

**Труды Военно-космической
академии имени А. Ф. Можайского**

Выпуск 689

2023 г.

Научное рецензируемое издание

Выходит с 1942 года

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
кандидат техн. 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, доц.;
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, проф.; **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. Чусирова

Адрес:
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;
тел.: 8 (812) 347-97-05;
<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 21.12.2023.
Формат печатного листа 320×450/2.
Уч.-печ. л. 67,00. Уч.-изд. л. 33,25
Тираж 26 экз. Заказ 4130/77
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А. Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Алёшкин А. П., Владимиров В. В., Савочкин П. В., Строна А. А., Честных А. В.* Повышение разрешающей способности радиолокационной станции путем экстраполяции амплитудно-фазового распределения на раскрыве антенны методом линейного прогнозирования 6
- Вознюк В. В., Сиротин И. Н.* Способ определения координат источников непреднамеренных помех в космическом пространстве для наземных абонентских терминалов систем спутниковой связи при решении задач электромагнитной совместимости 17
- Гаврилов Д. А., Зубарев К. К., Сахно И. В., Суркис И. Ф.* Перспективы применения радиointерферометрических средств в интересах космических систем дистанционного зондирования Земли 27
- Грибков В. С., Ковалев С. В., Нестеров С. М., Скородумов И. А.* Метод измерения эффективной площади рассеяния радиолокационных объектов со сверхмалыми уровнями отражений 38
- Евсеев В. И., Лазутин Р. Ю., Шульженко А. В.* Расчет характеристик антенных систем радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли 44
- Кошкарлов А. С., Мальцев Г. Н.* Исследование условий изопланатизма наземных оптических систем с использованием моделей атмосферы 52
- Паршин М. С., Шалдаев С. Е.* Коррекция искажений поляризационных измерений поляриметрической широкополосной активной фазированной антенной решетки 60

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Андрейченко М. И., Бессалов А. В., Кушнарев Д. В., Тимощук А. С.* Анализ особенностей развития атмосферных процессов и формирования погодно-климатических условий на территории Приазовья 72
- Астапович А. В., Куничкин Д. А.* Модель преобразования координат в локальном районе на основе множественной регрессии дифференциальных искажений координатного пространства 1942 года 81
- Галкин Ф. А., Филиппских Е. Э.* Модель расчета радиолокационных изображений типовых растительных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн применительно к датчикам с высокой разрешающей способностью 90

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Пилькевич С. В.* Исследование атак, нацеленных на кражу модели искусственного интеллекта 103

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

- Абсалямов Д. Р., Мосягин Р. А., Хальметов Р. Р., Шиян А. Н.* Моделирование повторного использования теплоты выхлопных газов дизельных двигателей автономных источников электроснабжения объектов военной инфраструктуры 121
- Абсалямов Д. Р., Мосягин Р. А., Хальметов Р. Р., Шиян А. Н.* Тепловое состояние цилиндропоршневой группы дизелей автономных источников электроснабжения объектов военной инфраструктуры при высоких температурах воздуха окружающей среды 129
- Алексеев В. Ф., Морозов Е. Б.* Методика построения полигона для эталонирования гравиметрических приборов на подвижном основании 136
- Антропова А. В., Козлов В. В., Лагун А. В., Харченко В. А.* Оценивание эффективности процесса функционирования космического ракетного комплекса методом иерархической декомпозиции 142
- Болдырев К. Б., Карчин А. Ю., Петухов А. И.* Обоснование альтернативных технических решений по совершенствованию энергомассовых характеристик ракетносителей сверхлегкого класса 152
- Болдырев К. Б., Карчин А. Ю., Петухов А. И.* Обоснование требований к геометрическим параметрам оребрения вафельных обечаек несущих топливных баков ракетных блоков 159
- Булекбаева М. Ю., Гончаров П. С., Житный М. В., Зозуля Л. П.* Метод расчета координат точек пересечения траекторий техногенных фрагментов с картинной плоскостью космического аппарата 166
- Вивчарь Р. М., Есипов Е. Н., Пачин А. В., Решетников Д. В.* Методика обоснования решения по управлению устойчивым функционированием системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры 173
- Горбулин В. И., Горбулин П. В., Котьяшов Е. В., Чернявский В. А.* Метод расчета программы управления движением космическим аппаратом с двигателем ограниченной тяги при решении задач межорбитальных перелетов 187
- Горин В. А., Карагодин В. В., Хомич И. В.* Обоснование структуры и оптимизация параметров автоматического регулятора возбуждения синхронного генератора 197
- Камчалов С. С., Карагодин В. В., Рыбаков Д. В.* Системный подход к обоснованию направлений совершенствования систем электроснабжения специальных объектов космических войск 202
- Карагодин В. В., Рыбаков В. В., Рыбаков Д. В.* Способ управления режимом функционирования трансформаторной подстанции системы электроснабжения объекта с резкопеременной нагрузкой 208
- Лебедев Е. Л., Савчук С. П.* Соппротивление усталости алюминиевого сплава Д16 при наличии концентратора напряжения 215

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

<i>Дяченко В. Н., Казько А. А., Кузьмичева И. В.</i> Исследование типов цифровой грамотности у обучающихся в военно-учебном заведении	226
<i>Мусиенко С. А.</i> Технология разработки рабочей программы учебной дисциплины: единство правовых норм и творчества	234
<i>Соловьев Д. А.</i> Модель профессионального становления преподавателя военно-учебного заведения, прошедшего обучение в адъюнктуре	241

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

<i>Беседин С. М., Галипанов Р. Н., Кукушкин М. А., Поздеев Е. А.</i> Методический подход к выбору рационального варианта размещения средств мобильных организационно-технических систем управления космическими аппаратами	245
Рефераты статей	253
Сведения об авторах	261
Сведения о рецензентах	266

А. П. Алёшкин¹,
доктор технических наук, профессор;

В. В. Владимиров¹,
кандидат технических наук;

П. В. Савочкин¹,
кандидат технических наук, доцент;

А. А. Строна¹;

А. В. Честных²

¹ ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

² Научно-тематический центр № 3 АО «НПК «НИИДАР», г. Москва

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ПУТЕМ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА РАСКРЫВЕ АНТЕННЫ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Рассмотрен способ улучшения технических характеристик коротковолновых радиолокационных станций (РЛС), функционирующих в условиях сложной фоноцелевой обстановки. Показана возможность использования линейной экстраполяции амплитудно-фазового распределения на антенной решетке в задаче увеличения разрешающей способности РЛС по азимуту. Выполнено статистическое моделирование для иллюстрации результативности предложенного решения на основе представленных выражений. Проведен анализ полученных результатов на примере ситуативного группового наблюдения воздушных объектов.

Ключевые слова: коротковолновая станция, диаграмма направленности, антенная решетка, амплитудно-фазовое распределение, разрешающая способность, азимутальный портрет, метод сверхразрешения, комплексные амплитуды.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование существующих и разработка новых способов ведения боевых действий вероятным противником сводятся к эшелонированному использованию широкой номенклатуры всевозможных средств воздушно-космического нападения (СВКН). В [1] описан возможный способ применения пилотируемой и беспилотной авиации, а также ракетных комплексов различного назначения в виде массированного воздушного удара. Суть данного способа заключается в последовательном пуске СВКН четырьмя ударными эшелонами. Первый эшелон представляет наибольшую опасность для обороняющейся стороны, так как имеет задачу вывести из строя средства противовоздушной обороны (ПВО), стратегически важные объекты и объекты инфраструктуры с целью завоевания безусловного господства в воздухе, из-за чего возможность отражения всех последующих ударов сводится к минимуму или вовсе отсутствует [2].

Современные и перспективные образцы СВКН развивают высокую скорость (более 5 М), что затрудняет их ликвидацию при обнаружении средствами ПВО [3]. Это обусловлено недостатком времени на реагирование и выдачу целеуказаний для уничтожения.

Важную роль в процессе обнаружения воздушных объектов играют средства раннего предупреждения, такие как радиолокационные станции коротковолнового диапазона [4]. Задачи, возложенные на них, уникальны, их решение другими средствами затруднительно, а в некоторых случаях невозможно в первую очередь из-за дальности действия (более 2500 км) [5].

Однако в данном диапазоне волн проблематично сформировать диаграмму направленности, ширина которой позволит различать воздушные объекты, расстояние между которыми менее 30 км [6]. Поэтому, в связи с ограниченными техническими характеристиками данных

станций, актуальность приобретают исследования, направленные на разработку алгоритмических решений обработки принимаемого сигнала, обеспечивающие повышение разрешающей способности РЛС.

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА РАСКРЫВЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

На раскрыв приемной антенной решетки (АР) падает фронт волны, рассеянной наблюдаемыми воздушными объектами. В результате согласованного приема и доплеровской фильтрации принимаемого сигнала в устройстве обработки формируются суммарные комплексные амплитуды $\dot{S}(t, d)$ от Q объектов в виде набора данных. Регистрация значений осуществляется с шагом дискретизации d , равным расстоянию между приемными элементами АР, и имеет вид

$$\dot{S}(t, d) = \sum_{q=1}^Q A_d e^{jk r_d} + N_d e^{j\varphi_d}, \quad (1)$$

где A_d – амплитуда сигнала, принятого d -м элементом АР;

k – волновое число;

r_d – расстояние от наблюдаемых объектов до d -го элемента АР;

N_d – естественные шумы, формируемые внутри приемного устройства.

Фазовое распределение обрабатываемого сигнала представлено на рис. 1.

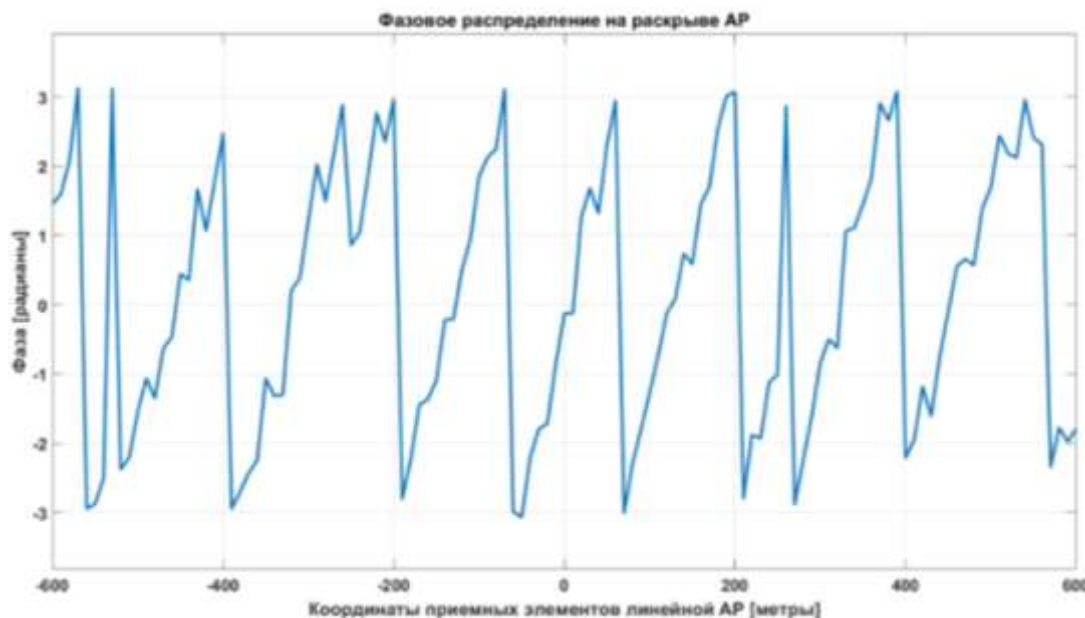


Рис. 1. Фазовое распределение принятого сигнала

Процессы согласованного приема и доплеровской фильтрации пассивной помехи (от подстилающей поверхности) в статье не рассматриваются. Согласованный прием радиолокационного сигнала осуществляется линейной АР, диаграмма направленности которой представлена на рис. 2.

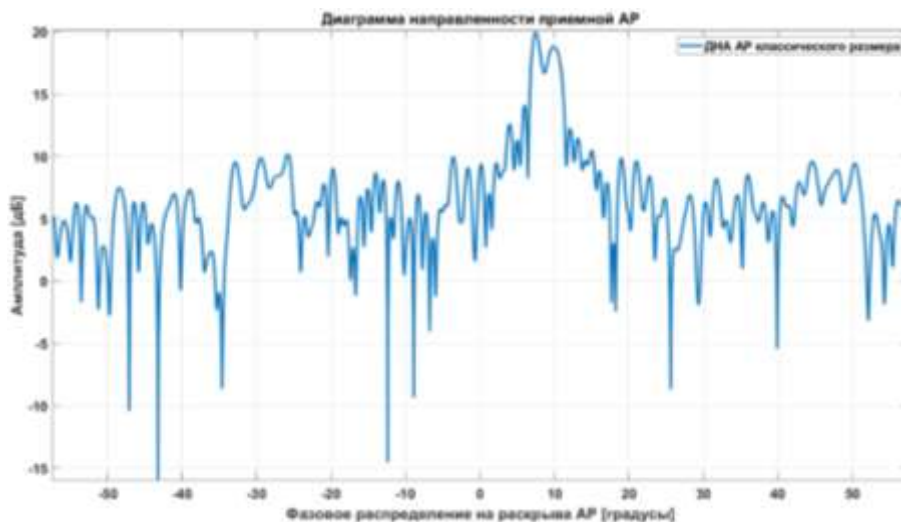


Рис. 2. Диаграмма направленности приемной антенной решетки

Как известно, эффективность функционирования радиолокационных станций зависит не только от внешних условий приема полезного сигнала, но и от технических характеристик самих систем. Немалое влияние на данный показатель оказывает архитектура исполнения. Составом используемой элементной базы определяется величина естественных шумов, формируемых внутри приемного устройства. Они имеют случайный характер и равномерный энергетический спектр. Природа возникновения объясняется хаотическим тепловым движением свободных электронов в проводниках и беспорядочным изменением плотности электронных потоков в электронных компонентах [7]. Сумма элементарных шумовых флуктуаций, поскольку в ней очень много взаимно независимых слагаемых, подчиняется нормальному закону распределения с нулевым средним значением.

Конечным результатом работы любой радиолокационной станции являются обнаружение (с требуемой вероятностью) и наблюдение (с требуемой разрешающей способностью) целей, находящихся в области ее зоны обзора [8]. Как правило, анализируются отметки на экране, которые представляют собой сжатый сигнал по определенным координатам. С целью получения азимутального портрета (диаграммы обратного рассеяния) наблюдаемых воздушных объектов необходимо выполнить дискретное преобразование Фурье комплексных амплитуд $\dot{S}(t, d)$. Результат формирования азимутального портрета представлен на рис. 3.

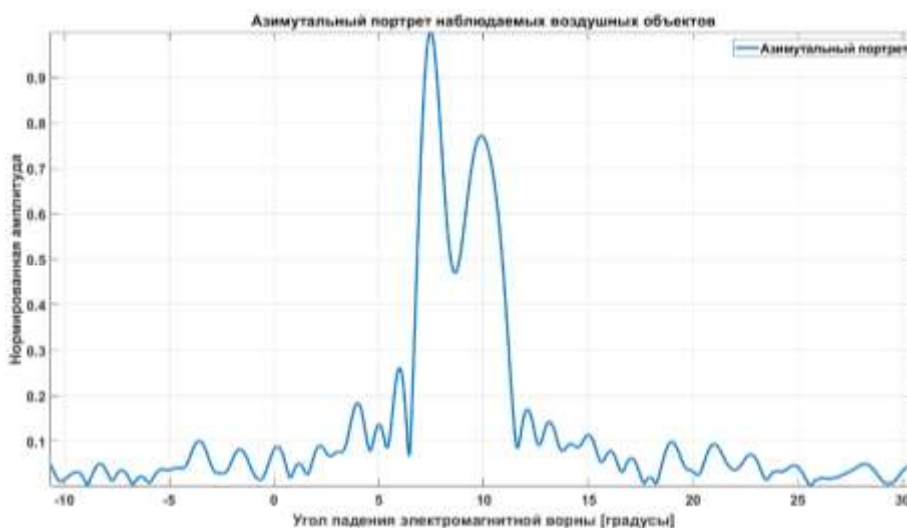


Рис. 3. Азимутальный портрет наблюдаемых воздушных объектов

Из результата моделирования (рис. 3) видно, что оператором наблюдается два воздушных объекта с азимутом 8° и 10° . Данное заключение сделано на основе критерия Рэлея [9]. Наблюдается два явных максимума, провал между которыми ниже уровня 0,707 (амплитуда нормирована к единице).

Разрешающая способность по азимуту определяется размером апертуры приемной АР и составляет порядка 1° . При пересчете в линейную компоненту данная характеристика станции достигает значения 30 км.

Для подтверждения правильности сделанного вывода о количестве наблюдаемых объектов необходимо осуществить прием сигнала в тех же условиях, но на АР большего размера, что практически невозможно. Приемные АР коротковолнового диапазона имеют сложную конструкцию и большие габариты (размеры могут достигать до 3000 м в длину и до 60 м в высоту). Увеличение размера АР приводит к повышению вероятности осуществления некогерентного приема станцией полезного сигнала.

Предположим, что апертура рассматриваемой АР имеет больший размер. Тогда очевидно, что не перехватываемое до этого излучение за пределами реального размера теперь будет приниматься апертурой большего размера и приведет к увеличению разрешающей способности за счет извлечения дополнительной информации, содержащейся в принятом волновом фронте. Увеличить объем информации в реальной АР предлагается за счет применения подхода сверхрэлеевского разрешения.

Известен довольно обширный перечень методов азимутального и дальностного различения гауссовских источников, получивших в технической литературе общее название методов со «сверхразрешением» [10–13]. Большинство из них предполагают реализацию на базе АР, однако только их сравнительный анализ позволяет определить область эффективного применения [14, 15].

Здесь предлагается обеспечить повышение разрешающей способности радиолокационной станции по азимуту путем экстраполяции амплитудно-фазового распределения на раскрытие АР методом линейного прогнозирования. Экстраполяция линейным прогнозированием представляет собой ряд вычислительных процедур, позволяющих по некоторой линейной комбинации предшествующих взвешенных отсчетов сигнала предсказать (с некоторой точностью) возможное значение отсчета за пределами реальной апертуры. На рис. 4 схематично представлен принцип линейного прогнозирования на примере исходной выборки сигнала, состоящей из D отсчетов. Размер выборки анализируемого сигнала определяется размером апертуры АР [16] и называется кадром.

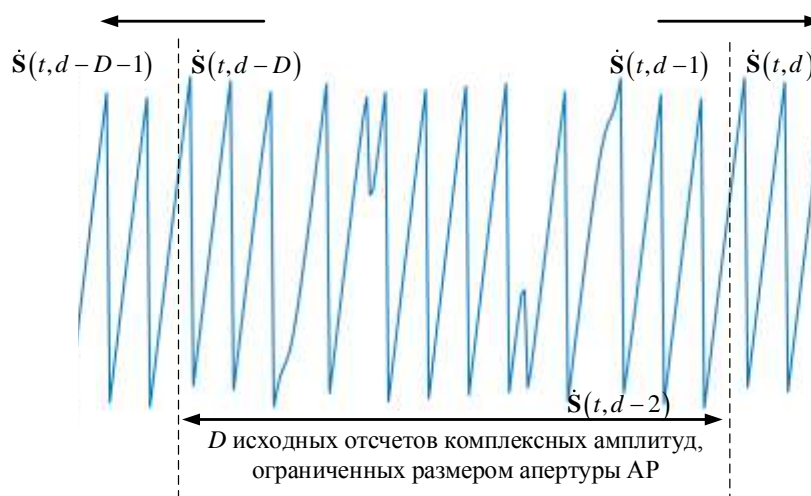


Рис. 4. Прогнозирование влево и вправо (соответствующие прогнозируемые отсчеты обведены штриховыми линиями)

Задача линейного прогнозирования может быть сформулирована следующим образом: найти коэффициенты линейного прогнозирования a_k некоторой линейной системы, на выходе которой формируется экстраполированное амплитудно-фазовое распределение $\dot{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d)$, при условии что амплитудно-фазовое распределение исходного кадра $\dot{\mathbf{S}}(t, d)$ известно, а сама система определяется разностным уравнением для прогнозирования вправо:

$$\dot{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d) = \dot{\mathbf{S}}(t, d) - \sum_{k=1}^K a_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k), \quad (2)$$

где k – порядок предсказания.

В действительности коэффициенты \tilde{a}_k будут отличаться от точных значений a_k , поэтому прогнозируемое значение $\tilde{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d)$ будет отличаться от точного $\dot{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d)$ на величину ошибки прогнозирования (остаток):

$$\varepsilon(t, d) = \dot{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d) - \tilde{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d) = \dot{\mathbf{S}}(t, d) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k). \quad (3)$$

Таким образом, для одного кадра сигнала $\dot{\mathbf{S}}(t, d)$ из D отсчетов с учетом (2) ошибка предсказания составит

$$\varepsilon(t, d) = \dot{\mathbf{S}}(t, d) - \tilde{a}_1 \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) - \dots - \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) - \dots - \tilde{a}_K \dot{\mathbf{S}}(t, d-K). \quad (4)$$

Если $\varepsilon(t, d) = 0$, тогда все отсчеты $\dot{\mathbf{S}}(t, d)$ известны и, используя (4), можно составить систему линейных уравнений при нулевых начальных условиях для одного кадра из D отсчетов:

$$\left. \begin{array}{l} d=0; \quad \tilde{a}_1 \dot{\mathbf{S}}(t, -1) + \dots + \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, -2) + \dots + \tilde{a}_K \dot{\mathbf{S}}(t, -K) = \dot{\mathbf{S}}(t, 0) \\ d=1; \quad \tilde{a}_1 \dot{\mathbf{S}}(t, 0) + \dots + \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, -1) + \dots + \tilde{a}_K \dot{\mathbf{S}}(t, 1-K) = \dot{\mathbf{S}}(t, 1) \\ \dots \\ d=D; \quad \tilde{a}_1 \dot{\mathbf{S}}(t, D-1) + \dots + \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, D-2) + \dots + \tilde{a}_K \dot{\mathbf{S}}(t, D-K) = \dot{\mathbf{S}}(t, D) \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Проанализировав систему (5), в которой число неизвестных коэффициентов равно K и все правые части известны, количество уравнений равно количеству отсчетов D на анализируемом кадре.

