

The article proposes a method for determining materials and their content fractions on the visible surface of atmospheric-free celestial bodies, based on a model for the formation of reflection spectra according to a linear law depending on the proportional size of the areas of structural elements of the objects under study. The method can be used in the analysis of the reflection spectra of objects obtained during astronomical observations, taking into account the influence of disturbing influences on the accuracy of determining the content fractions.

*Key words: reflection spectrum, non-atmospheric celestial body, spectrophotometry, spectral reflection coefficient, least squares method.*

Karagodin V. V., Rybakov D. V. Method for assessing the performance of power supply systems for ground-based space infrastructure objects // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 194–204.

The article discusses the solution to the problem of monitoring the performance of power supply systems (PSS) of ground-based space infrastructure objects (GBSIO). The necessity of considering PSS GBSIO as complex hierarchically distributed technical systems is substantiated. The content of the proposed method for assessing the performance of such systems is outlined, the main stages of which are the decomposition of the PSS, the compilation of a mathematical model reflecting the processes of its functioning, the aggregation of the technical states of the system and obtaining an assessment of its actual performance. Using the example of assessing the performance of a transformer substation, as one of the main elements of the PSS GBSIO, the proposed method was tested.

*Key words: power supply system, control, diagnostics, performance assessment method, decomposition, technical condition, pattern recognition theory.*

*Karagodin V. V., Smirnov S. V., Khomich I. V. Structure variant of adaptive automatic excitation control system of synchronous generator // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 205–214.*

Currently, there is a massive transfer of control and regulation tools from analog to discrete hardware base, what creates the opportunity to implement almost any control laws. In connection with this, interest on adaptive control has recently grown among both theorists and practitioners. However, issues of adaptive control of such objects as electric generators have not been resolved at a level sufficient for their practical implementation yet. Development of automatic excitation control for generators in autonomous power supply systems is particularly difficult. In article the most significant peculiarities of autonomous power supply systems are identified and based on that set of quality requirements to adaptive automatic excitation system of brushless synchronous generator is formed. An analysis of the advantages and drawbacks of existing approaches to the synthesis of adaptive control systems and their practical implementation, based on which, the structure of adaptive automatic excitation control system of brushless synchronous generator is proposed.

*Key words: synchronous generator, brushless synchronous generator, automatic excitation controller, adaptive control systems.*

*Karytko A. A. A method for correcting estimates of the motion parameters of group dynamic objects in automated systems for the prevention of dangerous situations in near-Earth space based on interpolation of fragments of the trajectory of the group // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 215–224.*

The method is based on the introduction of a regression model of the orbital motion of a group of dynamic objects, the values of which are used as reference in the correction procedure. The regression model describes the movement of objects within a group of second-degree polynomials in local sections of their trajectory. The initial data for interpolation are estimates of the motion parameters of the objects of the group, formed by a set of observation sensors on, as a rule, non-overlapping local time intervals distributed over a common time interval of no more than ten minutes. The article contains the results of a computational experiment in which the fundamental possibility of effective correction of the parameters of the movement of objects of a group using interpolating fragments of the trajectory of objects of polynomials is demonstrated.

*Key words: dynamic object of observation, group movement, estimation of motion parameters.*

*Synthesis of means ensuring the safe launch of space rocket / V. V. Kozlov, M. D. Konoplev, A. V. Lagun, V. A. Kharchenko // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 225–233.*

The article gives an idea of the level of launch loads that arise during the launch of a space rocket. The role of launch equipment in organizing a rocket launch is assessed. A method is described that makes it possible to reduce the level of such loads and the size of the destructive impact on the launch structure and elements of launch equipment. The role of the gas-dynamic launch scheme in the design of the launch complex is determined. The target efficiency indicator for part of the startup processes was also calculated. Variants of the cooling system are proposed to reduce the level of starting loads.

*Key words: starting loads, starting equipment, gas duct, water supply system, gas-dynamic starting circuit, process efficiency.*

*Konishchev V. S., Maltsev G. N. Potential interference immunity of radio engineering information transmission systems under conditions of non-noise interference // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 234–239.*

Analytical dependencies are presented for analyzing the signal/noise ratio at the input of a decision device in radio engineering information transmission systems with spread spectrum signals under conditions of non-noise interference with optimal signal reception using a whitening filter. The results of calculations of the signal-to-noise ratio at the input of the decision device under conditions of non-noise interference are compared with the values of the signal-to-noise ratio for optimal signal reception under conditions of noise interference with the same energy characteristics of the signal and interference.

*Key words: optimal signal reception, potential noise immunity, non-noise interference, whitening filter.*

Methodological approach to determining the rational structure of placement of information reception points of a perspective space geodesic system / E. V. Kotyashov, O. L. Kuvaev, A. N. Nagovisina, V. A. Chernyavskiy // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 240–249.

The article describes an approach to determining the rational structure of placement of information points during the operation of a promising multi-tier space system intended for constructing a high-precision geocentric coordinate system and determining a high-level (detailed) model geodetic pair meters Earth. To justify the structure of location of information receiving points, a method is used to solve the problem of covering an area of arbitrary configuration with circles of the same radius. Modeling has shown that using five points for receiving special information, spaced evenly in longitude, will ensure the reception of all accumulated information even if any point fails.

*Key words: spacecraft, information receiving point, information.*

The method of calculating the cooling of liquid in underground communications of the ground space infrastructure / A. N. Mirgorodsky, R. A. Mosyagin, V. M. Motorin, V. M. Salnikov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 250–255.

One of the most important problems of ensuring the effective functioning of protected points is the removal of heat from underground protected control points, especially during their autonomous operation.

The article provides an approximate solution to the problem of cooling of a liquid moving in a channel based on the joint application of the integral Laplace transform and the variational method.

*Key words: theory of thermal conductivity, integral Laplace transform, variational method, self-adjoint differential equation of the second order by the Euler-Lagrange equation for the functional, the deduction theorem.*

*Petukhov A. I., Sultanov A. E.* Increasing the accuracy of modeling longitudinal vibrations of laughter rocket cases taken into account of the rigidity characteristics of fuel tanks// Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 256–263.

The article provides an analysis of the influence of models of rigidity of tanks of the first stage of launch vehicles with series connection of stages for the accuracy of description of the frequency characteristics of the housing during longitudinal fluctuations. An approach is proposed that makes it possible to requirements for taking into account design features stage fuel tanks in relation to the task of ensuring the required accuracy of modeling longitudinal.

*Key words:* launch vehicle, longitudinal vibrations, increasing the adequacy of the model, rigidity of fuel tanks.

*Beloshitsky A. V., Dedik N. A., Meshcheryakova E. I.* Training of officers-teachers of military universities in the system of retraining and advanced training: psychological and pedagogical problems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 264–269.

In the publication in the context of the development of the concept of cognitive motivation of teachers of military universities, outlined by L. A. Inozemtseva and N. S. Kuzhekin (Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. Issue 687. 2023), the directions of solving problems related to the retraining of officers for teaching activities as a new type of military professional activity for them are proposed. The necessity and possibilities of developing an individual trajectory of professional development of an officer-teacher in the educational environment of a military university are substantiated. The characteristics of the innovative method of transition to the zone for the immediate development of subjects using the individual trajectory of professional development of a teaching officer in the system of traditional and innovative methods of organizing and conducting retraining are presented. Keywords: retraining of officers, pedagogical activity, individual trajectory of professional development of an officer.

*Key words:* retraining of officers, pedagogical activity, individual trajectory of professional development of a teaching office.

*Pastuschkov A.V., Prischepa V.N., Severenko A.V.* Factors affecting the results of shooting from small arms in the conditions of service and combat activities of military personnel due to the use of physical exertion // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 270–274.

A reasonable analysis is presented between the level of readiness in shooting and various indicators of physical fitness. On the basis of the results obtained, a justification is given for the possibility of integrating physical and fire training in the process of training in shooting from small arms.

*Key words:* physical activity, physical fitness, physical exercises, fire training, shooting results.

*Cheburov M. A., Shabakov E. I.* A mathematical model of student training taking into account the nonlinear and non-invariant properties of the educational process // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 275–282.