Линейные системы, у которых число уравнений превышает число независимых коэффициентов, называются переопределенными. Точного решения переопределенных систем не существует. Для таких систем используют метод наименьших квадратов, когда коэффициенты \tilde{a}_k находятся из системы линейных уравнений, составленных по ошибкам ζ_d во всех уравнениях ($d = 1, 2, \dots, D$). Ошибку ζ_d называют невязкой d -го уравнения. Линейные уравнения по невязкам будут иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta_1 = \dot{\mathbf{S}}(t, 1) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, 1-k); \\ \dots \\ \zeta_D = \dot{\mathbf{S}}(t, D) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, D-k). \end{array} \right. \quad (6)$$

Из (6) квадрат средней невязки (средней ошибки предсказания) составляет:

$$\zeta_{\text{ср}}^2 = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \left[\dot{\mathbf{S}}(t, d) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) \right]^2 \Rightarrow \min_{a_k}, \quad (7)$$

где коэффициенты линейного прогнозирования \tilde{a}_k должны быть такими, чтобы достигался минимум, т. е. квадрат средней невязки является функцией коэффициентов $\zeta_{\text{cp}}^2(\tilde{a}_k)$.

Условием существования минимума функции $\zeta_{\text{cp}}^2(\tilde{a}_k)$ является равенство нулю всех ее частных производных по коэффициентам \tilde{a}_k , что приводит к следующей системе линейных уравнений относительно коэффициентов \tilde{a}_k :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \zeta_{\text{cp}}^2}{\partial \tilde{a}_1} = -\frac{1}{D} \sum_{d=1}^D 2 \left[\dot{\mathbf{S}}(t, d) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) \right] \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial \zeta_{\text{cp}}^2}{\partial \tilde{a}_k} = -\frac{1}{D} \sum_{d=1}^D 2 \left[\dot{\mathbf{S}}(t, d) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) \right] \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial \zeta_{\text{cp}}^2}{\partial \tilde{a}_K} = -\frac{1}{D} \sum_{d=1}^D 2 \left[\dot{\mathbf{S}}(t, d) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) \right] \dot{\mathbf{S}}(t, d-N) = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Уравнения данной системы легко преобразуются к более удобному виду, что покажем на примере первого уравнения. Не влияющие на результат константы 2 и $-1/D$ опустим.

Результатом преобразования является уравнение

$$\sum_{d=1}^D \left[\dot{\mathbf{S}}(t, d) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) \right] \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) = 0.$$

Умножим выражение, стоящее в квадратных скобках, почленно на $\dot{\mathbf{S}}(t, d-1)$, раскроем первую сумму, оставим слева полученную сумму

$$\sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) = \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d) \dot{\mathbf{S}}(t, d-1)$$

и поменяем порядок суммирования

$$\sum_{k=1}^K \tilde{a}_k \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) = \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d) \dot{\mathbf{S}}(t, d-1).$$

Приведем к такому же виду все K уравнений и раскроем суммы по k . В результате образуется новая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{a}_1 \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) + \tilde{a}_2 \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-2) \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) + \dots + \tilde{a}_K \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-K) \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) = \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d) \dot{\mathbf{S}}(t, d-1); \\ \tilde{a}_1 \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) \dot{\mathbf{S}}(t, d-2) + \tilde{a}_2 \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-2) \dot{\mathbf{S}}(t, d-2) + \dots + \tilde{a}_K \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-K) \dot{\mathbf{S}}(t, d-2) = \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d) \dot{\mathbf{S}}(t, d-2); \\ \dots \\ \tilde{a}_1 \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) \dot{\mathbf{S}}(t, d-i) + \tilde{a}_k \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-k) \dot{\mathbf{S}}(t, d-i) + \dots + \tilde{a}_K \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-K) \dot{\mathbf{S}}(t, d-i) = \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d) \dot{\mathbf{S}}(t, d-i); \\ \dots \\ \tilde{a}_1 \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-1) \dot{\mathbf{S}}(t, d-K) + \tilde{a}_2 \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-2) \dot{\mathbf{S}}(t, d-K) + \dots + \tilde{a}_K \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d-K) \dot{\mathbf{S}}(t, d-K) = \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}(t, d) \dot{\mathbf{S}}(t, d-K). \end{array} \right.$$

где $k = 1, 2, \dots, K$, а $i = 1, 2, \dots, K$.

Поскольку рассматривается случай, когда все отсчеты $\dot{S}(t, d)$ и все содержащиеся в системе суммы также известны, имеем систему линейных уравнений относительно неизвестных \tilde{a}_k , в которой коэффициенты при неизвестных выражены суммами.

Обратим внимание на вид этих сумм и рассмотрим их, для чего введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{d=1}^D \dot{S}(t, d-k) \dot{S}(t, d-i) &= R_{ik}; \\ \sum_{d=1}^D \dot{S}(t, d) \dot{S}(t, d-i) &= R_i, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где k – номер столбца;

i – номер строки.

Ясно, что все эти суммы представляют собой коэффициент автокорреляции с различными относительными сдвигами.

Значения коэффициентов автокорреляции зависят от модуля разности значений на апертуре $|i-k|$, поэтому имеет место равенство

$$R_{ik} = R_{ki},$$

на основании которого полученную систему уравнений ($K \times K$) можно записать в компактном виде:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{11} \tilde{a}_1 + R_{12} \tilde{a}_2 + \dots + R_{1K} \tilde{a}_K &= R_1; \\ R_{12} \tilde{a}_1 + R_{22} \tilde{a}_2 + \dots + R_{2K} \tilde{a}_K &= R_2; \\ &\vdots \\ R_{i1} \tilde{a}_1 + R_{i2} \tilde{a}_2 + \dots + R_{ii} \tilde{a}_i + \dots + R_{iK} \tilde{a}_K &= R_i; \\ &\vdots \\ R_{1K} \tilde{a}_1 + \dots + R_{KK-1} \tilde{a}_{K-1} + R_{KK} \tilde{a}_K &= R_K. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Система уравнений (10), является нормальной и может быть представлена в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & R_{1K} \\ R_{12} & R_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & R_{2K} \\ & & & \vdots & & \\ R_i & \cdot & \cdot & R_{ki} & \cdot & R_{iK} \\ & & & \vdots & & \\ R_{1K} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & R_{KK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_K \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В силу единственности коэффициентов линейного прогнозирования \tilde{a}_i на рассматриваемом кадре знак тильды для удобства исключен и в дальнейшем использоваться не будет.

Матрицы (11) называются теплицевыми и могут быть записаны в более удобной форме:

$$\begin{bmatrix} R_0 & R_1 & R_2 & \cdots & R_{K-1} \\ R_1 & R_0 & R_1 & \cdots & R_{K-2} \\ R_2 & R_1 & R_0 & \cdots & R_{K-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{K-1} & R_{K-2} & R_{K-3} & \cdots & R_0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

откуда следует, что теплицева матрица полностью определяется элементами первой строки (первого столбца).

Теперь систему уравнений (11) можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} R_0 & R_1 & R_2 & \cdots & R_{K-1} \\ R_1 & R_0 & R_1 & \cdots & R_{K-2} \\ R_2 & R_1 & R_0 & \cdots & R_{K-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{K-1} & R_{K-2} & R_{K-3} & \cdots & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_i \\ \vdots \\ R_K \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Особая структура системы уравнений (13) позволяет организовать вычисление параметров линейного прогнозирования с помощью быстрых алгоритмов, из которых наибольшее пространство получил рекуррентный алгоритм Левинсона – Дарбина.

В данном алгоритме коэффициенты a_k линейного предсказателя порядка K рекуррентно вычисляются через решения разностных уравнений вида (10):

$$R_i = \sum_{k=1}^i a_k R_{i-k}, \quad i = 1, 2, \dots, K, \quad (14)$$

когда решение уравнения i -го порядка осуществляется через решение уравнения порядка $(i-1)$. Это означает, что на i -м шаге вычисляется прогнозирование i -го порядка, т. е. система уравнений (11) решается последовательно для $i = 1, 2, \dots, K$.

На основании (7), опуская несущественный для вычислений коэффициент $1/L$, квадрат погрешности прогнозирования в предсказателе i -го порядка можно записать в виде

$$E_i = \sum_{d=1}^D \left[\dot{\mathbf{S}}_i(t, d) - \sum_{k=1}^i \tilde{a}_k^{(i)} \dot{\mathbf{S}}_i(t, d-k) \right]^2, \quad (15)$$

или

$$E_i = \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}_i^2(t, d) - \sum_{k=1}^i \tilde{a}_k^{(i)} \sum_{d=1}^D \dot{\mathbf{S}}_i(t, d) \dot{\mathbf{S}}_i(t, d-k). \quad (16)$$

Подставляя в (16) определения (9), получаем для E_i иную форму представления:

$$E_i = R_0 - \sum_{k=1}^i \tilde{a}_k^{(i)} R_{i-k}, \quad i = 1, 2, \dots, K, \quad (17)$$

откуда следует, что общая погрешность представления имеет два слагаемых, из которых одно является постоянным, а другое зависит от коэффициентов прогнозирования.

Ясно также, что, во-первых,

$$E_0 = R_0 \quad (18)$$

и, во-вторых, от шага к шагу, т. е. от прогнозирования $(i-1)$ -го к прогнозированию i -го порядка полная ошибка прогнозирования уменьшается:

$$0 \leq E_i \leq E_{i-1}.$$

При выполнении рекуррентного алгоритма задаются начальные условия, являющиеся равенством полной ошибки предсказания (18).

Последовательно на i -м шаге итерации производятся вычисления по следующим рекуррентным формулам.

Рассчитывается коэффициент отражения (коэффициент частной корреляции)

$$r_i = \frac{R_i - \sum_{k=1}^K a_k^{i-1} R_{i-k}}{E_{i-1}}, \quad (19)$$

значение которого присваивается авторегрессионному коэффициенту a_i в качестве первого приближения, –

$$a_i^{(i)} = r_i. \quad (20)$$

Выполняется расчет коэффициента авторегрессионной модели на i -м шаге итерации:

$$a_k^{(i)} = a_k^{(i-1)} - r_i a_{i-k}^{(i-1)}. \quad (21)$$

Полная ошибка на i -м шаге итерации определяется как

$$E_i = (1 - r_i^2) E_{i-1}. \quad (22)$$

С каждым шагом порядок предсказания увеличивается на единицу до тех пор, пока он не достигнет величины K . Окончательное решение определяется на K -м шаге соотношением

$$a_k = a_k^{(K)}, \quad 1 \leq k \leq K. \quad (23)$$

После получения результатов окончательных вычислений коэффициентов авторегрессионной модели a_k выполняется расчет экстраполированных значений комплексных амплитуд $\dot{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d)$:

– вправо

$$\dot{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d + d_{\text{экстр}}) = -\dot{\mathbf{S}}(t, d + d_{\text{экстр}}) + a_k(m+1)\dot{\mathbf{S}}(t, d + d_{\text{экстр}} - m); \quad (24a)$$

– влево

$$\dot{\mathbf{S}}_{\text{экстр}}(t, d - d_{\text{экстр}}) = -\dot{\mathbf{S}}(t, d - d_{\text{экстр}}) + a_k(m+1)\dot{\mathbf{S}}(t, d - d_{\text{экстр}} + m), \quad (24б)$$

где m – определяет выбор авторегрессионного параметра и принимает значения от 1 до $k-1$.

На рис. 5 представлен результат обработки полезного сигнала. Из количества дополнительно появившихся отсчетов комплексных амплитуд сделаем вывод, что после выполнения предложенных процедур увеличилось количество информации о наблюдаемых объектах в азимутальном направлении в два раза, что соответствует приему сигнала на АР, виртуально размером в два раза больше реальной.

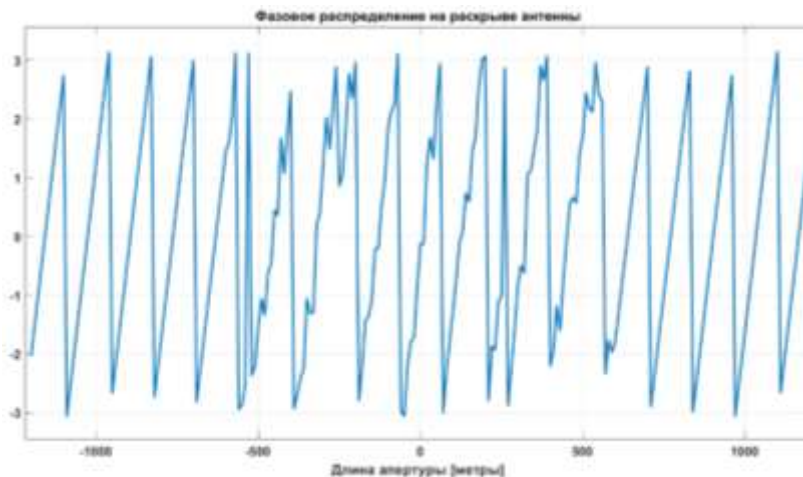


Рис. 5. Фазовое распределение принятого сигнала после экстраполяции

После выполнения дискретного преобразования Фурье экстраполированной выборки данных получен азимутальный портрет (рис. 6), представляющий собой диаграмму обратного рассеяния наблюдаемых объектов.

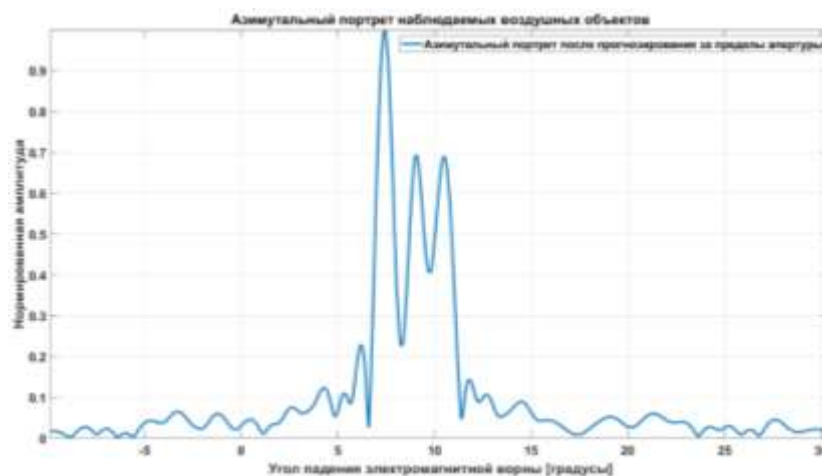


Рис. 6. Азимутальный портрет наблюдаемых воздушных объектов после экстраполяции комплексных амплитуд

Как видно, в результате экстраполяции амплитудно-фазового распределения на раскрытие антенной решетки методом линейного прогнозирования и формирования на его основе азимутальных портретов появились явные провалы по уровню ниже 0,707. Это свидетельствует об увеличении разрешающей способности и появлении возможности наблюдения трех объектов отдельно. Максимумы сформированных спектров расположены на отметках, соответствующих азимутальному направлению расположения целей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение предложенного в статье способа увеличения разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции амплитудно-фазового распределения на раскрытие антенной решетки методом линейного прогнозирования позволило значительно улучшить характеристики станции. Исходя из представленных результатов моделирования, разрешающая способность по азимуту увеличилась в два раза, так как объем данных при выполнении пространственно-временной обработки соответствует объему данных, принятых на АР размером в два раза большим, чем истинная.

Список используемых источников

1. Михайлов Д. В. Война будущего: возможный порядок нанесения удара средствами воздушного нападения США в многосферной операции на рубеже 2025–2030 годов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2019. – № 12. – С. 44–52.
2. Баушев С. В., Раскин А. В., Волгин В. А. Основы организации и ведения борьбы со средствами воздушно-космического нападения : учеб. пособие. – СПб. : Балтийская печать, 2017. – 176 с.
3. Семёнов С. С. Гиперзвуковые ударные системы нового поколения // Армейский вестник: интернет-журнал новостей об армии, вооружении и технике. – URL: <https://army-news.ru/2013/03/giperzvukovye-udarnye-sistemy-novogo-pokoleniya/> (дата обращения: 20.02.2023).

4. *Литвинов С. В., Глинкин И. А., Власов Ю. М.* Структура построения приемного комплекса РЛС загоризонтного обнаружения // *Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» – «Муром 2021».* – Муром, 2021. – С. 358–366.
5. *Алебастров В. А., Борсоев В. А., Шустов Э. И.* Развитие отечественной загоризонтной радиолокации. – М., 2016. – 248 с.
6. *Фабрицио Джузетте А.* Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. – М. : Техносфера, 2018. – 936 с.
7. Радиолокационные системы : учебник / В. П. Бердышев [и др.]; под ред. В. П. Бердышева. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 400 с.
8. Основы построения РЛС РТВ / В. Н. Тяпкин [и др.]; под общ. ред. В. Н. Тяпкина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 536 с.
9. Обнаружение радиосигналов / П. С. Акимов [и др.]; под ред. А. А. Колосова. – М. : Радио и связь, 1989. – 288 с.
10. *Владимиров В. В.* Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрыва антенной решетки оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника.* – 2022. – Т. 5, № 1. – С. 28–35.
11. Метод повышения разрешающей способности и точности радиолокационных угловых измерений на основе последовательной пространственно-временной обработки принимаемых сигналов / А. П. Алешкин [и др.] // *Информационно-управляющие системы.* – 2020. – № 2(105). – С. 37–45.
12. *Чижов А. А.* Сверхрэлеевское разрешение. – в 2 т. – М. : КРАСАНД, 2010. – Т. 1 : Классический взгляд на проблему. – 96 с.
13. *Марпл-мл. С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
14. *Чистяков В. А., Куприц В. Ю.* Сверхразрешение в антенных решетках // *Решетневские чтения.* – 2016. – Т. 1. – С. 310–312.
15. *Гейбриэл У. Ф.* Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных антенных решеток // *Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике.* – 1980. – Т. 68, № 6. – С. 19–32.
16. Основы цифровой обработки сигналов : курс лекций / А. И. Солонина [и др.]. – Изд. 2-е, испр. и перераб. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 768 с.

В. В. Вознюк,
кандидат технических наук, доцент;
И. Н. Сиротин,
кандидат технических наук

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Предложен способ определения координат источников непреднамеренных помех (ИНП) в космическом пространстве для абонентских терминалов (АТ) систем отечественной спутниковой связи. В качестве ИНП рассматривается спутниковый ретранслятор с прямым переносом спектра сигнала. Для реализации способа применяются четыре передатчика, расположенных на земной поверхности и излучающих эталонные сигналы в направлении предполагаемого ИНП, а также пункт радиомониторинга (ПРМ) для приема переизлученных в направлении Земли эталонных сигналов. Для определения координат ИНП применяется разностно-дальномерный метод (РДМ).

Проведены имитационное моделирование и анализ точности рассматриваемого способа определения координат ИНП в космическом пространстве для АТ систем отечественной спутниковой связи при различных вариантах расположения передатчиков эталонных сигналов (ПЭС) и ПРМ с учетом неточных данных об их местоположении.

Ключевые слова: источник непреднамеренных помех, радиомониторинг, электромагнитная совместимость.

ВВЕДЕНИЕ

К 2030 году с учетом космических аппаратов (КА), запущенных и планируемых к запуску такими компаниями, как SpaceX, OneWeb, Amazon и StarNet, общее количество КА только на околоземной орбите может достигнуть ста тысяч [1, 2].

Частотный диапазон, в котором работают космические аппараты различного назначения, составляет до 50 ГГц [3].

Для устойчивого развития и универсального доступа к электросвязи и информационным сетям для населения всего мира создан Международный союз электросвязи (МСЭ). МСЭ определяет стандарты и дает рекомендации, касающиеся сферы радио- и телекоммуникаций. Стандарты, разрабатываемые МСЭ, не являются обязательными, однако рекомендации этого союза широко поддерживаются всеми странами-участницами [4].

С учетом приведенных выше факторов актуальной является задача обеспечения требований электромагнитной совместимости при работе систем спутниковой связи, передаче и ретрансляции данных разных государств.

Активные исследования по геолокации ведутся в Российской Федерации, США, Великобритании, Японии, Германии, Франции [5–9]. При этом предполагается, что источник радиополучения (ИРИ) находится на земной поверхности, а в качестве так называемых опорных точек, которые необходимы для решения задачи координатометрии разностно-дальномерным методом и (или) методом, основанным на измерении разности доплеровских сдвигов частоты, используются спутниковые ретрансляторы, расположенные на геостационарной орбите [6].

Для точного определения координат ИРИ на земной или морской поверхности предъявляются требования к точности координат опорных точек – спутниковых ретрансляторов.

В работе [10] рассмотрена возможность применения пассивной системы определения ко-

ординат СР разностно-дальномерными методами и делается вывод о том, что для определения координат наземных ИРИ с точностью в несколько километров требуется точность координат СР порядка 100 м.

В работе [5] указано, что определение координат основного и смежного СР возможно с помощью данных формата TLE, который определен группировкой NORAD. Однако в условиях, когда данные TLE устарели или недоступны потребителю, применение разностно-дальномерного метода ОМП ИРИ не представляется возможным.

В материалах [5] приведен способ определения координат СР суммарно-дальномерным способом, где в качестве опорных точек выбраны три опорные реперные станции (ОРС). Итогом исследований является, в частности, обоснование требований к размещению ОРС в подсистеме определения координат СР. Частные результаты по точности определения местоположения ИРИ варьируются в пределах от 1 до 100 км, при этом расстояния между ОРС составляют 1000 км.

В общем случае для обеспечения измерений при ОМП ИРИ в пространстве необходимо иметь четыре опорных точки, что позволяет организовать три независимые пространственные базы [8].

Исходя из анализа материалов [5–10], актуальными являются задачи рассмотрения вопроса исследования точности определения координат ИРИ, который находится в космическом пространстве, разностно-дальномерным методом при выборе в качестве опорных точек четырех передатчиков эталонных сигналов, расположенных на земной поверхности, и формирования требований к ПЭС по их территориальному разному.

В представленной работе ИРИ находится в космическом пространстве. В рамках проводимых исследований моделируется следующая ситуация: источником радиоизлучения является спутниковый ретранслятор СР₁ на околоземной орбите, который передает радиосигнал от абонентского терминала АТ₁ к АТ₂ (расположены на земной поверхности) и создает при этом непреднамеренные помехи для АТ₃ и АТ₄, работающих в другой системе связи, но в смежных или даже пересекающихся частотных диапазонах. При этом принимается допущение, что воздействие непреднамеренных помех может осуществляться как по основному, так и по боковым лепесткам диаграммы направленности приемной антенны абонентских терминалов (рис. 1).

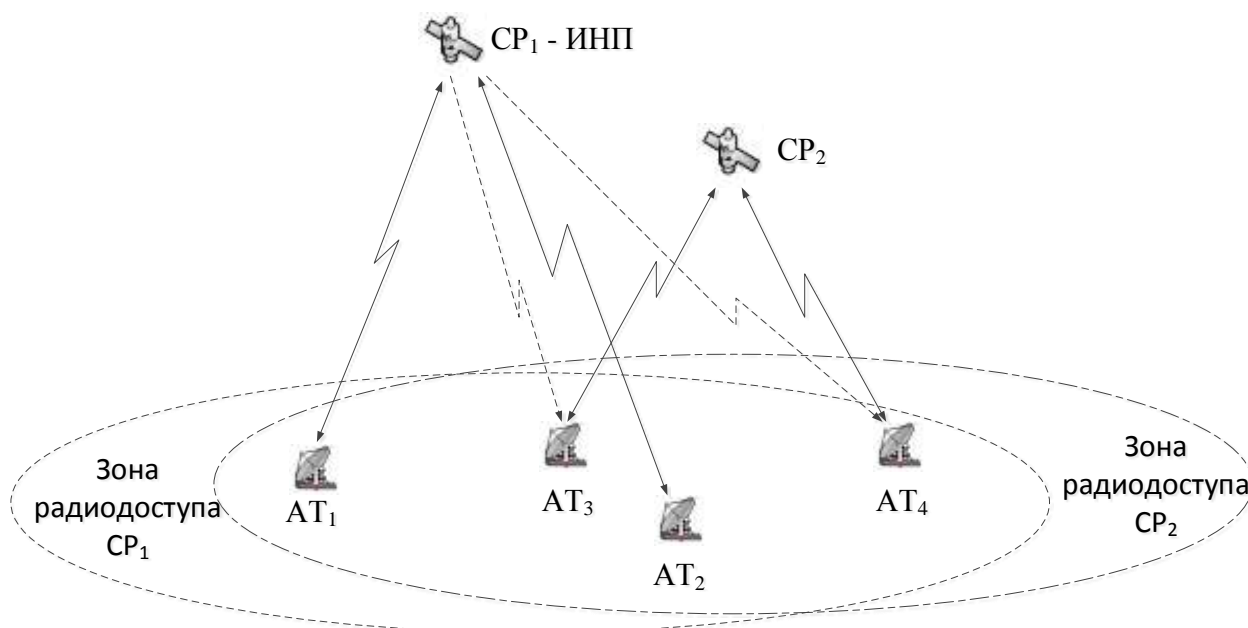


Рис. 1. Пример взаимного расположения спутниковых ретрансляторов и абонентских терминалов двух отечественных систем спутниковой связи

На рис. 1 схематично изображены две системы связи (АТ1 – СР1-ИНП – АТ2 и АТ3 – СР2 – АТ4) и зоны радиодоступа для каждой из этих систем. На рисунке видно, что при близком расположении орбит зоны радиодоступа имеют пересечение, что может создавать предпосылки к нарушению требований электромагнитной совместимости (ЭМС). Для принятия организационных и/или технических мер по обеспечению ЭМС необходимо определить точные координаты ИНП и установить принадлежность ИНП к известной космической системе.

Для определения координат ИНП предлагается применять классический РДМ по схеме, представленной на рис. 2. Передатчики эталонных сигналов (ПЭС) ПЭС1 – ПЭС4 излучают эталонные сигналы в направлении предполагаемого нахождения ИНП, известного с ошибкой. ИНП принимает сигналы передатчиков и переизлучает их в направлении земной поверхности, где также располагается пункт радиомониторинга. При этом предполагается, что на ИНП обработка сигналов на борту не производится. Переизлученные сигналы принимаются ПРМ, где измеряются временные задержки между их приходом. Далее происходит определение координат ИНП путем применения РДМ [9, 10].

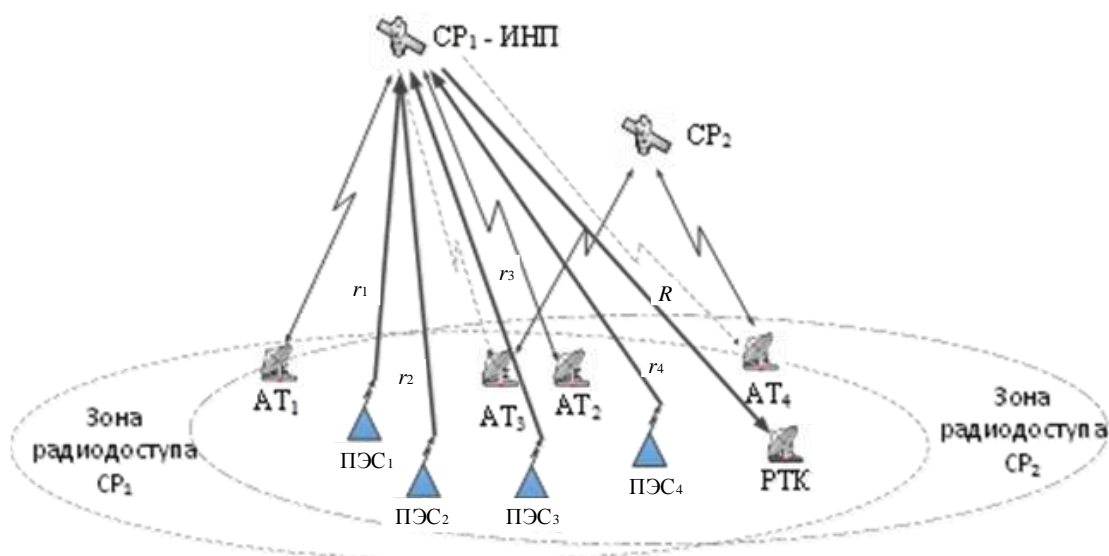


Рис. 2. Пример взаимного расположения спутниковых ретрансляторов, абонентских терминалов, передатчиков эталонных сигналов и ПРМ

Необходимо отметить, что под эталонными сигналами подразумеваются уникальные для каждого излучателя радиосигналы с расширенным спектром на основе некоррелированных псевдослучайных последовательностей.

Для того чтобы оценить возможность применения предлагаемого способа и установить ограничения на его использование, необходимо исследовать, как влияет размещение передатчиков и ПРМ на земной поверхности на ошибку определения местоположения источника непреднамеренных помех, расположенного в околоземном космическом пространстве.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НАЗЕМНЫМ АБОНЕНТСКИМ ТЕРМИНАЛАМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

В формальном виде записывается и решается следующая система уравнений, описывающая механизм образования временных задержек сигнала при распространении по разным каналам, связанным с опорными точками в виде ПЭС и ПРМ [9, 10]:

$$\begin{cases} r_2 - r_1 = \Delta r_{21}, \\ r_3 - r_1 = \Delta r_{31}, \\ r_4 - r_1 = \Delta r_{41}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь r_i – расстояние от i -го ПЭС до ИНП, $i=1, 2, 3, 4$;
 Δr_{j1} – разность расстояний от j -го ПЭС до ИНП, $j=2, 3, 4$,

$$\Delta r_{j1} = c\tau_{j1},$$

где τ_{j1} – временные задержки прихода сигналов от 1-го и j -го ПЭС;
 c – скорость распространения электромагнитной волны.

В соответствии с рис. 2, расстояния r_i от i -го ПЭС до ИНП и R от ИНП до ПРМ определяются по известным выражениям:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad (2)$$

$$R = \sqrt{(x - x_{\text{ПРМ}})^2 + (y - y_{\text{ПРМ}})^2 + (z - z_{\text{ПРМ}})^2}, \quad (3)$$

где x, y, z – неизвестные координаты ИНП;
 x_i, y_i, z_i – координаты ПЭС, $i=1 \dots 4$;
 $x_{\text{ПРМ}}, y_{\text{ПРМ}}, z_{\text{ПРМ}}$ – координаты ПРМ.

Необходимо отметить, что все эталонные сигналы помимо разных путей распространения в направлении ПЭС $_i$ – ИНП проходят одинаковые расстояния R в направлении ИНП – ПРМ, и поэтому в системе уравнений (1) расстояние R не фигурирует, так как в процессе составления (1) эти расстояния сокращаются.

Система уравнений (1) может быть преобразована к линеаризованному виду, содержащему классические линейные уравнения [11–13]:

$$\begin{cases} x(x_2 - x_1) + y(y_2 - y_1) + z(z_2 - z_1) = bx_1 - \Delta r_{21}r_1, \\ x(x_3 - x_1) + y(y_3 - y_1) + z(z_3 - z_1) = bx_2 - \Delta r_{31}r_1, \\ x(x_4 - x_1) + y(y_4 - y_1) + z(z_4 - z_1) = bx_3 - \Delta r_{41}r_1, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$bx_1 = 0.5(\rho_2^2 - \rho_1^2 - \Delta r_{21}^2), \quad bx_2 = 0.5(\rho_3^2 - \rho_1^2 - \Delta r_{31}^2), \quad bx_3 = 0.5(\rho_4^2 - \rho_1^2 - \Delta r_{41}^2),$$

$$\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}, \quad i=1, 2, 3, 4. \quad (5)$$

Значения x, y, z , полученные в результате решения системы уравнений (4), линейно зависят (т. е. являются функциями) от неизвестного значения r_1 :

$$x(r_1) = b_{0x} + b_{1x}r_1, \quad y(r_1) = b_{0y} + b_{1y}r_1, \quad z(r_1) = b_{0z} + b_{1z}r_1, \quad (6)$$

где

$$b_{0x} = (a_{x1}b_{x1} - a_{x2}b_{x2} + a_{x3}b_{x3})/D, \quad b_{0y} = (a_{y2}b_{x2} - a_{y1}b_{x1} + a_{y3}b_{x3})/D, \quad b_{0z} = (a_{z1}b_{x1} - a_{z2}b_{x2} + a_{z3}b_{x3})/D,$$

$$b_{1x} = (a_{x2}\Delta r_{31} - a_{x1}\Delta r_{21} - a_{x3}\Delta r_{41})/D, \quad b_{1y} = (a_{y1}\Delta r_{21} - a_{y2}\Delta r_{31} - a_{y3}\Delta r_{41})/D, \quad b_{1z} = (a_{z2}\Delta r_{31} - a_{z1}\Delta r_{21} - a_{z3}\Delta r_{41})/D,$$

$$D = a_{x1}(x_2 - x_1) - a_{x2}(x_3 - x_1) + a_{x3}(x_4 - x_1),$$

$$a_{x1} = (y_3 - y_1)(z_4 - z_1) - (y_4 - y_1)(z_3 - z_1),$$

$$a_{y1} = (x_3 - x_1)(z_4 - z_1) - (x_4 - x_1)(z_3 - z_1),$$

$$a_{x2} = (y_2 - y_1)(z_4 - z_1) - (y_4 - y_1)(z_2 - z_1),$$

$$a_{y2} = (x_2 - x_1)(z_4 - z_1) - (x_4 - x_1)(z_2 - z_1),$$

$$a_{x3} = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1),$$

$$a_{y3} = (x_2 - x_1)(z_3 - z_1) - (x_3 - x_1)(z_2 - z_1),$$

$$\begin{aligned} a_{z1} &= (x_3 - x_1)(y_4 - y_1) - (x_4 - x_1)(y_3 - y_1), \\ a_{z2} &= (x_2 - x_1)(y_4 - y_1) - (x_4 - x_1)(y_2 - y_1), \\ a_{z3} &= (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1). \end{aligned}$$

Подставляя значения $x(r_1)$, $y(r_1)$, $z(r_1)$ из (6) в уравнение (2), определяем значение r_1 как решение следующего квадратного уравнения:

$$\begin{aligned} (b_{1x}^2 + b_{1y}^2 + b_{1z}^2 - 1)r_1^2 + 2r_1[b_{1x}(b_{0x} - x_1) + b_{1y}(b_{0y} - y_1) + b_{1z}(b_{0z} - z_1)] + \\ + (x_1 - b_{0x})^2 + (y_1 - b_{0y})^2 + (z_1 - b_{0z})^2 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Окончательно координаты x , y , z могут быть найдены подстановкой полученного из (7) r_1 в уравнение (6) с возможным последующим устранением неоднозначности подстановкой в уравнение (1).

Приведенный математический аппарат (1)–(7), при условии использования в качестве опорных точек исходных данных о местоположении ПЭС_{*i*}, обеспечивает получение искоемых координат ИНП. Для описания ограничений на применимость предлагаемого способа для описанной ситуации необходимо провести исследования по оценке точности определения местоположения ИНП с учетом априорной неопределенности координат ПЭС_{*i*} и ПРМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

Для исследования точности рассмотренного способа разработаны алгоритм и программа определения местоположения ИНП на основе классического РДМ, учитывающие неточность априорных знаний координат ПЭС_{*i*}, ПРМ и ошибки измерения временных задержек прихода эталонных сигналов при прохождении расстояния ПЭС_{*i*} – ИНП – ПРМ. Также программа позволяет накапливать статистические данные об ошибках при определении координат ИНП.

В работе в качестве ограничения принято, что для системы излучателей эталонных сигналов ошибка синхронизации может быть снижена до любого приемлемого уровня, поэтому в проводимом исследовании не учитывается.

При проведении моделирования формируются три вида ошибок:

- ошибка измерения временных задержек прихода эталонных сигналов при прохождении расстояния ПЭС_{*i*} – ИНП – ПРМ (δ_1);
- ошибка местоположения ПЭС_{*i*} (δ_2);
- ошибка местоположения ПРМ (δ_3).

При моделировании предполагалось, что случайные величины δ_1 , δ_2 , δ_3 имеют нормальный закон распределения мгновенных значений с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическими отклонениями (СКО) σ_r , σ_{xyz} ПЭС, σ_{xyz} ПРМ.

СКО σ_r длины канала распространения сигнала на направлениях ПЭС_{*i*} – ИНП – ПРМ определяется выражением

$$\sigma_r = \sigma_\tau c, \quad (8)$$

где σ_τ – СКО измерения временных задержек прихода эталонных сигналов.

СКО координат ПЭС_{*i*} в ГСК σ_{xyz} ПЭС определяется выражением

$$\sigma_{xyz} \text{ ПЭС} = \sigma_x \text{ ПЭС} = \sigma_y \text{ ПЭС} = \sigma_z \text{ ПЭС} = \frac{\sigma_k \text{ ПЭС}}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

где σ_k ПЭС – ошибка местоположения ПЭС (ошибки координат ПЭС по каждой оси декартовой СК равновелики и некоррелированы).

Координаты ПЭС $_i$ (x_i, y_i, z_i), учитываемые в выражениях (2)–(7), рассчитываются следующим образом:

$$x = x_{\text{ист}} + \delta_2(\sigma_{xyz \text{ ПЭС}}), y = y_{\text{ист}} + \delta_2(\sigma_{xyz \text{ ПЭС}}), z = z_{\text{ист}} + \delta_2(\sigma_{xyz \text{ ПЭС}}). \quad (10)$$

Ошибка по координатам РТК $\delta_3(\sigma_{xyz \text{ ПРМ}})$ формируется аналогично ошибке $\delta_2(\sigma_{xyz \text{ ПЭС}})$.

С учетом принятых моделей ошибок выражение (1) преобразуется к виду

$$\begin{cases} r_2 - r_1 = \Delta \tilde{r}_{21}(\delta_1, \delta_2, \delta_3), \\ r_3 - r_1 = \Delta \tilde{r}_{31}(\delta_1, \delta_2, \delta_3), \\ r_4 - r_1 = \Delta \tilde{r}_{41}(\delta_1, \delta_2, \delta_3). \end{cases} \quad (11)$$

Определение текущего значения расстояния между истинными и рассчитанными координатами ИНП осуществляется выражением

$$\Delta R_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2}, \quad (12)$$

где x_n, y_n, z_n – координаты ИНП, рассчитанные на каждом n -м шаге работы алгоритма.

В разработанной программе выполняется следующая последовательность действий:

- ввод исходных данных по истинным значениям координат ПЭС $_i$, ПРМ и ИНП, количества циклов N имитационного моделирования, исходных данных по модели ошибок ($\sigma_{xyz \text{ CP}}$, $\sigma_{xyz \text{ ПРМ}}$, σ_r);
- расчет расстояний R_i, r_i и Δr_{j1} и внесение в них ошибок с соответствующими значениями СКО $\sigma_{xyz \text{ CP}}$, $\sigma_{xyz \text{ ПРМ}}$, σ_r ;
- расчет координат ИНП и ΔR_n в соответствии с количеством циклов N ;
- статистическая обработка массива данных по точности определения местоположения ИНП, под которой понимается определение среднего значения величины пространственной ошибки $\Delta \bar{R}$ на множестве истинных и рассчитанных координат ИНП, рассчитываемой по выражению

$$\Delta \bar{R} = \sum_{n=1}^N (\Delta R_n) / N; \quad (13)$$

- накопление статистических данных по точности определения координат ИНП за рассматриваемый промежуток времени движения спутниковых ретрансляторов:

$$\Delta \bar{R}(t) = [\Delta \bar{R}(t_1), \Delta \bar{R}(t_2), \dots, \Delta \bar{R}(t_k)].$$

ЧАСТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для того чтобы применять описанный выше способ необходимо установить время для зон совместной радиовидимости ИНП эталонными передатчиками и радиотехническим комплексом в течение суток.

Частные результаты работы программы, разработанной в среде Matlab, приведены на рис. 3.

На рис. 3,а приведены результаты определения временных интервалов в течение суточного цикла движения ИНП, учитывающие совместную зону радиовидимости (ЗРВ) для эталонных ПЭС и ПРМ.

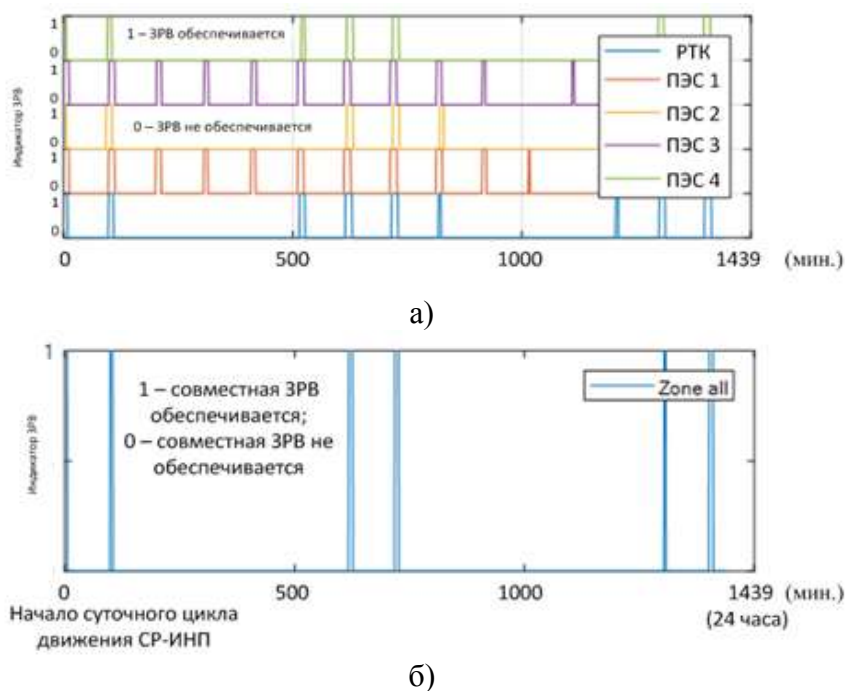


Рис. 3. Пример индикации совместной ЗРВ передатчиками эталонных сигналов и пунктом радиомониторинга источника непреднамеренных помех в течение суточного цикла движения ИНП:
а – отдельно для каждого ПЭС и ПРМ; б – для всех ПЭС и ПРМ

Анализ суточного цикла движения ИНП показал:

- ИНП в зону радиовидимости каждого ПЭС попадает от 7 до 11 раз (рис. 3,а);
- определены шесть временных интервалов, учитывающих условие совместной ЗРВ для четырех ПЭС, ПРМ и ИНП, которые составляют от 5 до 15 мин. (рис. 3,б).

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИНП

При моделировании использовались следующие исходные данные:

- исходные данные по модели ошибок: $\sigma_{xyz \text{ ПРМ}} = \sigma_{xyz \text{ ПЭС}} = 5 \text{ м}$, $\sigma_t = 3.3 \cdot 10^{-9} \text{ с}$;
- количество испытаний при моделировании для каждой конфигурации ПЭС_i, ПРМ и ИНП в фиксированный момент времени $N=1000$;
- высота орбиты ИНП – 700 км (для исследований смоделирована траектория движения КА-ИНП);
- временной интервал между рассматриваемыми положениями ИНП составляет 1 мин.

Результаты моделирования показали, что при размещении ПЭС «в линию» точность определения координат ИНП составляет более 200 км, что можно считать неприемлемым результатом. Поэтому при имитационном моделировании ПЭС расположены в виде четырехугольника и расстояние между передатчиками $R_{\text{ПЭС}i}$ варьируется в пределах от 10 до 550 км ($\bar{R}_{\text{ПЭС}}$ – усредненное расстояние между рассматриваемыми ПЭС). Результаты исследования влияния расстояний между ПЭС на точность определения координат ИНП приведены в табл. 1–4. При этом в приведенных таблицах $\Delta \bar{R}_1$ получено путем усреднения всех значений $\Delta \bar{R}$ каждой минуты из рассматриваемых временных интервалов. Частный пример поверхности ошибок определения координат ИНП приведен на рис. 4.