The article offers a variant of the mathematical description of student training at the university, taking into account the non-linear, non-invariant properties of the educational process. The total amount of knowledge acquired by students during training is described by a mathematical model using multidimensional matrices. The proposed mathematical model of training students, taking into account the non-linear and non-invariant properties of the educational process, is based on the

curriculum for the specialist training, data on the qualifications of the professorial-teaching staff, and features of students' memory (memorization, learning and forgetting the acquired knowledge).

*Key words: student training, curriculum, non-linearity, non-invariance, external sources of information.*

*Ogorodnikov V. P.* Objective and Subjective Prerequisites for the Development of Rocket and Space Technology // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 283–292.

The main factors of the development of space technology are considered: both objective and subjective. The analysis is carried out in accordance with the principle of the dialectical unity of the historical and the logical. It is shown that the development of technology is based on the development of the production of material and spiritual goods. In turn, the development of production is stimulated by scientific and technological progress and education, which is demonstrated in the article on the example of the development of domestic cosmonautics.

*Key words: objective and subjective, astronomy and cosmology, science, education and production, productive forces and production relations, military-space activity.*

*Repyakh N. A., Hrustova A. N.* The fate and creativity of the domestic cosmist philosopher Nikolay Alexandrovich Setnitsky // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 293–301.

The article examines the main milestones in the life of the famous Russian cosmist philosopher, economist, and statistician Nikolai Aleksandrovich Setnitsky, and presents a description of his polemics with the concept of the famous Russian philosopher P.I. Novgorodtsev on the essence of the social ideal and ways to achieve it; an assessment is made of his contribution to the development and promotion of the ideas of the philosophy of common cause, the founder of which was N.F. Fedorov.

*Key words: ideal, social ideal, “utopias of socialism and anarchism”, ideal of “endless improvement”, ideal of “finite improvement”, moral ideal, final goal, stages of ideal implementation, “fractional ideals”, Christ-loving army, Christianity and war, violence, the progress of science and technology, the future of humanity.*

*Zagrutdinov Y. A., Kazimirov A. V., Skorik E. A.* A method for estimating the explosion power of rocket fuel components based on liquefied natural gas // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 302–306.

The article uses a well-known approach to estimating the explosion power of a mixture of propellant components for launch vehicles based on liquefied natural gas. By applying the electronic balance equation, the stoichiometric ratio of rocket fuel components and its calorific value are determined. An approach is proposed to determine the efficiency coefficient of the explosion of a mixture of rocket fuel components by TNT by the method of correlation of calorific abilities.

*Key words: accident, explosion, liquefied natural gas, launch vehicle, rocket fuel components, calorific value.*

*Kabanov E. L.* Problems of deployment and functioning of the management system of collective peacekeeping forces, ways to solve them // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 307–312.

The article deals with the problems of deployment and functioning of the management system of the collective peacekeeping forces of the Collective Security Treaty Organization (hereinafter CSTO), and ways to solve them.

*Key words: management system of collective peacekeeping forces; management of collective peacekeeping forces; Collective Security Treaty Organization; military command and control bodies (hereinafter referred to as OMS); command posts; management tools; collective peacekeeping forces (hereinafter referred to as CMS).*

*Koksharov S. N., Mikheev O. Y., Saltykov K. B. Methodology for determining the rational number of a temporary control body of an organizational and technical military system at the tactical level // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 690. – P. 313–317.*

A methodology is presented for determining the rational number of a temporary management body of an organizational and technical military system, the implementation of which will make it possible to carry out a scientifically based choice of the number of officials to perform special duties as part of various functional formations of the temporary management body.

*Key words: temporary governing body, officials, rational number.*

**Авксентьев Александр Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 237-10-21.

**Александров Максим Андреевич**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

**Арсеньев Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Белов Павел Юрьевич**, доктор технических наук, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (143900, Московская обл., Балашиха, ул. Карбышева, д.8); тел.: 8 (916) 873-96-47, e-mail: belipasha@yandex.ru

**Белошицкий Александр Владимирович**, доктор педагогических наук, профессор; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394064, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А); тел.: 8 (904) 214-91-76, e-mail: alexandr\_beloshitskiy@mail.ru

**Бирюков Денис Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Букирѐв Александр Сергеевич**, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394007, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А).