Таблица 1

Ошибки определения координат ИПП при моделировании ($\bar{R}_{\text{ПЭС}} \approx 550$ км)

Временные интервалы, мин	1–7	516–521	615–624	717–722	1305–1311	1404–1413
$\Delta\bar{R}_1$, м	827	631	331	154	818	728

Таблица 2

Ошибки определения координат ИПП при моделировании ($\bar{R}_{\text{ПЭС}} \approx 230$ км)

Временные интервалы, мин	1–7	516–521	615–624	717–722	1305–1311	1404–1413
$\Delta\bar{R}_1$, м	3 718	3 537	1 482	2 425	1 521	2 824

Таблица 3

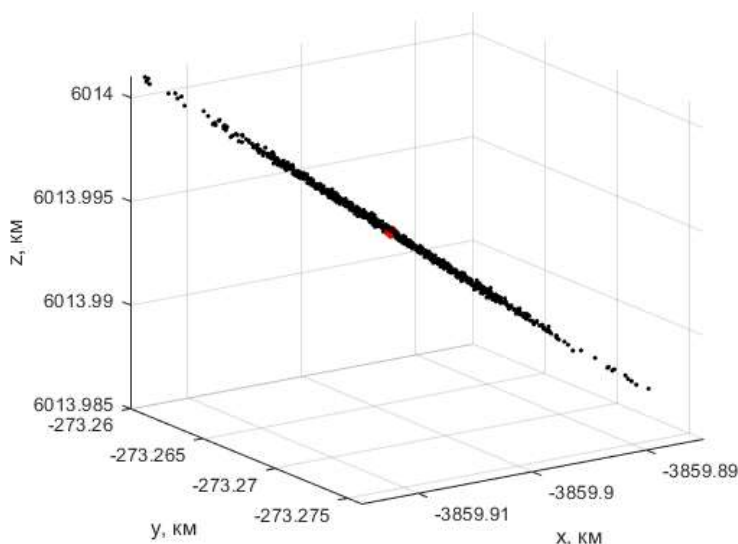
Ошибки определения координат ИПП при моделировании ($\bar{R}_{\text{ПЭС}} \approx 110$ км)

Временные интервалы, мин	1–7	516–521	615–625	717–722	1304–1311	1404–1413
$\Delta\bar{R}_1$, м	37 762	28 390	39 076	4 832	16 756	12 671

Таблица 4

Ошибки определения координат ИПП при моделировании ($\bar{R}_{\text{ПЭС}} \approx 10$ км)

Временные интервалы, мин	1–8	516–521	615–625	717–722	1304–1312	1404–1413
$\Delta\bar{R}_1$, км	>100	>100	>100	>100	>100	>100

Рис. 4. Пример поверхности ошибок определения координат ИПП ($\Delta\bar{R} = 3$ м)

Анализ результатов, приведенных в табл. 1-4, показал, что при принятых исходных данных и расположении ПЭС на расстоянии $\bar{R}_{\text{ПЭС}}$ порядка 550 км точность ОМП ИПП составляет от 154 до 827 м, при $\bar{R}_{\text{ПЭС}} \approx 230$ км – от 1,5 до 3,7 км, при $\bar{R}_{\text{ПЭС}} \approx 110$ км – от 5 до 39 км, при $\bar{R}_{\text{ПЭС}} \approx 10$ км – более 100 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ материалов, приведенных в [5–10], а также частные результаты имитационного моделирования подтвердили возможность применения разностно-дальномерного способа для определения координат источников непреднамеренных помех в космическом пространстве при решении задач электромагнитной совместимости. При этом учитывается допущение, что в качестве источника непреднамеренных помех рассматриваются спутниковые ретрансляторы с прямым переносом частот. Также для каждой конкретной ситуации необходимо изначально проверять путем расчетов возможность обнаружения ретранслированных сигналов с учетом энергопотенциала передатчика спутникового ретранслятора и чувствительности средства радиомониторинга.

Результаты исследований позволили установить ограничения на применимость приведенного способа определения координат ИНП и сделать следующие обобщающие выводы.

1. При размещении ПЭС и ПРМ на одной широте и равномерном распределении по долготе от 10 до 20 градусов через 2,5 градуса точность определения координат составляет более 200 км, что является неприемлемым результатом.

2. Точность определения координат источников непреднамеренных помех в космическом пространстве при размещении ПЭС в виде четырехугольника может достигать значений менее 1 км.

3. Изменение позиции станции радиоконтроля относительно четырех ПЭС практически не влияет на результаты определения координат ИНП, так как при использовании разностно-дальномерного метода и расчете разностей дальностей расстояния по линии ПЭС – ПРМ сокращаются.

4. На точность определения координат ИНП влияет так называемый геометрический фактор, учитывающий места размещения ПЭС на земной поверхности и текущее положение ИНП.

5. Очевидным результатом проведенного исследования влияния сокращения расстояния между ПЭС на точность ОМП КА является увеличение ошибки определения координат КА, но при условии неизменности ошибки измерения временных задержек. С учетом того, что потенциальные точности определения временных задержек сигналов на ПРМ от ПЭС составляют порядка 10^{-10} с [14], для обеспечения требуемой точности определения координат ИНП необходимо искать компромисс между возможностями приемной аппаратуры пункта радиомониторинга и их разносом в пространстве.

Список используемых источников

1. К 2025 году число спутников на орбите Земли вырастет до 70 тысяч. – URL: <https://rg.ru/2023/04/26/iurij-borisov-k-2025-godu-chislo-sputnikov-na-orbite-zemli-vyrastet-do-70-tysiach.html> (дата обращения: 19.07.2023).

2. Через 10 лет на околоземной орбите будет уже около 70 тысяч спутников. – URL: <https://www.ixbt.com/news/2022/08/18/cherez-10-let-na-okolozemnoj-orbite-budet-uzhe-okolo-70-tysjach-sputnikov.html> (дата обращения: 19.07.2023).

3. Решение ГКРЧ № 21-60-01 от 29 ноября 2021 года. – М., 2021. – 362 с.

4. Международный союз электросвязи. – URL: <https://www.un.org/ru/ecosoc/itu/> (дата обращения: 19.07.2023).

5. Севидов В. В., Чемаров А. О. Определение координат спутников-ретрансляторов в разностно-дальномерной системе геолокации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2015. – № 3. – С. 41–47.

6. Анализ возможностей использования геостационарных спутников-ретрансляторов для решения задач радиомониторинга / С. Н. Агиевич [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 672. – С. 48–59.

7. Семенюк С. С., Печурин В. В., Саниев Р. Р. Оценивание возможностей повышения точности определения местоположения космических аппаратов разностно-дальномерным методом путем аппроксимации оценок координат // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 41–48.

8. Абакумов А. Н., Семенюк С. С. Исследование влияния геометрической конфигурации разностно-дальномерной системы на точность определения местоположения абонентских терминалов спутниковых систем связи // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 644. – С. 40–50.

9. Сиротин И. Н., Вознюк В. В., Зайцев С. А. Модифицированный разностно-дальномерный способ определения местоположения источников помех системам спутниковой связи на основе принципа пространственно распределенной ретрансляции сигналов и помех // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму. – 2020. – Вып. 3–4 (141–142). – С. 43–52.

10. Варгаузин В. А., Кистанов П. А., Щербинина Е. А. Пассивные методы определения координат спутников на геостационарной орбите // Сборник докладов 76-й Научно-технической конференции СПбНТО РЭС имени А. С. Попова. – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. – С. 50–53.

11. Клименко Н. Н. Современные низкоорбитальные космические аппараты для геолокации и идентификации источников радиоизлучений // Воздушно-космическая сфера. – 2018. – № 2(95). – С. 48–57.

12. Коростелев А. А., Клюев Н. Ф., Мельник Ю. А. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов / под ред. В. Е. Дулевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Сов. радио, 1978. – 608 с.

13. Космические траекторные измерения. Радиотехнические способы измерений и математическая обработка данных / П. А. Агаджанов [и др.]; под ред. П. А. Агаджанова. – М. : Сов. радио, 1969. – 504 с.

14. Ворошилин Е. П., Миронов М. В., Громов В. А. Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1(21), ч. 2. – С. 23–28.

Д. А. Гаврилов¹,
кандидат технических наук;
К. К. Зубарев¹,
кандидат технических наук;
И. В. Сахно¹,
доктор технических наук, профессор;
И. Ф. Суркис²,
кандидат физико-математических наук

¹ ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

² Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ИНТЕРЕСАХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрены принципы и оценена возможность использования технологии, основанной на радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, для повышения точности навигационно-баллистического обеспечения космических систем дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: радиоинтерферометр со сверхдлинной базой, дистанционное зондирование Земли.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для поддержки работы космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используется широкий спектр средств измерения текущих навигационных параметров (ТНП), включая как системы наземного базирования, так и космического базирования с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). При использовании координатного метода управления точность решения целевой задачи, связанной с движением космического аппарата, напрямую зависит от точности его местоположения, которая, в свою очередь, зависит от точности траекторных измерений.

Один из способов улучшения точности определения орбиты КА ДЗЗ заключается в использовании технологии радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Эта технология позволяет использовать высокоточные угломерные (или разностно-дальномерные) измерения в системе уравнений по определению начальных условий вектора состояния КА.

Кроме того, перспективным направлением использования РСДБ технологий может являться реализация методов радиовидения (инверсного синтеза) для получения изображений космических объектов в радиодиапазоне длин волн.

В России существует национальная РСДБ сеть – радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» [1, 2], который состоит из трех радиоастрономических обсерваторий: «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары» (рис. 1). Комплекс объединен связующими волоконно-оптическими линиями с Центром управления, сбора и обработки данных и образует глобаль-



Рис. 1. Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО»

ный радиотелескоп с эффективным диаметром «зеркала» более 4400 км. Разработкой и эксплуатацией комплекса занимается Институт прикладной астрономии РАН (г. Санкт-Петербург). В перспективе к комплексу будет добавлен пункт колокации в г. Уссурийске, создаваемый в рамках ОКР «Квазар-У». Он будет включать сдвоенный 13-метровый радиотелескоп.

Кроме того, подпрограммой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» Государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России» на 2021–2030 годы, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 20 марта 2021 года № 422, предусмотрены опытно-конструкторские работы в интересах специальных потребителей (по линии Минобороны России), предполагающие в том числе развитие комплекса средств определения и прогнозирования параметров вращения Земли, измерения текущих навигационных параметров ГНСС ГЛОНАСС и космической геодезической системы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РСДБ ДЛЯ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Главным достоинством РСДБ-систем является высокая угловая разрешающая способность при определении направления на источник радиосигнала. Так, например, при использовании «короткой» базы существующего комплекса «Квазар-КВО» ширина диаграммы направленности для L1 диапазона ГНСС ГЛОНАСС составляет 0,019 угл. с. При этом линейное разрешение при использовании «короткой» базы на дальности 20000 км составляет 1,86 м (на дальности 1000 км – 9,3 см). А при использовании «длинной» базы комплекса ширина диаграммы направленности составляет 0,0087 угл. с, при этом линейное разрешение на дальности 20000 км составляет 0,85 м (на дальности 1000 км – 4,25 см).

Указанные значения разрешающей способности комплекса характеризуют инструментальную точность измерения ТНП, которая может быть улучшена, примерно на два порядка, в зависимости от реализации схемы слежения за фазой сигналов. А при наличии радиоизлучающей аппаратуры на борту КА появляется возможность дополнительно уточнять параметры опорного сигнала, используемого в алгоритмах обработки информации, с помощью наземной сети пассивных антенных систем.

С целью оценки возможности использования РСДБ-технологии для реализации высокоточных траекторных измерений был проведен космический эксперимент по определению относительного времени запаздывания сигналов космических аппаратов ГНСС ГЛОНАСС с помощью комплекса «Квазар-КВО».

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ РСДБ-СИСТЕМ

Для анализа возможности программной обработки измерительной информации были получены от ИПА РАН файлы в формате Mark5B. Записи были сделаны при наблюдении НКА ГЛОНАСС № 7 тремя радиотелескопами, расположенными в радиообсерваториях ИПА РАН («Светлое», «Зеленчукская», «Бадары»), 7 мая 2017 года на тактовой частоте 32 МГц (полоса сигнала – 16 МГц) и разрядности АЦП 2 бита.

Схема проведения космического эксперимента представлена на рис. 2.

Обработка производилась средствами *Matlab* двумя способами: при реализации «классической» для навигационной аппаратуры потребителей ГНСС ГЛОНАСС схемы слежения за параметрами сигнала стандартной точности (СТ) с использованием опорного псевдодальномерного кода и модифицированной схемы – слежением за разностным сигналом.

Пример слежения за параметрами сигнала при реализации «классической» схемы слежения – задержкой (DLL) и частотой (PLL) – представлен на рис. 3, 4 и в табл. 1.

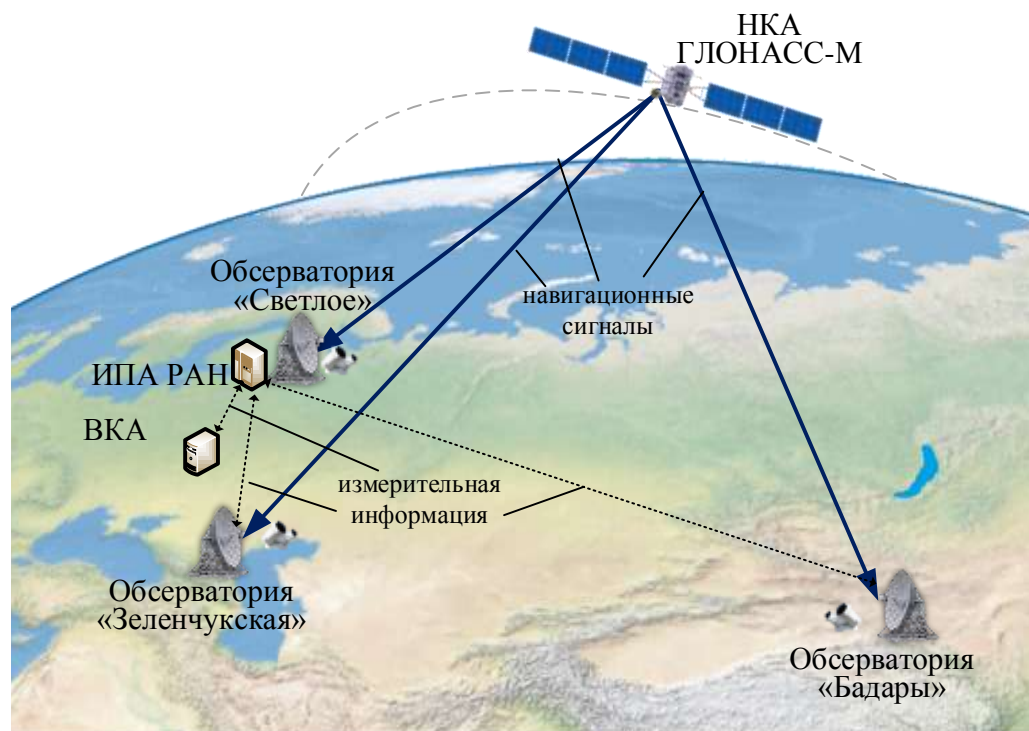


Рис. 2. Схема проведения космического эксперимента по сопровождению НКА ГЛОНАСС

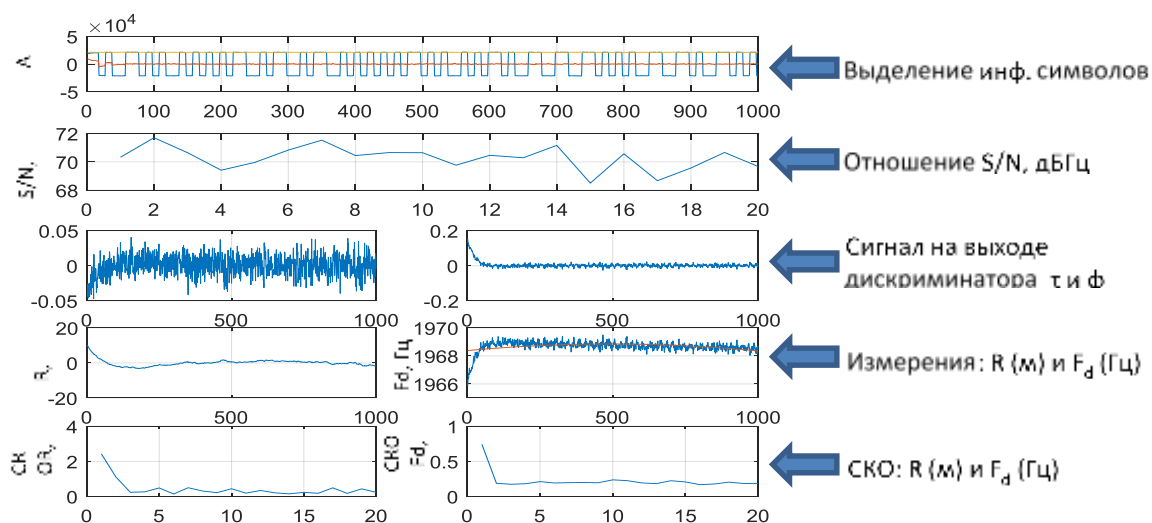


Рис. 3. Пример слежения за параметрами сигнала на интервале 1 с

На рис. 3 обозначены (сверху вниз):

- сигнал с выхода коррелятора (смена фазы соответствует информационным символам);
- отношение сигнал/шум, дБГц (статистика на интервале 100 мс);
- сигнал с выхода дискриминатора задержки/фазы;
- задержка (тренд убран полиномом для визуальной оценки погрешностей измерений), м/частота Доплера, Гц;
- СКО (на интервале 100 мс) задержки, м/частота Доплера, Гц.

На рис. 4 приведены измерения псевдодальности, полученные по фазовым измерениям на интервале 4 с (в метрах, тренд убран полиномом 3-й степени) для трех радиообсерваторий. Причем для обсерватории «Зеленчукская» характерны скачки по фазе.

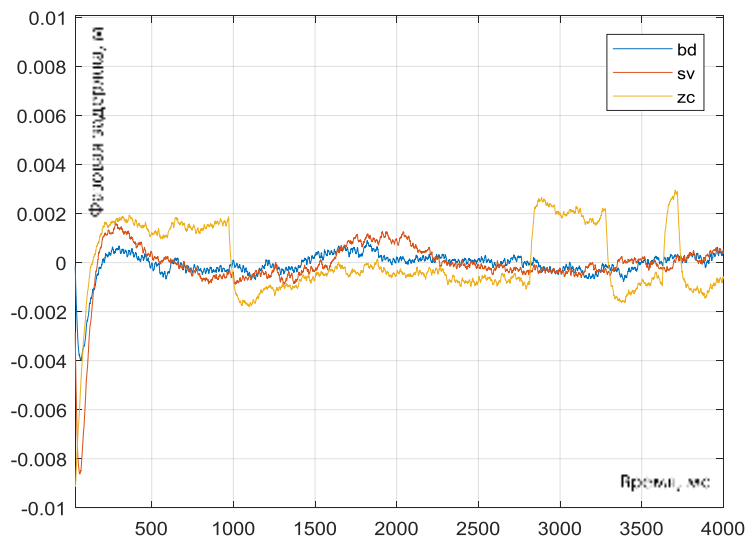


Рис. 4. Пример слежения за фазой сигнала на интервале 4 с

Таблица 1

Результаты оценки точностных характеристик, полученных в ходе космического эксперимента

Обсерватория	Отношение с/ш, дБ	СКО задержки, м (по коду)	СКО задержки, м (по фазе)	СКО частоты Доплера, Гц
«Светлое»	64,4884	0,4303	$2,1521 \cdot 10^{-4}$	0,1814
«Зеленчукская»	68,2289	0,4594	$2,7400 \cdot 10^{-4}$	0,2023
«Бадары»	70,2332	0,3918	$1,4009 \cdot 10^{-4}$	0,1910

Далее был реализован алгоритм поиска и обнаружения кросс-корреляционного (разностного) сигнала на интервале 1 мс, результаты которого представлены на рис. 5. Причем на рис. 5,б представлен увеличенный центральный пик (при поиске по задержке), в котором проявился эффект сложения сигналов стандартной (СТ) и высокой (ВТ) точности. Кроме того, отношение сигнал/шум выросло на 1,8 дБ за счет когерентного сложения СТ и ВТ сигналов ГНСС ГЛОНАСС.

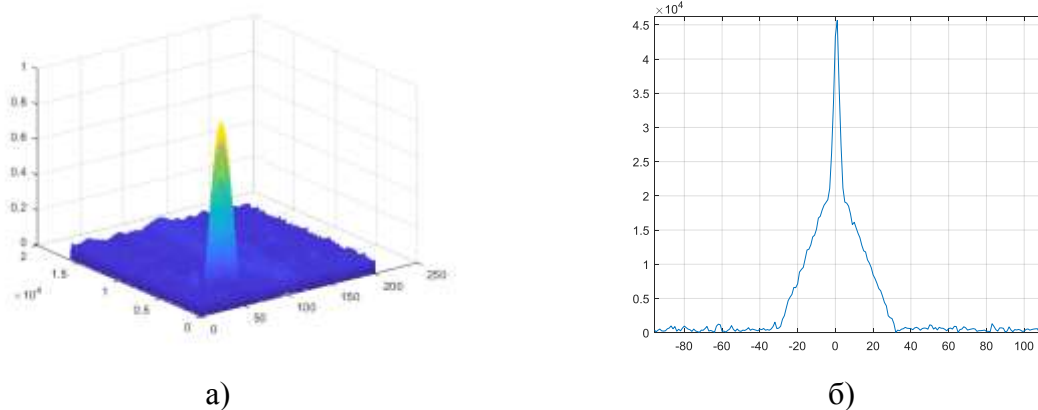


Рис. 5. Обнаружения кросс-сигнала:

а – двумерная функция неопределенности; б – сечение функции неопределенности во временной области

Далее реализовано слежение за разностным сигналом. Пример слежения за параметрами кросс-сигнала – разницей задержки (DLL) и частоты (PLL) – представлен на рис. 6 и в табл. 2.

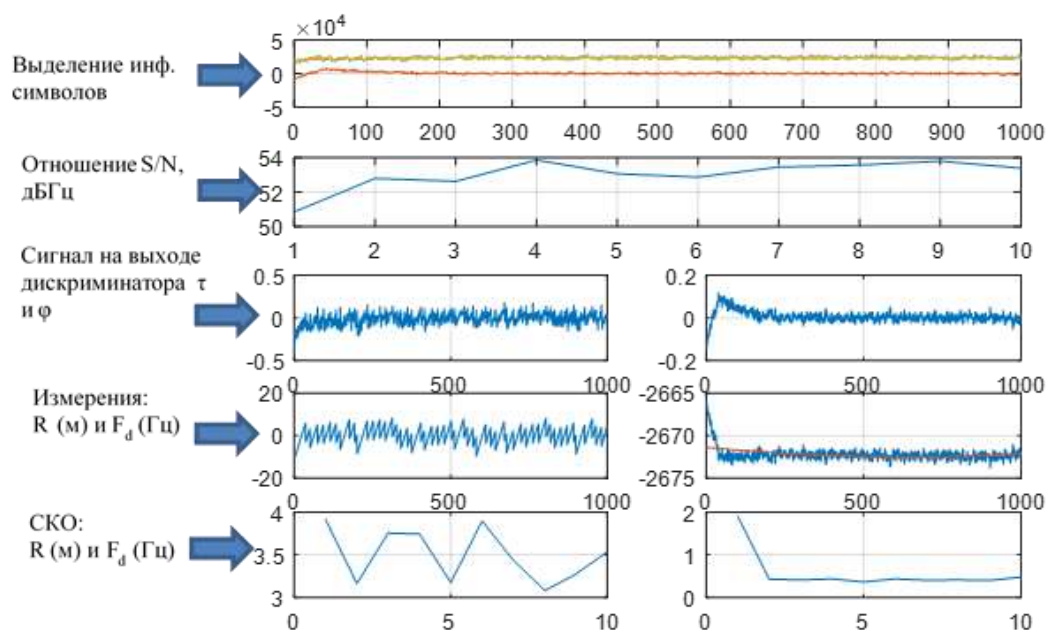


Рис. 6. Пример слежения за параметрами кросс-сигнала на интервале 1 с

На рис. 6 обозначены (сверху вниз):

- сигнал с выхода коррелятора (отсутствуют информационные символы);
- отношение сигнал/шум, дБГц (статистика на интервале 100 мс);
- сигнал с выхода дискриминатора задержки/фазы;
- задержка (тренд убран полиномом для визуальной оценки погрешностей измерений), м/частота Доплера, Гц;
- СКО (на интервале 100 мс) задержки, м/частоты Доплера, Гц.

Таблица 2

Результаты слежения за разностным сигналом

База	Отношение сигнал/шум, дБГц	СКО задержки, м (по коду)	СКО задержки, м (по фазе)	СКО частоты Доплера, Гц
Бадары – Зеленчукская	53.3241	3.2822	$3.8678 \cdot 10^{-4}$	0.4110

СКО измерения задержки имеет большие значения, чем в случае работы с псевдодальномерным кодом сигнала, так как технически пока не удалось реализовать «гладкий» генератор кода при слежении за кросс-сигналом.

Обработка сигналов проведена также на программном РСДБ-корреляторе, созданном в ИПА РАН. На рис. 7 представлены результаты обработки 500-секундного скана наблюдений – фазовые задержки на интервалах накопления одна секунда, после снятия полиномиального тренда. Заметны биения задержки с размахом 1-2 мм и периодичностью около одной минуты, их природа пока непонятна. Возможно, они связаны с неоднородностью атмосферы. СКО определения задержки после удаления биений составила 0,25 мм.

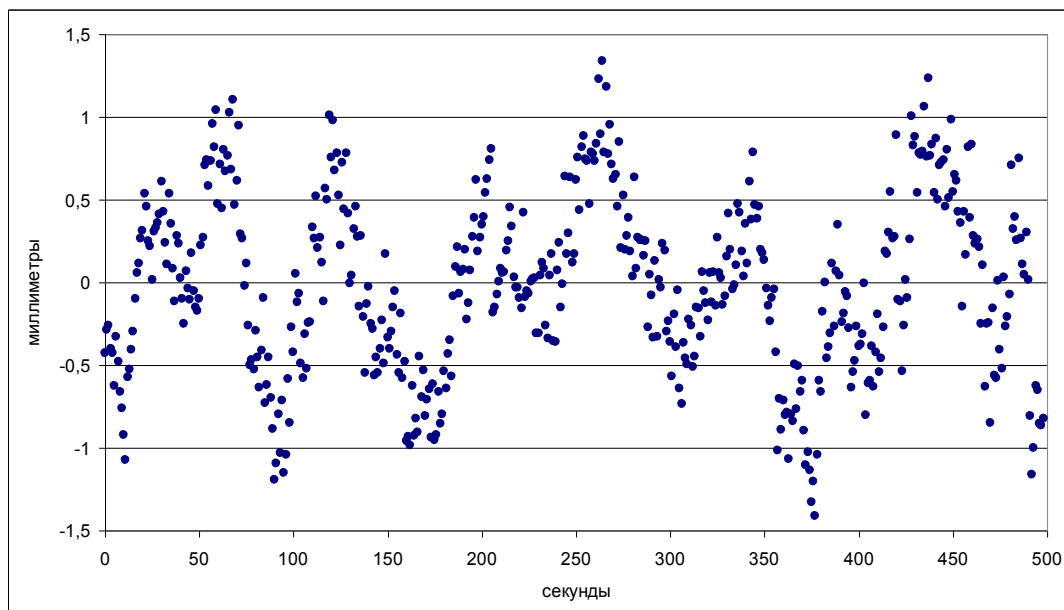


Рис. 7. Фазовая задержка (в мм) после удаления тренда, полученная Программным коррелятором РАН (РСДБ-коррелятор RASFX) на 500-секундном скане наблюдений

ИНВЕРСНЫЙ СИНТЕЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЯМОГО СИГНАЛА НКА ГЛОНАСС

Методы синтезирования, основанные на использовании перемещения и (или) вращения цели, получили название «обратное (инверсное) синтезирование».

В соответствии с теорией пространственной селекции РЛС для обеспечения разрешения по угловой координате необходимо наблюдать объекты при различных ракурсах, т. е. апертура антенны РЛС должна иметь определенный угловой размер относительно объекта. Изменение ракурса наблюдения объекта возможно не только за счет перемещения антенны РЛС, но и за счет перемещения самого объекта. При неподвижной РЛС угловой размер синтезированной апертуры в этом случае определяется скоростью перемещения объекта $V_{ц}$ и временем синтезирования T_c : $\beta_0 = V_{ц} \cdot T_c / R_{н}$.

При малых угловых размерах синтезированной апертуры β_0 разрешение по угловой координате l при работе антенны только на прием составляет $\delta l = \lambda / \beta_0$. Следовательно, $\delta l = \lambda \cdot R_{н} / V_{ц} \cdot T_c$.

Рассмотрим случай наблюдения НКА ГЛОНАСС средствами ИПА РАН при следующих исходных данных:

- частотный диапазон L_1 , $\lambda \approx 0,18$ м;
- дальность до НКА $R_{н} \approx 20 \cdot 10^6$ м;
- скорость НКА $V_{ц} \approx 4 \cdot 10^3$ м/с.

В случае наблюдения сигнала НКА ГЛОНАСС и использования информации из канала слежения алгоритм обработки компенсирует изменение дальности и частоты Доплера, тем самым «замораживая» НКА для наблюдателя. Дальнейший инверсный синтез осуществляется за счет изменения ракурса наблюдения (вращения НКА относительно наблюдателя к нормали плоскости орбиты). Расчетные значения изменений углов наблюдения и соответствующего разрешения для условий проведения эксперимента представлены в табл. 3. Расчет сделан для случая наблюдения одной станцией комплекса.

Таблица 3

Расчет изменений углов наблюдения и соответствующего разрешения

δl , м	T_c , минут	Δ аз., градус	Δ уг. места, градус	Δ аз., м	Δ уг. места, м
«Бадары»	1	0,73	0,08	14,62	130,29
	15	12,83	1,25	0,83	8,56
	60	90,81	4,40	0,12	2,43
«Зеленчукская»	1	–	–	–	–
	15	14,01	1,52	0,76	7,02
	60	2,78	6,42	3,85	1,67
«Светлое»	1	–	–	–	–
	15	14,20	0,49	0,75	21,72
	60	27,03	2,15	0,40	4,97

На рис. 8 и 9 представлены результаты синтеза РЛИ для прямого сигнала НКА ГЛОНАСС для опорной плоскости 200×200 м с шагом 1 м, ориентированной по нормали относительно центра Земли.

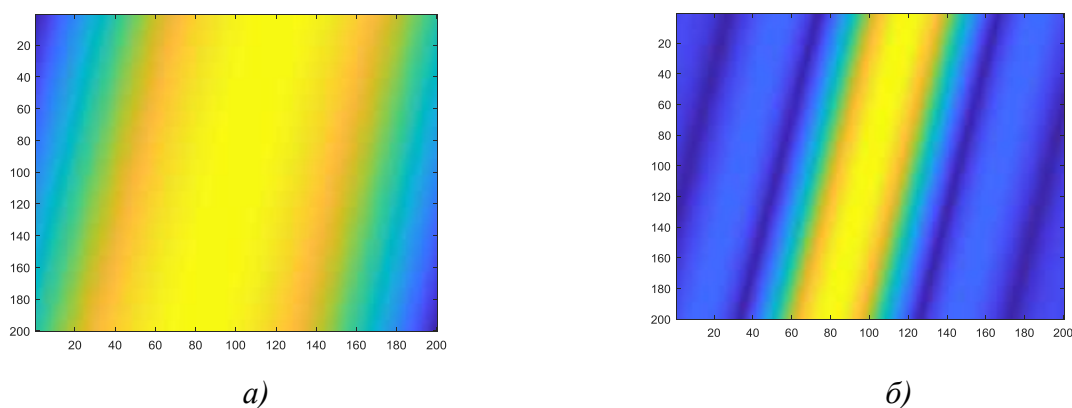


Рис. 8. Синтезированные РЛИ:
а – при накоплении 10 с; б – при накоплении 110 с

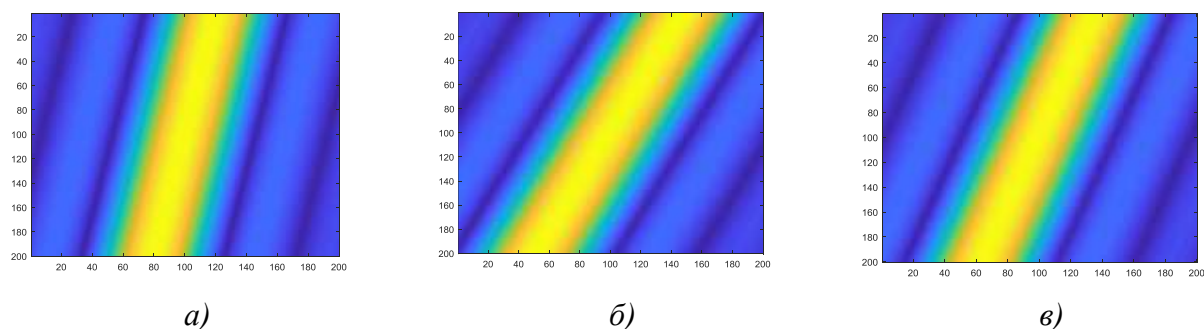


Рис. 9. РЛИ при накоплении 110 с:
а – «Бадары»; б – «Зеленчукская»; в – «Бадары» – «Зеленчукская»

Из рис. 9 можно сделать вывод, что при когерентном накоплении происходит сужение синтезированной диаграммы направленности приемной антенны (радиоизображение фокусируется), что подтверждает правильность и работоспособность реализованных алгоритмов обработки.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ ГНСС

В настоящее время глобальные и региональные навигационные спутниковые системы (ГНСС и РНСС) используются не только для навигационно-временных определений, но и для дистанционного зондирования земной и водной поверхности. В зарубежной литературе указанное направление получило название ГНСС-рефлектометрия, или сокращено GNSS-R (*Global Navigation Satellite Systems Reflectometry*).

Для использования сигналов ГНСС и РНСС в целях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используется совместная обработка сигналов прямого излучения, непосредственно передаваемых с борта навигационного космического аппарата (НКА), и сигналов, отраженных от земной поверхности.

Рассмотрим возможность реализации системы, принимающей отраженные навигационные сигналы от космических объектов. Наиболее вероятным объектом является Международная космическая станция (МКС) в виду больших габаритных размеров (большой ЭПР) и низкой орбиты. Целью предлагаемого эксперимента является проверка возможности приема отраженных от МКС сигналов ГНСС антенным комплексом радиointерферометра «Квazar-КВО» и оценка возможности реализации технологии ГНСС-рефлектометрии (ГНСС-Р).

Сигнал, излученный навигационным космическим аппаратом (НКА), отражается от МКС и принимается антенной радиointерферометра «Квazar-КВО» (рис. 10). Навигационная аппаратура потребителей (НАП) должна принимать сигнал прямого распространения от всех НКА ГНСС для последующего обеспечения когерентности сигнала отраженного канала (обеспечения длительных интервалов когерентного накопления).

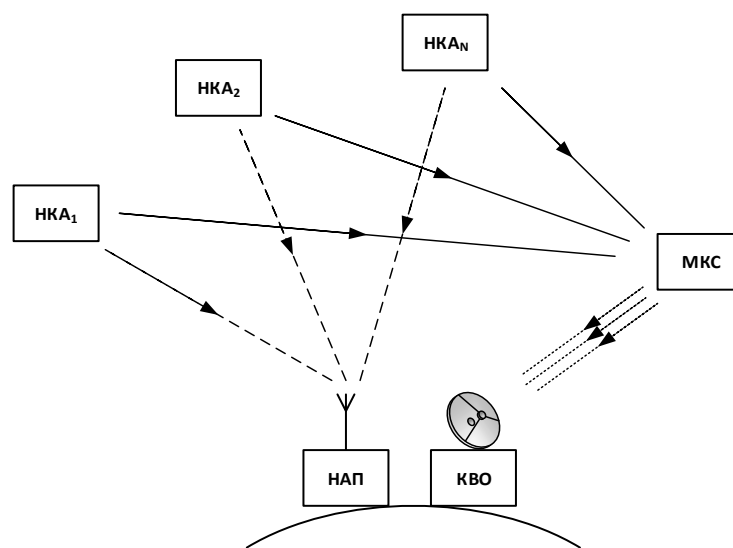


Рис. 10. Замысел эксперимента

Эксперимент предлагается разделить на 2 этапа:

1-й этап – отработка с одной антенной («классический» бистатический режим) – проверка гипотезы о возможности приема и накопления сигнала, оценка точностных характеристик, оценка энергетики канала;

2-й этап – отработка с двумя антеннами – радиointерферометрический режим.

При этом, исходя из возможностей ИПА РАН, предлагается реализовать запись четырех каналов на антенне РТ-32:

1-й канал – поляризация правая круговая, частота L_1 GPS (1575,42 МГц);

2-й канал – поляризация левая круговая, частота L_1 GPS (1575,42 МГц);

3-й канал – поляризация правая круговая, частота L_1 ГЛЮ (1602 МГц);

4-й канал – поляризация левая круговая, частота L_1 ГЛЮ (1602 МГц).

С начальными условиями, полученными с сайта NORAD проведено моделирование в среде Matlab (версия 2022b) на 10.02.2023 г. с 8:00 до 16:00 (рис. 11, 12) для двух антенн комплекса, расположенных в Светлом и Зеленчукской.

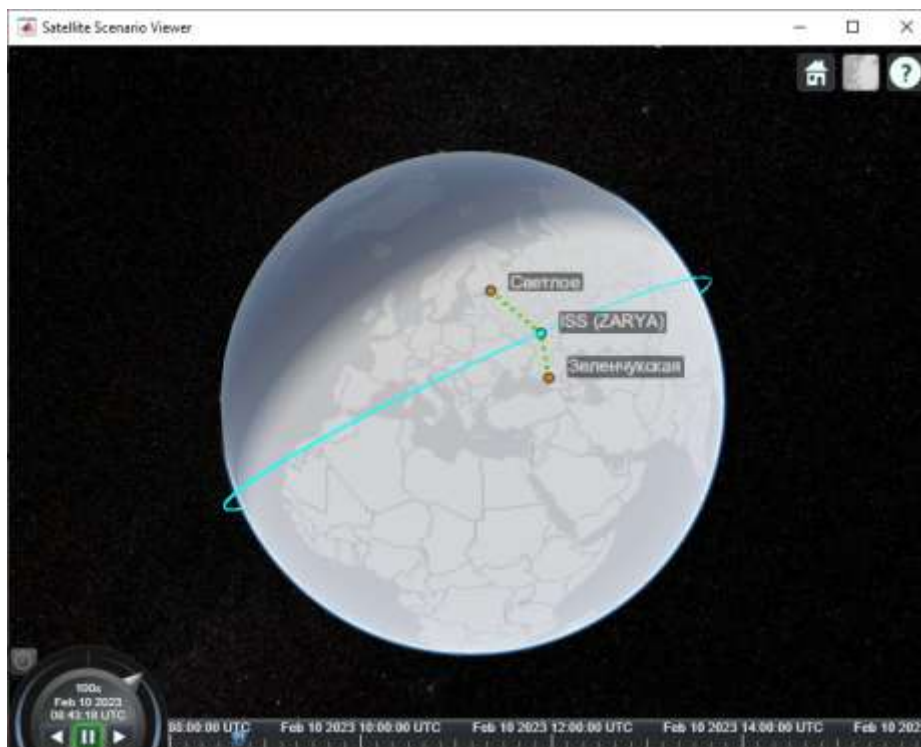


Рис. 11. Пример моделирования

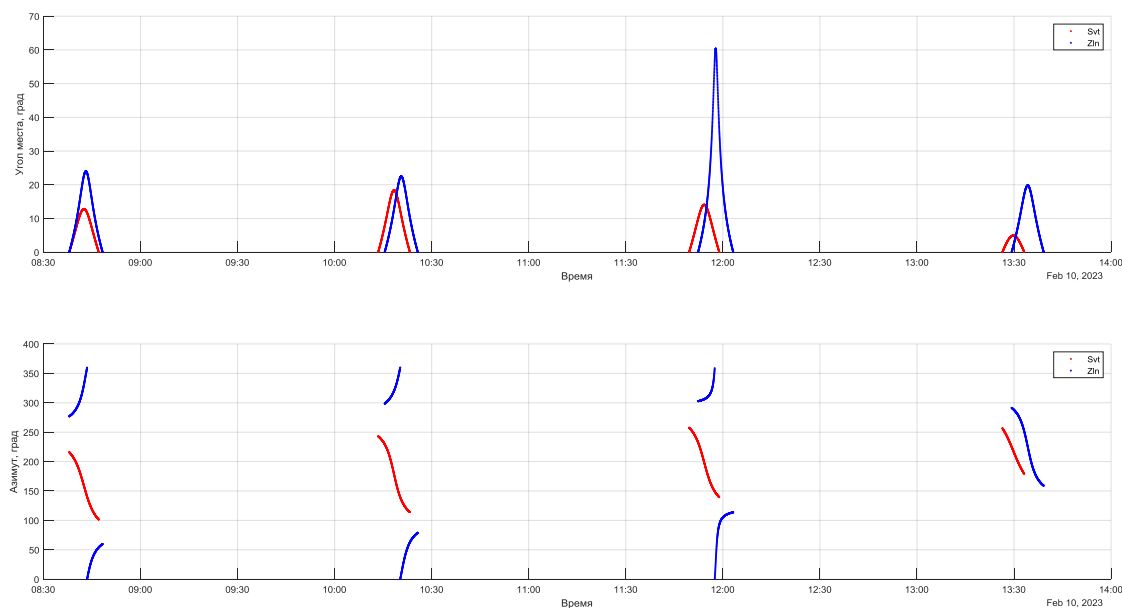


Рис. 12. Значение угла места и азимута на интервале моделирования

Для оценки возможности вращения антенны с требуемыми скоростями на рис. 13 приведены значения угловых скоростей на моменты нахождения МКС в зоне радиовидимости антенны «Квазар-КВО» (в Светлом и Зеленчукской).

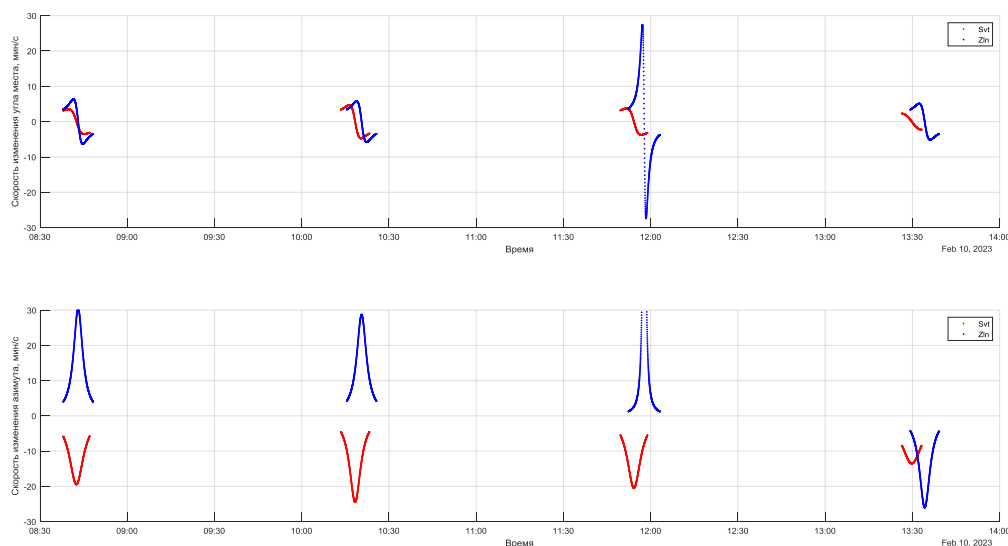


Рис. 13. Скорость изменения значения угла места и азимута на интервале моделирования

Как видно из графика на рис. 13, скорость движения антенны составляет величину до 10 мин/с, что является критическим значением для антенны РТ-32, поэтому необходимо будет осуществить подбор траектории движения МКС на восходящем витке для минимизации скорости движения антенны.

На рис. 14 приведены расчетные значения дальности до МКС и разрешения (величина диаграммы направленности (ДН) в метрах) на соответствующих дальностях до МКС.