**Володин Роман Сергеевич**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Воронин Олег Игоревич**, кандидат технических наук, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (143900, Россия, г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8); тел.: 8 (985) 385-94-33, e-mail: olegvoronin\_nk23@mail.ru

**Горянский Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

**Дедик Никита Александрович**, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394064, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А); тел.: 8 (920) 456-92-22, e-mail: kovboi\_91@mail.ru

**Доронин Александр Павлович**, доктор технических наук, профессор, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8(812)347-95-52.

**Загрутдинов Юрий Александрович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-41.

**Захаров Олег Олегович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Зубарев Алексей Владимирович**, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Ипполитов Сергей Викторович**, кандидат технических наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная Академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394007, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А); тел.: 8 (980) 347-88-61, e-mail: S\_Ippolitoff@mail.ru

**Кабанов Евгений Леонидович**, Военная академия Генерального штаба ВС РФ (119571, Россия, Москва, пр. Вернадского, 100), zenya-1977www@mail.ru

**Казимиров Артём Витальевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-18, e-mail: vka@mil.ru

**Какаев Виталий Викторович**, доктор военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Карагодин Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Карытко Анатолий Александрович**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

**Козлов Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

**Кокшаров Сергей Николаевич**, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-01, e-mail: vka@mil.ru

**Конищев Виталий Сергеевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Коноплёв Михаил Данилович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

**Котяшов Евгений Валериевич**, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Куваев Олег Леонидович**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Куликов Сергей Валерьевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Лавров Василий Васильевич**, кандидат технических наук, ПАО МАК «Вымпел» (125480, Россия, Москва ул. Героев Панфиловцев 10, к. 1), e-mail: lavelen@list.ru

**Лагун Андрей Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, 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

**Лизан Вячеслав Миронович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Логунов Сергей Владимирович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Лучкин Роман Сергеевич**, кандидат технических наук, ПАО МАК «Вымпел» (125480, Россия, Москва ул. Героев Панфиловцев 10, к. 1), e-mail: romluchik@mail.ru

**Мальцев Георгий Николаевич**, доктор технических, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Махов Денис Сергеевич**, доктор технических наук, Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (350063, Россия, Краснодар, ул. Красина, 4); тел.: 8 (989) 298-70-36, e-mail: sinedvoham@yandex.ru

**Мещерякова Елена Ивановна**, доктор педагогических наук, профессор; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», (394064, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А); тел.: 8 (980) 241-20-05, e-mail: elenamsol@yandex.ru

**Минаков Евгений Петрович**, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

**Миргородский Александр Николаевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Мирошник Константин Сергеевич**, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (143900, Московская обл., Балашиха, ул. Карбышева, д.8); тел.: 8 (953) 224-00-91, e-mail: wer.stv@rambler.ru

**Михеев Олег Юрьевич**, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-01, e-mail: vka@mil.ru

**Мищеряков Александр Владимирович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

**Мищеряков Сергей Владимирович**, войсковая часть 13991 (164170, Россия, Архангельская обл., г. Мирный); тел.: 8 (911) 595-63-81, e-mail: serega-ulet@rambler.ru

**Мосягин Роман Александрович**, кандидат политических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Моторин Виктор Михайлович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Нагибин Дмитрий Владимирович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87.

**Наговицына Алла Николаевна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Немыкин Олег Иванович**, кандидат технических наук, ПАО МАК «Вымпел» (125480, Россия, Москва ул. Героев Панфиловцев 10, к. 1), e-mail: olegnemykin@yandex.ru

**Николаев Юрий Александрович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 237-10-21.

**Новиков Александр Валерьевич**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197110, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Огородников Владимир Петрович**, доктор философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Пастушков Андрей Валерьевич**, кандидат педагогических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Петрич Дмитрий Олегович**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

**Петроченко Вячеслав Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Петухов Антон Иванович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Платонов Андрей Анатольевич**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87.

**Прищеп Владимир Николаевич**, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 347-96-29.

**Прохоров Максим Евгеньевич**, кандидат технических наук, ПАО МАК «Вымпел» (125480, Россия, Москва ул. Героев Панфиловцев 10, к. 1), e-mail: prokhorov\_m@mail.ru

**Репях Николай Андреевич**, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Руссу Валерий Юрьевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 347-96-87.