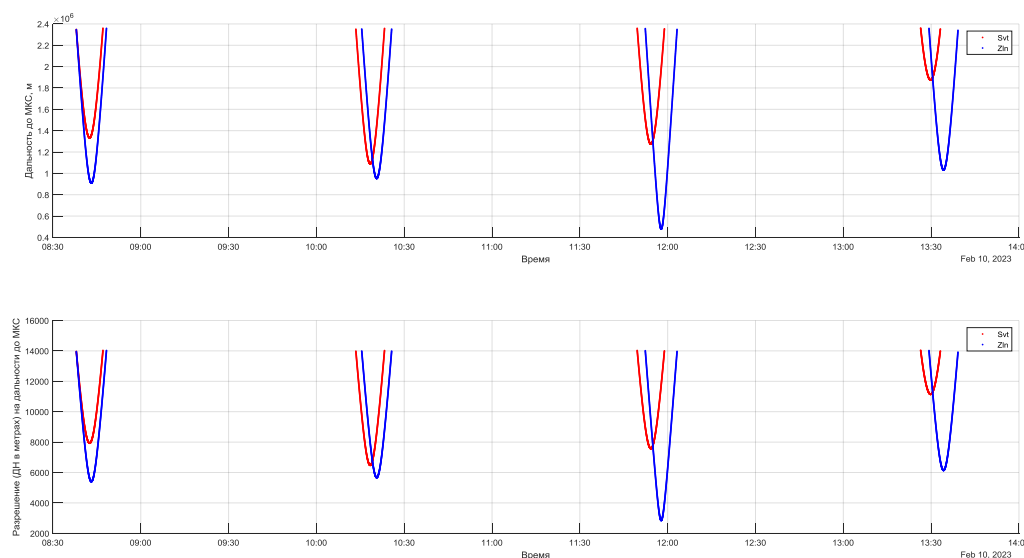


Рис. 14. Значение дальности до МКС и разрешения

Как видно из графика, разрешение изменяется в диапазоне от 14 км до 3 км. При скорости движения МКС порядка 7 км/с ошибка в целеуказаниях 2 с приведет к выходу наблюдаемого объекта из диаграммы направленности приемной антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привлечение комплекса «Квазар-КВО» позволит на постоянной основе обрабатывать алгоритмические и программные решения по совместной обработке высокоточных измерений, а также технологии взаимной калибровки измерительных средств. Возможности уникального комплекса средств целесообразно ориентировать на более тесное взаимодействие с наземным комплексом управления (НКУ) и решение следующих прикладных задач:

- 1) уточнения положения фазового центра бортового АФУ КА ДЗЗ;
- 2) повышения точности навигационно-баллистического обеспечения КА ДЗЗ;
- 3) формирования эталонных траекторий и калибровка измерительных средств в составе орбитального сегмента и НКУ;
- 4) верификации геофизических моделей;
- 5) обработки технологий рефлектометрии, не только с использованием сигналов ГНСС;
- 6) развития методов инверсного синтеза с использованием РСДБ-систем.

Результаты проведенного космического эксперимента показали, что даже в одночастотном режиме возможно обеспечить улучшение точности определения местоположения КА. Предлагается продолжить исследования по формированию и обработке расширенного состава измерений. Наиболее перспективным является вектор измерений в составе дальности, радиальной скорости, разности дальностей, направляющего косинуса базы и угловой скорости базы.

Полученные результаты, несмотря на ряд ограничений, позволяют сделать вывод о перспективности и целесообразности дальнейших исследований в области РСДБ-технологий в приложении к траекторным измерениям. Поэтому направлением дальнейших исследований станет комплексный поиск и реализация путей повышения точности, а также уточнение тактико-технических требований к РСДБ-измерителям ТНП.

Результаты обработки принятого навигационного сигнала методом инверсного синтеза подтвердили правильность и работоспособность реализованных алгоритмов обработки. Направлением дальнейших исследований является увеличение интервалов когерентного накопления сигналов и переход к «классическому» бистатистическому режиму работы.

Реализация эксперимента по приему отраженных от МКС навигационных сигналов позволит существенно расширить область применения РСДБ-систем в приложении к технологии рефлектометрии (радиовидения).

Список используемых источников

1. Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО». – URL: <http://iaaras.ru/quasar> (дата обращения: 14.02.2022).
2. Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook / N. Shuygina [et al.] // *Geodesy and Geodynamics*. – 2019. – Vol. 10, is. 2. – P. 150–156.

В.С. Грибков¹,
кандидат технических наук;
С.В. Ковалев¹,
кандидат технических наук;
С.М. Нестеров¹,
доктор технических наук, профессор;
И.А. Скородумов¹,
кандидат технических наук
¹ ЦНИИ ВКС Минобороны России, г. Тверь.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ СО СВЕРХМАЛЫМИ УРОВНЯМИ ОТРАЖЕНИЙ

Рассмотрены процесс формирования и принцип работы линейных эквидистантных и неэквидистантных решеток. Предлагается метод измерения эффективной площади рассеяния радиолокационных объектов со сверхмалыми уровнями отражений за счет увеличения отношения сигнал-фон с помощью линейных неэквидистантных решеток, размер которых ограничен пространством измерительного поля. Метод подходит для практического применения на измерительных комплексах полигонного типа и безэховых камерах.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, линейная неэквидистантная решетка, радиолокационный объект, высокоточные измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование радиолокационных характеристик возросшего в последнее время количества малозаметных целей требует новых информационных и технических решений для совершенствования существующих и разработки новых полигонных комплексов и безэховых камер. Низкие уровни эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов исследования значительно усложняют и расширяют задачи, поставленные перед современными измерительными средствами.

Известен метод измерения ЭПР с использованием импульсной локации, включающий помещение исследуемого объекта в поле, излучаемое импульсным локатором, измерение рассеянной мощности и сравнение ее с мощностью, рассеянной эталонными отражателями [1]. Указанный метод реализован на эталонном радиолокационном измерительном комплексе ЭРИК-1 ЦНИИ ВКС Минобороны России [2]. При этом экспериментальное получение значений ЭПР возможно только в случае, когда мощность полезного сигнала выше мощности фоновых отражений, т. е. ЭПР исследуемого объекта выше ЭПР фона.

Возникает необходимость решения задачи по обеспечению высокоточных измерений ЭПР объектов, соизмеримых и меньших длины волны. С этой целью на комплексе ЭРИК-1 были проведены исследования отражательных характеристик различных видов радиолокационных решеток.

ЛИНЕЙНЫЕ ЭКВИДИСТАНТНЫЕ РЕШЕТКИ

Линейная эквидистантная решетка (ЛЭР) представляет собой сложносоставную структуру из одинаковых и одинаково ориентированных объектов [3]. Считается, что в максимумах отражения от ЛЭР ее ЭПР близка к ЭПР уединенного объекта, умноженной на квадрат общего числа объектов. Требуемый для измерений ЭПР с заданной точностью уровень превышения

мощности отраженного сигнала над фоном достигается путем увеличения числа объектов в решетке.

Для ослабления взаимного влияния объектов и обеспечения максимального коэффициента направленного действия решетки шаг ЛЭР устанавливается близким к $d \approx 0,96\lambda$, где λ – длина волны радиоизлучения [4]. Однако при сверхмалых уровнях отражений возникают случаи, когда размер решеток может превышать границы измерительного поля (рис. 1).

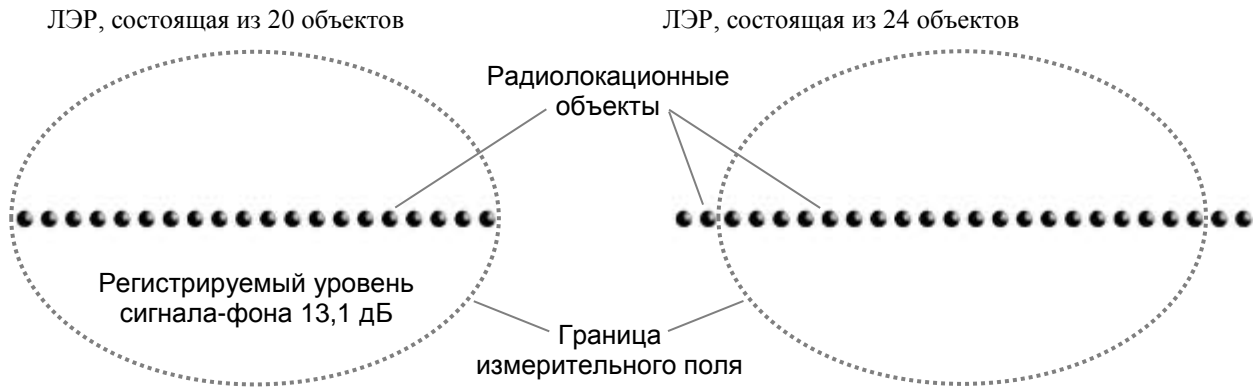


Рис. 1. Пример размещения линейных эквидистантных решеток в измерительном поле

Кроме того, из методики построения ЛЭР для измерения с заданной точностью сверхмалых уровней ЭПР объектов [5] известна зависимость ошибки измерения ЭПР δ_1 от отношения размера зоны измерения к линейному размеру ЛЭР в направлении максимального отражения:

$$\delta_1 = 1 - \sqrt{\frac{\pi}{2 \ln 2}} \frac{R \theta_{0,5}}{L} f_0 \left(\frac{L 2 \sqrt{\ln 2}}{R \theta_{0,5}} \right), \quad (1)$$

где $f_0(t)$ – функция зависимости

$$f_0(t) = \left(1 - \sqrt{2\pi} \int_0^t \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx \right);$$

L – линейный размер ЛЭР;

R – дальность локации;

$\theta_{0,5}$ – ширина гауссовской диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности.

График зависимости (1) при $\theta_{0,5} = 1^\circ$ представлен на рис. 2.

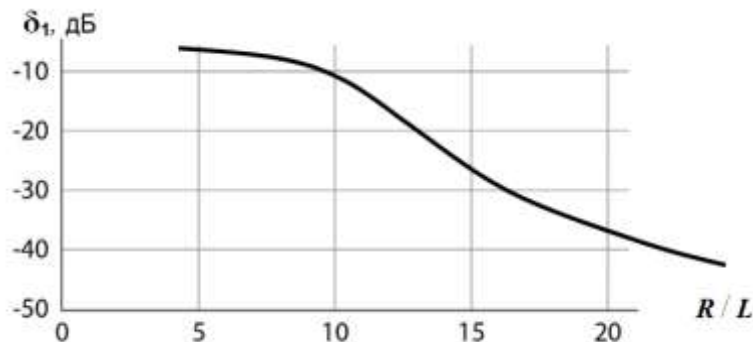


Рис. 2. График зависимости погрешности измерений от отношения размера измерительного поля и размера ЛЭР

Из выражения (1) следует, что увеличение мощности максимального отражения ЛЭР за счет бесконтрольного увеличения линейных размеров ЛЭР приводит к неприемлемым ошибкам измерения сверхмалых значений ЭПР одиночного объекта.

Увеличения числа N объектов в ЛЭР при ограничении на ее размер можно достичь заменой линейной решетки на двумерную квадратную или прямоугольную решетку, однако диаграмма обратного отражения (ДОО) этих решеток формируется с высоким, как и у линейной решетки, уровнем боковых лепестков, что не способствует увеличению отношения сигнал-фон.

Одним из решений данной проблемы является применение известных способов снижения уровня боковых лепестков по отношению к уровню главного лепестка в диаграмме направленности антенной решетки. Из основ построения антенных систем следует [6], что для эквидистантных антенных решеток уменьшить уровень боковых лепестков можно, возбуждая элементы антенны (в нашем случае объекты ЛЭР) токами неодинаковой амплитуды. Для этого необходимо создать такой закон распределения амплитуд токов возбуждения элементов антенны (излучателей), который обеспечивал бы или минимальный уровень боковых лепестков при заданной ширине диаграммы направленности, или минимальную ширину главного лепестка при заданном уровне боковых лепестков.

Подобные задачи решают с помощью теории дольф-чебышевских решеток. Теория утверждает, что чем быстрее спадает амплитуда токов возбуждения к краям решетки, тем меньше уровень боковых лепестков. В итоге получаем, что для уменьшения уровня боковых лепестков в ДОО ЛЭР ее необходимо облучать неплоским фронтом волны, что невозможно осуществить в условиях измерительного комплекса ЭРИК-1.

С другой стороны, уменьшение уровня боковых лепестков в ДОО равноамплитудной решетки может быть осуществлено за счет неэквидистантного распределения излучателей [7]. В этом случае расстояния между элементами решетки устанавливают обратно пропорционально величинам токов в соответствующих излучателях эквидистантной решетки. При неэквидистантном размещении элементов устраняется периодичность множителя решетки, благодаря чему ликвидируются главные дифракционные максимумы высших порядков и снижается уровень боковых лепестков им сопутствующих.

ЛИНЕЙНЫЕ НЕЭКВИДИСТАНТНЫЕ РЕШЕТКИ

Методы синтеза линейных неэквидистантных решеток (ЛНР) с оптимизируемыми диаграммами направленности основаны на использовании численных методов последовательного (итерационного) приближения неэквидистантной расстановки объектов в решетке. При этом используют методы проб (перебор, случайный поиск) и динамического программирования. Численные методы позволяют успешно синтезировать оптимальные неэквидистантные решетки с умеренно большим числом объектов ($N \approx 50 \div 100$).

Нижний достижимый уровень боковых лепестков по мощности (рис. 3) приближенно может быть оценен из выражения [8]

$$A \approx -20 \lg \frac{N}{2} \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что значительного снижения уровня боковых лепестков можно достичь для решеток уже из 20 объектов, число которых хорошо согласуется с зависимостью (1).

Техническим результатом, обеспечивающим увеличение отношения сигнал-фон, является измерение ЭПР объектов со сверхмалыми уровнями отражений при помощи ЛНР, размер которой ограничен тем-же измерительным полем, как и в случае с исходной ЛЭР.

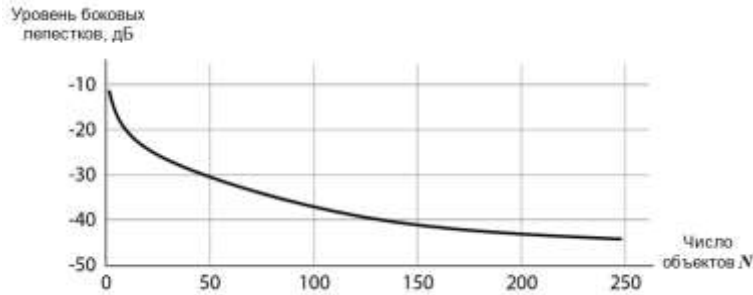


Рис. 3. Зависимость изменения уровня боковых лепестков решетки от количества ее объектов

В измерительное поле помещается ЛНР (рис. 4) из N одинаковых и одинаково ориентированных радиолокационных объектов, которые обозначаются номерами n от 0 и до $N-1$, если N – нечетное, и от 1 и до N , если N – четное, и размещают их неэквидистантно, начиная от середины решетки и продолжая поочередно по разные стороны от нее, на расстояниях

$$d_n = \left(\frac{n}{2} + \left(\frac{2}{\pi} \right)^3 N \sum_{k=1}^4 (-1)^k \frac{\sin \frac{n\pi}{2N} (2k+1)}{(2k+1)^2} \right) d,$$

которые рассчитывают только для $n=1, 3, \dots, N-1$ и принимают $d_{n+1} = d_n$, если N – четное, или для $n=2, 4, \dots, N-1$ и принимают $d_0 = 0$ и $d_{n-1} = d_n$, если N – нечетное, при этом следует учесть, что $\lambda/2 \leq d \leq 2\lambda$, где λ – длина волны радиоизлучения, а d – шаг исходной ЛЭР.



Рис. 4. Пример формирования ЛЭР и ЛНР, состоящих из 20 объектов и имеющих одинаковые линейные размеры

При вращении ЛНР в измерительном поле и рассеянии на ней радиоволн происходит следующее. Разность хода волн, падающих на соседние объекты, составляет $\Delta_i = d_n \sin \theta_i$ (где θ – угол поворота), разность хода волн, рассеянных этими же объектами, составляет $\Delta_s = d_n \sin \theta_s$, суммарная разность определяется выражением $\Delta_i + \Delta_s = d_n (\sin \theta_i + \sin \theta_s)$.

Если разность фаз составит целое число периодов, т. е. $d_n(\sin \theta_i + \sin \theta_s) = n\lambda$, то амплитуды полей, рассеянных от всех объектов измерения, складываются, и полезный сигнал в направлении θ увеличивается по мощности в N^2 раз. Кроме того, при выполнении этого условия влияние переотражений между объектами на максимум ЭПР главного лепестка решетки мало, и он близок к ЭПР уединенного объекта σ_i , умноженной на число объектов в квадрате N^2 . Так как поправка Δd_n для каждого n -го объекта в ЛНР имеет разную величину, то отраженные сигналы в направлениях θ главного лепестка решетки, а также сопровождающих их боковых лепестков не совпадают и складываются с разной фазой. В итоге происходит «размытие» интерференционного лепестка множителя всей решетки в широком угловом секторе. Одновременно с этим, в направлении угла $\theta = 0^\circ$ отраженные сигналы складываются синфазно, и полезный сигнал увеличивается по мощности в N^2 раз. Таким образом, используя ЛНР, составленную из идентичных объектов измерения, можно измерить ЭПР исследуемых объектов с уровнем, меньшим уровня фоновых отражений.

Проверка предлагаемого технического решения проведена путем численного эксперимента с помощью программы электродинамического моделирования. Моделями выступали линейная эквидистантная и неэквидистантная решетки, состоящие из 20 одинаковых проводящих микросфер диаметром $\lambda/6$. Шаг исходной ЛЭР $d = \lambda$. Длина волны радиоизлучения $\lambda = 3,1$ см.

Рассчитанные поправки Δd_n и расстояния d_n до объектов неэквидистантной решетки от ее середины приведены в табл. 1 вместе с координатами x_n объектов решетки относительно ее середины.

Таблица 1

Значения поправок и координат объектов, составляющих ЛНР

№ объекта в решетке	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поправка Δd_n , м	0,0685	-0,0685	0,2323	-0,2323	0,4037	-0,4037	0,4861	-0,4861	0,4604	-0,4604
Координаты x_n , м	0,0134	-0,0134	0,0393	-0,0393	0,0650	-0,0650	0,0934	-0,0934	0,1252	-0,1252
№ объекта в решетке	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Поправка Δd_n , м	0,4022	-0,4022	0,3009	-0,3009	0,0157	-0,0157	0,4734	-0,4734	0,8864	-0,8864
Координаты x_n , м	0,1580	-0,1580	0,1922	-0,1922	0,2320	-0,2320	0,2782	-0,2782	0,3220	-0,3220

Результаты расчетов исходной ЛЭР из 20 объектов исследования, а также предложенной ЛНР с тем же числом объектов представлены в виде угловых ДОО размером $0 \pm 45^\circ$ и их фрагментов размером $0 \pm 10^\circ$ (рис. 5).

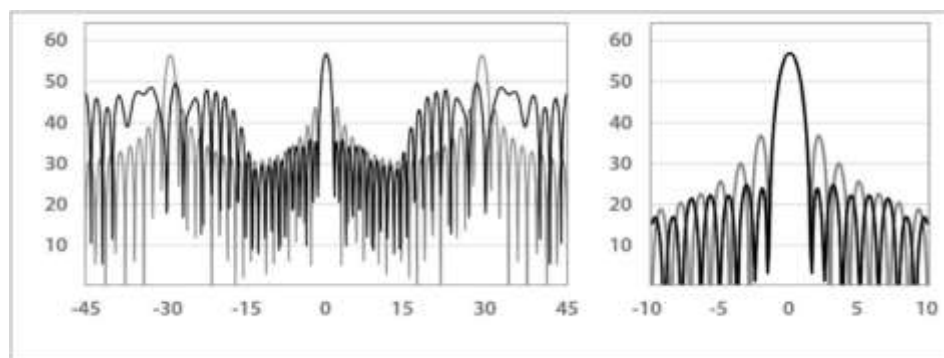


Рис. 5. Сравнение фрагментов расчетных диаграмм ЛЭР и ЛНР, состоящих из 20 объектов

Анализ полученных результатов показал, что превышение уровня главного лепестка над уровнем боковых лепестков (т. е. полезного сигнала над фоновыми отражениями решетки) составляет для ЛЭР и ЛНР 13,1 дБ и 21,3 дБ соответственно. То есть отношение сигнал-фон за счет применения ЛНР увеличено на 8,2 дБ.

Данный результат, исходя из зависимости максимальной погрешности измерения ЭПР объекта от уровня фона [1], обеспечивает уменьшение составляющей погрешности измерений объектов из-за фоновых отражений от решетки с 2 дБ до 0,7 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технический результат, обеспечивающий увеличение отношения сигнал-фон за счет измерения ЭПР объектов при помощи ЛНР, размер которой ограничен измерительным полем, достигнут. Указанный метод измерений позволяет повысить точность экспериментального определения сверхмалых значений ЭПР объектов исследования, размер которых соизмерим и меньше длины волны радиолокационных станций, используемых на комплексе ЭРИК-1. При этом погрешность измерений объектов из-за фоновых отражений от решетки снижается с 2 дБ до 0,7 дБ.

Список используемых источников

1. *Майзельс Е. Н., Торгованов В. А.* Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. – М. : Сов. радио, 1972. – 232 с.
2. Эталонный радиолокационный измерительный комплекс «ЭРИК-1» // Оружие и технологии России. Энциклопедия 21 век. – М.: ИД «Оружие и технологии», 2005. – Т. IX : Противовоздушная и противоракетная оборона. – 816 с.
3. *Кобак В. О.* Радиолокационные отражатели. – М. : Сов. радио, 1975. – 219 с.
4. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования / под ред. С. М. Нестерова. – М. : Радиотехника, 2015. – 312 с.
5. *Ковалев С. В., Нестеров С. М., Скородумов И. А.* Методика построения линейных эквидистантных решеток для измерения с заданной точностью сверхмалых уровней эффективной площади рассеяния объектов // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40, № 9. – с. 1346-1368.
6. *Глаголевский В. Г., Шишов Ю. А.* Антенны радиолокационных станций. – М. : Военное изд-во МО СССР, 1977. – 111 с.
7. Современная теория и практическое применение антенн / под ред. В. А. Неганова. – М. : Радиотехника, 2009. – 720 с.
8. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования / под ред. Л. С. Бененсона. – М. : Сов. радио, 1966. – 368 с.

В. И. Евсеев,
доктор технических наук;
Р. Ю. Лазутин,
кандидат технических наук;
А. В. Шульженко,
кандидат технических наук

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В статье представлены основные требования к характеристикам излучения антенных систем радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны. Представлен принцип формирования и управления диаграммой направленности активных фазированных решеток. Произведен расчет характеристик излучения при различных амплитудно-фазовых распределениях на раскрыве антенны, обеспечивающих достижение требуемых целевых показателей в различных условиях радиолокационного наблюдения.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, активные фазированные решетки, диаграмма направленности антенны, амплитудно-фазовое распределение, радиометрические искажения.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая информативность радиолокационных данных (РЛД) от космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (КРСА) и способность производить съемку в не зависимости от времени суток и состояния облачности обуславливают их приоритетную роль для решения различных задач военных, научных и коммерческих потребителей. Традиционно информационные показатели РСА подразделяются на геометрические (пространственное разрешение, полоса радиолокационного наблюдения) и радиометрические (радиометрическое разрешение, радиолокационный контраст).

Ключевым элементом, определяющим информационные показатели РСА и многорежимный характер радиолокационного наблюдения (РЛН), является антенный комплекс, включающий антенную систему и подсистемы управления.

ТРЕБОВАНИЯ К АНТЕННЫМ СИСТЕМАМ РСА

Для нормального функционирования РСА к антенне предъявляется целый ряд зачастую противоречивых требований. Антенна РСА должна излучать мощные зондирующие импульсы и принимать слабые отраженные сигналы. При этом необходимо обеспечивать большой коэффициент усиления и малые потери в антенно-фидерном тракте. Традиционно при расчете характеристик антенной системы отталкиваются от требований к геометрическим показателям информативности. Ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту должна быть достаточной, чтобы достигнуть необходимого углового размера синтезированной апертуры и при соответствующей относительной скорости перемещения КРСА и участка поверхности Земли получить необходимую ширину доплеровского спектра для реализации требуемого пространственного разрешения по азимуту [1].

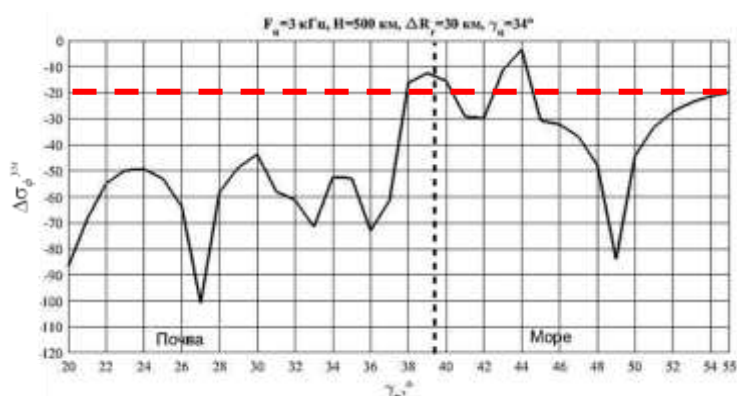
Диаграмма направленности по углу места должна быть согласована с требуемой шириной полосы РЛН по дальности. Однако выбор широкой полосы РЛН при высоком уровне боковых лепестков (УБЛ) ДНА и импульсном характере излучения приводит к появлению различного рода радиометрических искажений на радиолокационных изображениях (РЛИ) [2].

Показателем радиометрических искажений является интегральный уровень неоднозначности $\Delta\sigma_{\phi}^{ym}$, определяемый как отношение между полной мощностью сигналов принятых от участков поверхности Земли, находящихся на расстоянии, кратном интервалу неоднозначности, и мощностью полезного сигнала [3]:

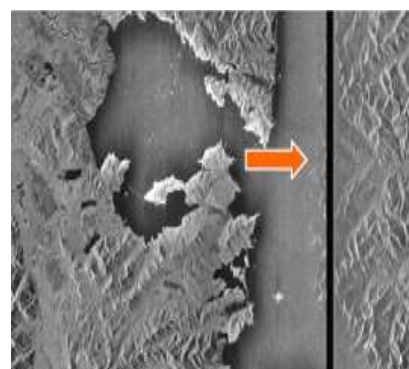
$$\Delta\sigma_{\phi}^{ym} = \frac{G^2(\gamma_{R+\Delta R})R^3\sigma(\gamma_{R+\Delta R})}{G^2(\gamma)(R+\Delta R)\sigma(\gamma)} + \frac{G^2(\gamma_{R-\Delta R})R^3\sigma(\gamma_{R-\Delta R})}{G^2(\gamma)(R-\Delta R)\sigma(\gamma)}, \quad (1)$$

где γ – угол крена в направлении на наблюдаемый УПЗ;
 $G(\gamma)$ – коэффициент усиления антенны в направлении γ ;
 $\sigma(\gamma_R)$ – ЭПР для этого направления облучения;
 ΔR_H – интервал неоднозначности по дальности.

Анализ ТТХ зарубежных КРСА показывает, что критичным интегральным уровнем неоднозначности, который зависит от коэффициента направленного действия (КНД) и УБЛ ДНА, а так же от удельной эффективной площади рассеивания наблюдаемого участка поверхности Земли, является –20 дБ. На рис. 1,а показан пример, когда при переходе РЛН с области суши на морскую поверхность интегральный уровень неоднозначности приближается к 0 дБ, т. е. прием сигнала по боковым лепесткам соизмерим с уровнем сигнала в основном лепестке ДНА. На рис. 1,б представлен пример последствий данного эффекта на радиолокационном изображении. В этом случае единственным способом устранения неоднозначности является снижение УБЛ за счет управления параметрами амплитудно-фазового распределения на раскрыве антенны.



а)



б)

Рис. 1. Проявление неоднозначности по дальности:

а – зависимость интегрального уровня неоднозначности по дальности от угла падения при наблюдении разнородной поверхности; б – пример проявления неоднозначности по дальности на РЛИ [2]

Таким образом, для реализации требуемых информационных показателей КРСА необходимо осуществлять управление параметрами ДНА (ориентацией, шириной основного лепестка, УБЛ) в зависимости от реализуемых условий применения. Анализ существующих и перспективных КРСА показывает, что в качестве антенных систем применяются параболические зеркальные антенны и активные фазированные решетки (АФАР) [4]. Ввиду наибольшей функциональности далее будут рассматриваться АФАР.

АФАР выполняется на основе приемо-передающих модулей (ППМ) (электрически и механически обособленных панелей с излучающими элементами на основе транзистора мощностью до 10–15 Вт) [4]. В режиме передачи в каждом ППМ сигнал поступает на аттенюатор,

который управляет выходной мощностью модуля, а следовательно, амплитудным распределением в апертуре АФАР. Изменяя фазовый набег в соответствующих трактах ППМ через фазовращатели, производится управление фазовым распределением в решетке и сканирование ДНА.

Каждый ППМ является отдельной плоской антенной решеткой, которая состоит из идентичных излучателей, расположенных в узлах плоской координатной сетки. Наиболее употребительными являются прямоугольная и треугольная (гексагональная) сетки (рис. 2) [4]. Имеется n_x рядов излучателей, параллельных оси y , с расстоянием между рядами d_x , в каждом из которых имеются n_y излучателей, отстоящих друг от друга на расстояние d_y . Фаза возбуждения излучателей в решетке при остронаправленном излучении обеспечивает синфазное сложение полей в заданном направлении и зависит от положения излучателей в ППМ [5]:

$$\varphi_{m,n_j}^{\text{л}}(\theta_{\text{гл}}, \psi_{\text{гл}}) = -k(m_i d_x \cos \psi_{\text{гл}} + n_j d_y \sin \psi_{\text{гл}}) \sin \theta_{\text{гл}}, \quad (2)$$

где k — волновое число, $k = 2\pi/\lambda$;

$m_i d_x, n_j d_y$ — координаты излучателей в ППМ;

$\theta_{\text{гл}}, \psi_{\text{гл}}$ — углы сферической системы координат, определяющие направление главного максимума луча в пространстве

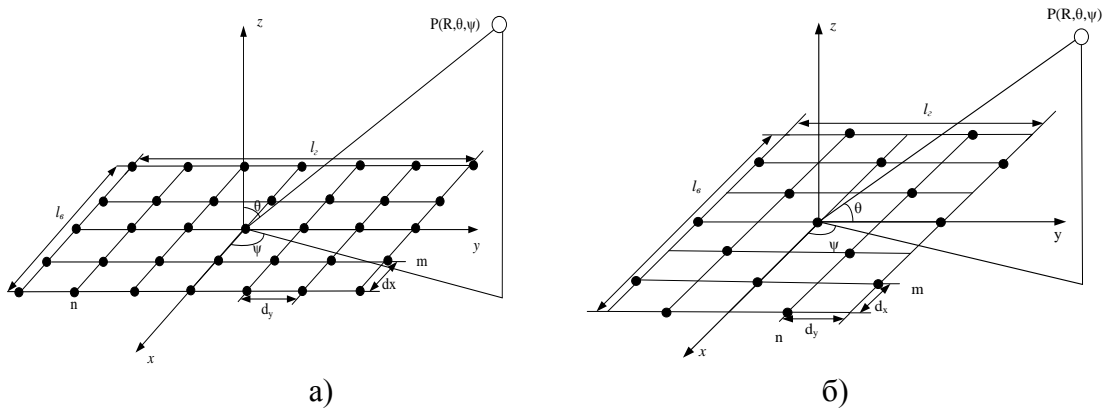


Рис. 2. Схема размещения излучателей в плоском антенном модуле:
а – прямоугольная сетка; б – гексагональная сетка

Вследствие дискретности фазовращателей линейное распределение заменяется распределением вида [5]

$$\varphi_{m,n_j}^{\text{л}}(\theta_{\text{гл}}, \psi_{\text{гл}}) = \Delta\varphi \cdot \text{int} \left\{ \frac{\varphi_{m,n_j}^{\text{л}}}{\Delta\varphi} + 0,5 \right\}.$$

Синфазное сложение полей отдельных излучателей решетки возможно не только в направлении главного максимума ДНА, но и в других направлениях, которым соответствует пространственный фазовый сдвиг, компенсирующий сдвиг фазы между излучателями за счет возбуждения. Тогда, помимо главного максимума ППМ, существуют еще и дифракционные максимумы высших порядков. Пространственная ориентация дифракционных максимумов зависит от расстояния между излучателями. При уменьшении расстояния между ними количество дифракционных максимумов уменьшается. Для нормальной работы ППМ необходимо, чтобы у АФАР находился лишь один главный максимум.

При использовании прямоугольной сетки дифракционные максимумы высших порядков отсутствуют, если расстояние между излучателями в направлении координатных осей удовлетворяет следующему условию [5]:

$$\frac{d_x}{\lambda} \leq \frac{1}{(1 + \sin \theta_{\max} \cos \psi_{\max})}; \frac{d_y}{\lambda} \leq \frac{1}{(1 + \sin \theta_{\max} \sin \psi_{\max})}. \quad (3)$$

Для гексагональной сетки это условие формулируется в виде

$$\frac{d}{\lambda} \leq \frac{2}{\sqrt{3}(1 + \sin \theta_{\max})}. \quad (4)$$

Диаграмма направленности ППМ $f_{\text{АМ}}(\theta, \psi)$ может быть представлена в виде произведения характеристики направленности изолированного излучателя $f_{\text{и}}(\theta, \psi)$ на множитель решетки $f_{\text{р}}(\theta, \psi)$, который можно рассматривать как характеристику направленности решетки, состоящей из изотропных излучателей [5]:

$$f_{\text{ППМ}}(\theta, \psi) = f_{\text{и}}(\theta, \psi) \sum_{-Nx/2}^{Nx/2} \sum_{-Ny/2}^{Ny/2} e^{-jk(m d_x \cos \psi + n d_y \sin \psi) \sin \theta}, \quad (5)$$

где A_{mn} – амплитуда возбуждения отдельного излучателя.

Теперь перейдем к рассмотрению всей АФАР как совокупности ППМ. Все предыдущие рассуждения будут аналогичны для всей решетки с заменой излучателя на ППМ с соответствующей ДНА. К каждому ППМ подключен фазовращатель и аттенюатор, которые позволяют изменять фазу и амплитуду каждого ППМ. ДНА АФАР будет иметь вид [6]

$$f(\theta, \psi) = \sum_{-Mx/2}^{Mx/2} \sum_{-My/2}^{My/2} \dot{W}_{MN} f_{\text{ППМ}}(\theta, \psi) e^{-jk(M d_x \cos \psi + N d_y \sin \psi) \sin \theta}, \quad (6)$$

где M, N – количество антенных модулей в соответствующих плоскостях;
 \dot{W}_{M,N_j} – комплексные весовые коэффициенты ППМ, определяющие АФР,

$$\dot{W}_{M,N_j} = A_{M,N_j} e^{j\varphi_{M,N_j}}.$$

ДНА решеток с равномерным распределением имеют относительно высокий уровень боковых лепестков, что зачастую ограничивает возможность их применения. Можно уменьшить уровень боковых лепестков, применяя неравномерное амплитудное распределение, однако это приводит к снижению коэффициента направленного действия антенны с расширением ДНА.

На практике большое распространение получили следующие распределения: «косинус на пьедестале» и «Дольфа – Чебышева» [6].

Распределение «косинус на пьедестале» имеет вид

$$A_{N_i}^{\text{кос}} = \cos^p \left[\frac{k d_x}{2} (2N_i - 1) (\sin \theta) \right] - \Delta, \quad (7)$$

где p – скорость спада уровня мощности от центра к краям АФАР (при $p = 0$ возникает в равномерное амплитудное распределение $A_{N_i}^{\text{рас}} = 1$), повышение p соответствует понижению УБЛ и приводит к расширению основного лепестка ДНА;

Δ – пьедестал, варьируя значением которого добиваются с высокой точностью заданного УБЛ.

Решетки с распределением Дольф – Чебышева имеют оптимальную по критерию минимальной ширины ДНА при заданном уровне боковых лепестков, либо, наоборот, по критерию минимального УБЛ при заданной ширине основного лепестка. ДНА с распределением Дольф – Чебышева поперечно излучающей эквидистантной синфазной решетки, образованной $N+1$ изотропными излучателями, расположенными симметрично относительно центра решетки с шагом d , может быть представлена в виде полинома Чебышева N -го порядка:

$$f(\theta, \psi) = \cos \left\{ N \arccos \left[z_0 \cos \left(\frac{\pi u_x}{2} \right) \right] \right\}, \quad (8)$$

где $u_x = 2\pi \left(\frac{dx}{\lambda} \right) \sin \theta \cos \psi$.

При заданном уровне боковых лепестков ξ параметр z_0 определяется выражением

$$z_0 = \frac{1}{2} \left\{ \left[\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right]^{\frac{1}{N}} + \left[\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right]^{\frac{1}{N}} \right\}. \quad (9)$$

Амплитуды возбуждения элементов чебышевских решеток определяются выражением

$$A_N^{d-q} = \frac{2}{N} \left[\xi + 2 \sum_{N_i=1}^{N-1} T_{2N-1} \left(z_0 \cos \frac{N_i \pi}{2N} \right) \cos \left((2n-1) \frac{N_i \pi}{2N} \right) \right]. \quad (10)$$

Диаграмма направленности определяет распределение потока мощности, излучаемого антенной, в этом случае используют ДНА по мощности [13]:

$$P(\theta, \psi) = |f(\theta, \psi)|^2, \quad (11)$$

по которой вычисляют ее КНД, используемый в уравнении дальности

$$G = \frac{4\pi P(\theta_0, \psi_0)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}. \quad (12)$$

Таким образом, КНД, как основной энергетический показатель АФАР, определяется количеством излучателей в каждом ППМ, расстоянием между этими излучателями, количеством ППМ и амплитудно-фазовым распределением на раскрыве АФАР. Изменение амплитудно-фазового распределения (АФР) как основной способ оперативного управления АФАР, выбирается из условия требуемого понижения УБЛ и электронного наведения максимума ДНА на цель.

Важнейшим требованием к ДНА по азимуту является устранение приема отраженных сигналов по боковым пикам ДНА синтезированной апертуры. Для устранения неоднозначности при реальной ДНА ее ширину выбирают так, чтобы первые нули реальной ДНА совпадали с первыми боковыми пиками синтезированной, т. е. выполняют условие [1]

$$\Delta\theta_{аз} = \lambda F_n / 2V_t, \quad (13)$$

где λ – длина волны сигнала;
 V_t – тангенциальная составляющая скорости носителя;
 F_n – частота повторения импульсов.

Основным требованием к ДНА по дальности является обеспечение требуемой полосы РЛН. При этом ширина полосы по наклонной дальности должна быть меньше ширины полосы, кратной интервалу неоднозначности по дальности, т. е. время запаздывания сигнала должно быть больше периода повторения. В противном случае, в строб приема будут попадать сигналы с нескольких интервалов неоднозначности по дальности.

Таким образом, ширина угломестной ДНА ограничена условием [1]

$$\frac{\Delta R_r \cos \gamma_n}{R} \leq \Delta \theta_{\text{ум}} \leq \frac{\Delta R_n \operatorname{ctg} \gamma_n}{R k_r}, \quad (14)$$

где ΔR_r – полоса РЛН;

ΔR_n – интервал неоднозначности по дальности, $\Delta R_n = c/2F_n$;

k_r – коэффициент запаса, определяемый допустимым интегральным уровнем неоднозначности по дальности $\Delta \sigma_{\phi}^{\text{ум}}$, $k_r = 1, 2 \dots 1, 4$.

Для снижения интегрального уровня неоднозначности используются различные амплитудные распределения на раскрытии антенны, которые определяют весовые коэффициенты мощности излучения каждого ППМ АФАР.

Диаграммы направленности для различных амплитудных распределений в угломестной плоскости представлены на рис. 3. С точки зрения соотношения КНД к уровню боковых лепестков наилучшими являются распределения Дольфа – Чебышева и Тейлора.

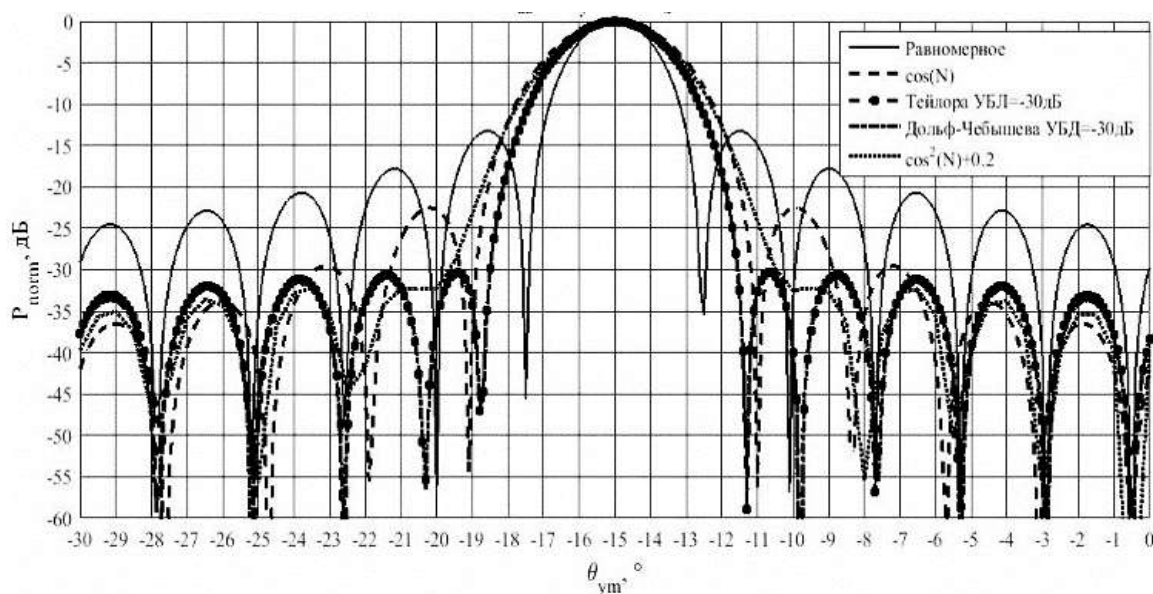
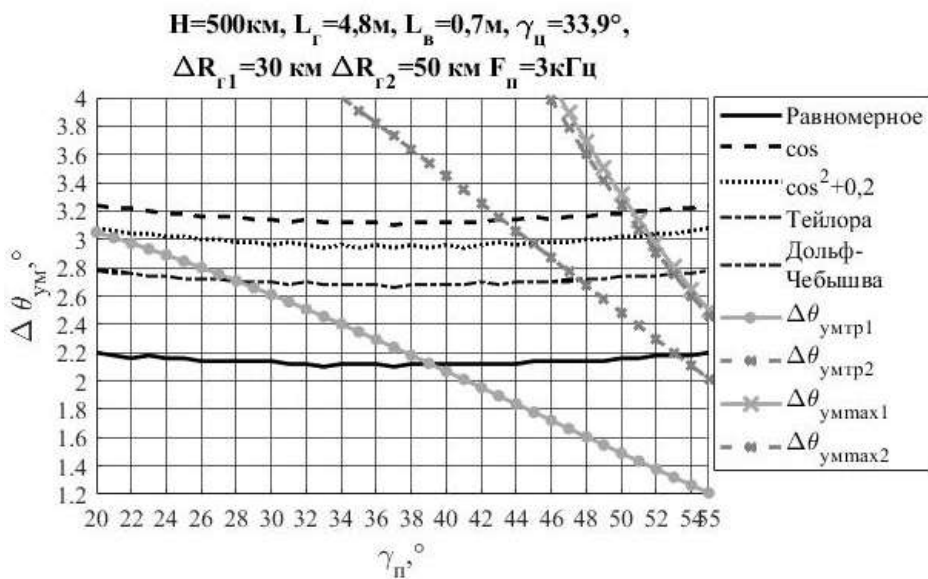


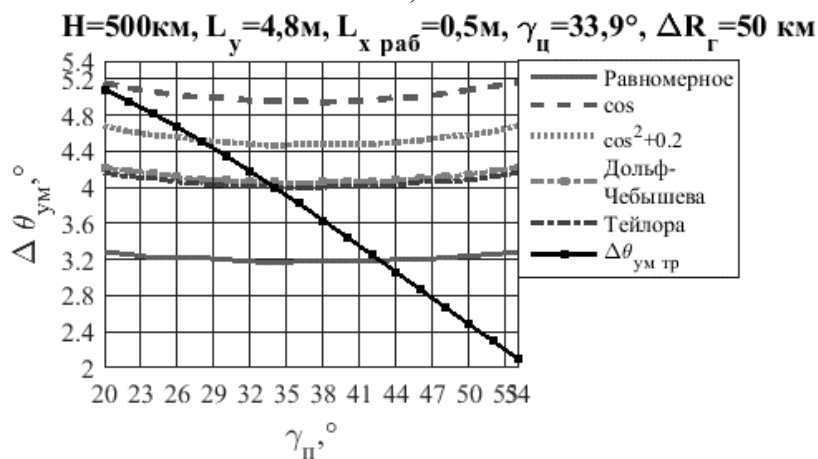
Рис. 3. ДНА в угломестной плоскости для типовых амплитудных распределений

Выбор АФР определяется углом наблюдения требуемой и допустимой шириной ДНА, а также КНД для достижения требуемого отношения сигнал/шум.