**Рыбаков Дмитрий Вячеславович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Рыжий Николай Витальевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Рындин Юрий Георгиевич**, кандидат технических наук, ПАО МАК «Вымпел» (125480, Россия, Москва ул. Героев Панфиловцев 10, к. 1), e-mail: yurij.ryndin@yandex.ru

**Сабиров Тимур Римович**, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87.

**Савченко Андрей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная Академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394007, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А); тел.: 8 (980) 553-07-28, e-mail: savaau@mail.ru

**Салтыков Константин Борисович**, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-01, e-mail: vka@mil.ru

**Сальников Вадим Михайлович**, кандидат технических наук, снс; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Северенко Александр Викторович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-29.

**Скорик Евгений Анатольевич**, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова (194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6, лит. Ж); тел.: 8 (812) 542-39-43, e-mail: skvg@bk.ru

**Слатова Екатерина Викторовна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Смирнов Сергей Викторович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Султанов Алексей Эдыгарович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Тараканов Михаил Николаевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Тестов Андрей Всеволодович**, ПАО МАК «Вымпел» (125480, Россия, Москва ул. Героев Панфиловцев 10, к. 1), e-mail: taimen1956@mail.ru

**Федоренко Дмитрий Сергеевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Филиппёнок Виктор Викторович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Харченко Александр Викторович**, доктор технических наук, профессор, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Харченко Владимир Алексеевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

**Хомич Иван Владимирович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Хомченков Александр Витальевич**, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (143900, Московская обл., Балашиха, ул. Карбышева, д.8); тел. 8 (999) 816-84-98, e-mail: alex\_1999@mail.ru

**Хрустова Алёна Николаевна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Цветков Алексей Владимирович**, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, (143900, Россия, Балашиха, ул. Карбышева, д. 8), тел.: 8 (981) 938-25-44, e-mail: cvetkoffff@vk.com

**Цыбульник Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны (150001, Россия, Ярославль, Московский проспект, 28); тел.: 8 (905) 135-36-29, e-mail: yavvu@mil.ru

**Чебурков Михаил Александрович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51.

**Чернявский Владимир Александрович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Шабakov Евгений Иванович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51.

**Шестаков Илья Алексеевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Шумбар Артур Владимирович**, Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (350063, Россия, Краснодар, ул. Красина, 4); тел.: 8 (988) 369-77-28, e-mail: arturshumbar@mail.ru

**Яцечко Михаил Иванович**, кандидат технических наук; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная Академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394007, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А); тел.: 8 (910) 343-61-59, e-mail: yatsechko@list.ru

**Яшков Сергей Алексеевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Алексеев Виктор Фёдорович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Алёшкин Андрей Петрович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 341-95-37, e-mail: vka@mil.ru

**Басыров Александр Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: vka@mil.ru

**Богачев Сергей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-16, e-mail: vka@mil.ru

**Горбулин Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Григорьев Андрей Николаевич**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Девяткин Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Дорохов Вячеслав Леонидович**, доктор военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Ефимов Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

**Каргу Дмитрий Леонидович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

**Козлов Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Косырев Сергей Викторович**, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Кунтурова Надежда Борисовна**, доктор педагогических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: vka@mil.ru

**Лебедев Евгений Леонидович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

**Лохвицкий Владимир Александрович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Мальцев Георгий Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Наумчик Игорь Васильевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Новиков Владимир Александрович**, доктор военных наук, профессор, действительный член Академии военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 200-44-95, e-mail: vka@mil.ru

**Новиков Евгений Александрович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: vka@mil.ru

**Огородников Владимир Петрович**, доктор философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (951) 668-24-86, e-mail: vka@mil.ru

**Панкратов Алексей Владимирович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Пирогов Сергей Юрьевич**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (964) 334-01-52, e-mail: vka@mil.ru

**Разумов Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Репях Николай Андреевич**, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Садин Дмитрий Викторович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

**Сергеев Виктор Александрович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Тарасов Анатолий Геннадьевич**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Харченко Александр Викторович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).