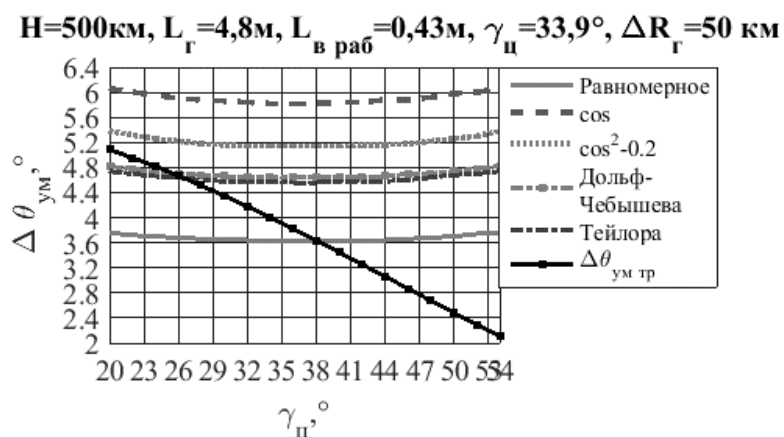
При наведении ДНА на дальнюю границу полосы обзора малое отношение сигнал/фон (в том числе из-за угловой зависимости УЭПР) требует увеличения КНД и мощности, поэтому целесообразно применение равномерного амплитудного распределения с использованием всего раскрытия АФАР, при этом в надир ориентируются боковые лепестки ДНА незначительного уровня. Для устранения неоднозначности по дальности на дальней границе полосы обзора выбирается минимально допустимая ЧПИ для однозначного приема по азимуту (рис. 4,а).



а)



б)



в)

Рис. 4. Требуемая, допустимая и реальная в зависимости от АФР ширина ДНА при различных углах наблюдения:
 а – при использовании полного раскрыва АФАР; б – после отключения шести рядов ППМ;
 в – после отключения четырех рядов ППМ

На ближней границе полосы обзора основными требованиями являются низкий уровень боковых лепестков для устранения надирных отражений и использование довольно широкой ДНА для достижения требуемой полосы захвата. Таким образом, необходимо расширение ДНА путем отключения нескольких рядов ППМ, т. е. уменьшения рабочего размера антенны в угломестной плоскости, и использование амплитудного распределения типа косинус в квадрате на пьедестале, характеризующегося широкой ДНА и УБЛ (рис. 4,б). При увеличении угла наблюдения происходит постепенное подключение рядов ППМ и целесообразен переход к распределению Дольф – Чебышева, изменяя УБЛ в зависимости от наклонной дальности (рис. 4,в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, системообразующим элементом конструкции КРСА является ее антенная система, к которой предъявляется целый ряд зачастую противоречивых требований, необходимых для реализации как геометрических, так и радиометрических информационных показателей. Возможность оперативного и достаточно гибкого изменения АФР на раскрытие АФАР позволяет реализовать большинство режимов работы КРСА с достижением требуемых информационных показателей, что позволяет сделать вывод о приоритетности разработок данного класса антенных комплексов.

Список используемых источников

1. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М. : Радиотехника, 2010. – 526 с.
2. *Elizavetin I.* Radiometric artifacts on Radiometric artifacts on SAR images // X International scientific and technical conference from imagery to map: Digital photogrammetric technologies. – URL: <http://www.racurs.ru/download/conf/Italy2010/Presentations/Elizavetin> (дата обращения: 31.03.2022).
3. *Pillai S. U., Li K. Y., Himed B.* Space Based Radar. Theory and Applications. – McGraw-Hill Companies, 2008. – 244 p.
4. *Полетаев А. М., Лазутин Р. Ю.* Анализ принципов построения и режимов функционирования космических систем радиолокационного наблюдения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – Вып. 646. – С. 159–169.
5. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток : учеб. пособие для вузов / Д. И. Воскресенский [и др.]. – 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Радиотехника, 2003. – 632 с.
6. *Hansen R. C.* Phase Array Antennas. – Hoboken, NJ, USA: Wiley & Sons, Inc., 2009. – 572 p.

А. С. Кошкарлов,
кандидат технических наук, доцент;
Г. Н. Мальцев,
доктор технических наук, профессор

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ИЗОПЛАНАТИЗМА НАЗЕМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

С использованием модели высотного профиля флуктуаций показателя преломления атмосферы Хафнагеля – Валлея исследовано влияние различных слоев атмосферной турбулентности на изопланатизм наземных оптических систем и ошибку анизопланатизма при адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений. Показано, что имеет место примерно одинаковое влияние различных слоев атмосферной турбулентности на величину угла изопланатизма оптической системы. Определены условия коррекции ошибки анизопланатизма при многосопряженной адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений в наземных оптико-электронных системах.

Ключевые слова: наземные оптические системы, адаптивная коррекция атмосферных искажений, изопланатизм, модель атмосферы, высотный профиль турбулентности.

ВВЕДЕНИЕ

В наземных оптико-электронных системах (ОЭС), предназначенных для наблюдения космических и астрономических объектов, используется адаптивная фазовая коррекция атмосферных искажений принимаемого оптического поля [1, 2]. Это обусловлено тем, что атмосферные фазовые искажения являются основным фактором, влияющим на работу ОЭС при формировании изображений наблюдаемых объектов. Адаптивная фазовая коррекция позволяет приблизиться к инструментальной разрешающей способности ОЭС. Степень приближения определяется величиной остаточных ошибок коррекции. Для крупных телескопов диаметром в единицы метров характерно наличие нескольких составляющих остаточных ошибок адаптивной коррекции, одной из которых является ошибка анизопланатизма, обусловленная нарушением условия изопланатизма в пределах углового поля оптической системы.

Под изопланатизмом оптической системы в общем случае понимается постоянство ее аберраций по угловому полю. Условие изопланатизма оптической системы состоит в том, что при смещении точки ее изображение только смещается на пропорциональную величину [3]. При формировании изображений наблюдаемых объектов это условие должно выполняться для всего углового поля оптической системы. В наземных ОЭС вследствие атмосферных фазовых искажений это условие выполняется только в пределах некоторого угла изопланатизма, который оказывается меньше углового поля оптической системы. Его величина зависит от характеристик атмосферы на трассе распространения оптического излучения.

В определенных условиях ошибки анизопланатизма, обусловленные в основном фазовыми искажениями в средних слоях атмосферы, становятся соизмеримы с остаточными ошибками адаптивной коррекции фазовых искажений в приземном слое атмосферы, оказывающими определяющее влияние на разрешающую способность наземных ОЭС.

В статье с использованием моделей атмосферы определяются условия возникновения ошибок анизопланатизма и их компенсации.

ОЦЕНКА ДИАПАЗОНА ВЫСОТ СОПРЯЖЕНИЯ КОРРЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ

Выполнение условия изопланатизма во всем угловом поле оптической системы является одним из основных условий наблюдения космических и астрономических объектов наземными высокоразрешающими ОЭС. Для компенсации ошибок анизопланатизма в наземных ОЭС с адаптивной коррекцией атмосферных фазовых искажений предложено использование многосопряженных адаптивных оптических систем [4]. В них коррекция атмосферных фазовых искажений осуществляется с помощью нескольких корректирующих устройств, каждое из которых оптически сопряжено с некоторым расстоянием от телескопа. При наблюдении наземными ОЭС космических и астрономических объектов сопряжение происходит по высоте, что позволяет корректировать фазовые искажения в различных слоях атмосферы. Поскольку ошибки анизопланатизма обусловлены, в основном, искажениями в средних слоях атмосферы, многосопряженные адаптивные оптические системы обеспечивают компенсацию ошибок анизопланатизма и увеличение угла изопланатизма наземных ОЭС.

Определение числа и высоты слоев атмосферной турбулентности, для которых необходимо осуществлять многосопряженную адаптивную фазовую коррекцию, может быть основано на анализе вклада атмосферной турбулентности, находящейся на различных высотах, в суммарные атмосферные фазовые искажения. Поскольку многосопряженная адаптивная фазовая коррекция применяется для устранения ошибки анизопланатизма, то необходимо проанализировать влияние атмосферной турбулентности, находящейся на различных высотах, на величину угла изопланатизма.

Угол изопланатизма для наземной оптической системы при распространении оптического излучения в атмосфере на вертикальных и наклонных трассах определяется выражением

$$\theta_0 = \left[2,914k^2(\sec\beta)^{8/3} \int_{(H)} h^{5/3} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

где k – волновое число, $k = 2\pi/\lambda$;

λ – длина волны оптического излучения;

β – зенитный угол трассы распространения;

$C_n^2(h)$ – высотный профиль флуктуаций показателя преломления атмосферы.

Интегрирование в выражении (1) осуществляется по высоте H от $h=0$ до $h=\infty$.

Дисперсия ошибок коррекции атмосферных фазовых искажений, обусловленных анизопланатизмом, определяется выражением

$$\sigma_{\text{аниз}}^2 = (\Delta\theta/2\theta_0)^{5/3}, \quad (2)$$

где $\Delta\theta$ – ширина углового поля оптической системы, в пределах которого необходимо обеспечить условие изопланатизма;

θ_0 – угол изопланатизма, определяемый выражением (1) для высотного профиля флуктуаций показателя преломления атмосферы $C_n^2(h)$.

Влияние на величину угла изопланатизма θ_0 атмосферной турбулентности, находящейся на различных высотах, определяется входящей в выражение (1) величиной

$$\mu_{5/3} = \int_{(H)} h^{5/3} C_n^2(h) dh,$$

представляющей собой 5/3-й момент атмосферной турбулентности. В общем случае m -й момент атмосферной турбулентности определяется выражением

$$\mu_m = \int_{(H)} h^m C_n^2(h) dh, \quad (3)$$

при определении угла изопланатизма θ_0 используется его значение при $m = 5/3$.

Полагая $m = 5/3$, интегрирование в выражении (3) по всей толще атмосферы ($0 \leq h < \infty$) дает интегральное значение момента $\mu_{5/3}$, которым определяется величина угла изопланатизма θ_0 , а интегрирование в некотором диапазоне высот $h_1 \leq h < h_2$ дает значение момента $\mu_{5/3}(h_1, h_2)$ для слоя атмосферной турбулентности, лежащего в диапазоне высот $h_1 \leq h < h_2$. В соответствии с выражением (1) угол изопланатизма θ_0 тем меньше, чем больше величина $\mu_{5/3}$, и обратно пропорционален ей в степени $3/5$. Поэтому влияние слоя атмосферной турбулентности, лежащего в диапазоне высот $h_1 \leq h < h_2$, на величину угла изопланатизма θ_0 для наземной оптической системы характеризует нормированная функция

$$\chi_{5/3}(h_1, h_2) = \left[\frac{\mu_{5/3}(h_1, h_2)}{\mu_{5/3}} \right]^{3/5}, \quad (4)$$

где $\mu_{5/3}(h_1, h_2) = \int_{h_1}^{h_2} h^{5/3} C_n^2(h) dh$.

Функция $\chi_{5/3}(h_1, h_2)$, определяемая выражением (4), характеризует парциальный вклад в величину ошибки анизопланатизма слоя атмосферы, лежащего в диапазоне высот $h_1 \leq h < h_2$. При изменении высоты h от 0 до ∞ функция $\chi_{5/3}(0, h)$ благодаря нормировке изменяется от 0 до 1. Для определения высоты слоев атмосферной турбулентности, с которыми сопрягаются корректоры волнового фронта при многосопряженной адаптивной фазовой коррекции, необходимо проанализировать зависимости $\chi_{5/3}(0, h)$ для заданного высотного профиля флуктуаций показателя преломления атмосферы $C_n^2(h)$ и определить высоты, соответствующие делению всей толщи атмосферы на слои, вносящие одинаковый вклад в величину момента $\mu_{5/3}$ и, как следствие, в величину угла изопланатизма θ_0 . При выделении для коррекции двух слоев атмосферной турбулентности первый корректор волнового фронта сопрягается со слоем, для которого $0 < \chi_{5/3}(0, h) < 0,5$, второй корректор волнового фронта сопрягается со слоем, для которого $0,5 < \chi_{5/3}(0, h) < 1$. При выделении для коррекции трех слоев атмосферной турбулентности первый корректор волнового фронта сопрягается со слоем, для которого $0 < \chi_{5/3}(0, h) < 0,33$, второй корректор волнового фронта сопрягается со слоем, для которого $0,333 < \chi_{5/3}(0, h) < 0,667$, третий корректор волнового фронта сопрягается со слоем, для которого $0,667 < \chi_{5/3}(0, h) < 1$ и т. д.

Существуют различные модели высотного профиля $C_n^2(h)$ флуктуаций показателя преломления атмосферы (моделей атмосферы) [5]. В последнее время при проведении прикладных исследований часто отдается предпочтение модели Хафнагеля – Валлея (модель HV) [6], допускающей настройку параметров для различных условий астроклимата, задаваемой выражением

$$C_n^2(h) = A \cdot \exp\left(-\frac{h}{H_A}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{h}{H_B}\right) + C \cdot h^{10} \cdot \exp\left(-\frac{h}{H_C}\right). \quad (5)$$

Модель (5) соответствует среднему астроклимату и предполагает несколько вариантов задания значений параметров A , B , C , H_A , H_B , H_C для различной степени атмосферной турбулентности. В табл. 1 приведены три варианта задания значений указанных параметров (модели HV5-7, HV10-10, HV12-15) и соответствующие им расчетные значения угла изопланатизма θ_0 .

Таблица 1

Параметры моделей Хафнагеля – Валлея

Модель	A	H_A , м	B	H_B , м	C	H_C , м	θ_0 , мкрад
HV5-7	$17 \cdot 10^{-15}$	100	$2,7 \cdot 10^{-17}$	1500	$3,59 \cdot 10^{-53}$	1000	6,9
HV10-10	$4,5 \cdot 10^{-15}$	100	$9 \cdot 10^{-17}$	1500	$2 \cdot 10^{-53}$	1000	10,1
HV12-15	$2 \cdot 10^{-15}$	100	$7 \cdot 10^{-17}$	1500	$1,54 \cdot 10^{-53}$	1000	11,9

Проанализируем результаты расчетов функции $\chi_{5/3}(0, h)$ на основе модели атмосферы Хафнагеля – Валлея вида (5). На рис. 1 приведены расчетные графики функции $\chi_{5/3}(0, h)$, определяемой выражением (3), для моделей Хафнагеля – Валлея при задании их параметров A , B , C , H_A , H_B , H_C в соответствии с табл. 1.

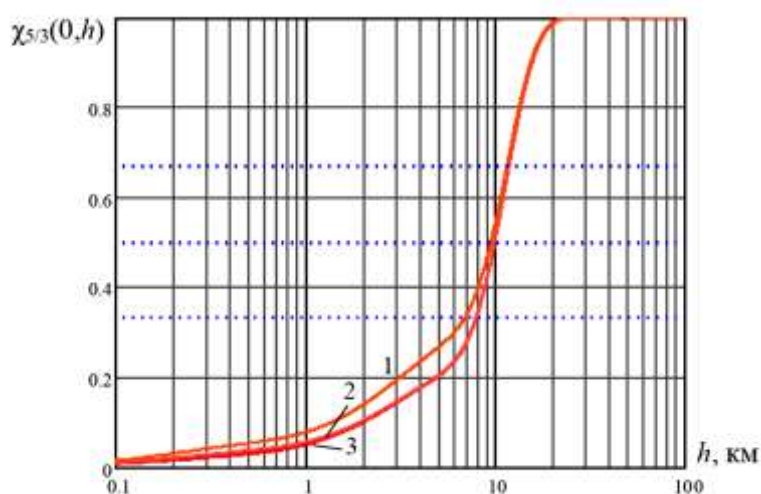


Рис. 1. Нормированные функции, характеризующие влияние различных слоев атмосферной турбулентности на величину угла изопланатизма для наземной оптической системы

Кривая 1 соответствует модели HV5-7, кривая 2 – модели HV10-10, кривая 3 – модели HV12-15. С увеличением высоты h значения функции $\chi_{5/3}(0, h)$ благодаря нормировке изменяются от 0 до 1, достигают значения 0,9 при $h \approx 14$ км и максимального единичного значения при $h \approx 20$ км. Для трех рассмотренных моделей функции $\chi_{5/3}(0, h)$ отличаются незначительно, при этом для двух последних моделей они практически совпадают. На графике также показаны уровни 0,333, 0,5 и 0,667 значений функции $\chi_{5/3}(0, h)$, которые могут быть использованы для определения высот слоев атмосферной турбулентности, с которыми должны сопрягаться корректоры волнового фронта при выделении для многосопряженной адаптивной фазовой коррекции двух и трех слоев.

Основной вклад в величину момента $\mu_{5/3}$ и, как следствие, в величину угла изопланатизма θ_0 для рассмотренных моделей вносит слой атмосферной турбулентности, лежащей в диапазоне высот $5 \text{ км} < h < 15 \text{ км}$. При этом исходные модели абсолютных значений высотного профиля $C_n^2(h)$ флуктуаций показателя преломления атмосферы соответствуют различной степени атмосферной турбулентности и значениям угла изопланатизма, отличающимся примерно в 2 раза. Близость зависимостей $\chi_{5/3}(0, h)$, имеющих относительный характер, для различной степени атмосферной турбулентности показывает, что вклад каждого из слоев атмосферной турбулентности в величину угла изопланатизма θ_0 слабо зависит от степени турбулентности. Следовательно, высоты слоев атмосферной турбулентности, с которыми сопрягаются корректоры волнового фронта при многосопряженной адаптивной фазовой коррекции, оказываются примерно одинаковыми при различной степени атмосферной турбулентности.

Найденные на основе высотного профиля $C_n^2(h)$ значения высот слоев атмосферной турбулентности h , с которыми должны быть сопряжены корректоры волнового фронта многосопряженной адаптивной оптической системы при распространении оптического излучения по вертикальной трассе при зенитном угле $\beta = 0$, являются исходными для определения дальностей z до слоев, с которыми должны быть сопряжены корректоры волнового фронта при распространении оптического излучения по наклонным трассам при зенитных углах $\beta > 0$. В диапазоне зенитных углов $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ может быть использовано приближенное соотношение $z(\beta) \approx h(0) \cdot \sec \beta$, где $h(0)$ – высота слоя, найденная для случая $\beta = 0$, $z(\beta)$ – соответствующая ей дальность до слоя, с которым должен быть сопряжен корректор волнового фронта при $\beta > 0$.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СЛОЕВ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ РАДИУСА КОГЕРЕНТНОСТИ

Рассмотрим для сравнения влияние различных слоев атмосферной турбулентности на величину радиуса когерентности атмосферных фазовых искажений (радиуса Фрида) r_0 , который определяет степень действующих атмосферных искажений на разрешающую способность наземной ОЭС. Радиус когерентности атмосферных фазовых искажений для наземной оптической системы при распространении оптического излучения в атмосфере на вертикальных и наклонных трассах определяется выражением

$$r_0 = \left[0,423k^2 \sec \beta \int_{(H)} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (6)$$

где k – волновое число, $k = 2\pi/\lambda$;

λ – длина волны оптического излучения;

β – зенитный угол трассы распространения;

$C_n^2(h)$ – высотный профиль флуктуаций показателя преломления атмосферы.

Интегрирование в выражении (6) осуществляется по высоте H от $h = 0$ до $h = \infty$.

Влияние на величину радиуса когерентности r_0 атмосферной турбулентности, находящейся на различных высотах, определяется входящей в выражение (6) величиной

$$\mu_0 = \int_{(H)} C_n^2(h) dh,$$

представляющей собой нулевой момент атмосферной турбулентности μ_0 . Он соответствует значению m -го момента атмосферной турбулентности, определяемого выражением (2), при $m = 0$.

Полагая $m = 0$, интегрирование в выражении (6) по всей толще атмосферы ($0 \leq h < \infty$) дает интегральное значение момента μ_0 , которым определяется радиуса когерентности r_0 , а интегрирование в некотором диапазоне высот $h_1 \leq h < h_2$ дает значение момента $\mu_{5/3}(h_1, h_2)$ для слоя атмосферной турбулентности, лежащего в диапазоне высот $h_1 \leq h < h_2$. В соответствии с выражением (6) радиус когерентности r_0 тем меньше, чем больше величина μ_0 , и обратно пропорционален ей в степени $3/5$. Поэтому влияние слоя атмосферной турбулентности, лежащего в диапазоне высот $h_1 \leq h < h_2$, на величину радиуса когерентности r_0 для наземной оптической системы характеризует функция

$$\chi_0(h_1, h_2) = \left[\frac{\mu_0(h_1, h_2)}{\mu_0} \right]^{3/5}, \quad (7)$$

где $\mu_0(h_1, h_2) = \int_{h_1}^{h_2} C_n^2(h) dh$.

Проанализируем результаты расчетов функции $\chi_{5/3}(0, h)$ на основе модели атмосферы Хафнагеля – Валлея вида (5). На рис. 2 приведен расчетный график функции $\chi_{5/3}(0, h)$, определяемой выражением (7), для модели HV5-7. Из трех рассматриваемых моделей Хафнагеля – Валлея данная модель соответствует наиболее сильной степени атмосферной турбулентности и характеризует наихудший случай с точки зрения влияния атмосферных фазовых искажений на работу наземных оптических систем. С увеличением высоты h функция $\chi_{5/3}(0, h)$ благодаря нормировке изменяется от 0 до 1, достигая значения 0,9 при $h = 1$ км и максимального единичного значения при $h \approx 10$ км. На графике также показаны уровни 0,333, 0,5 и 0,667 значений функции $\chi_{5/3}(0, h)$.

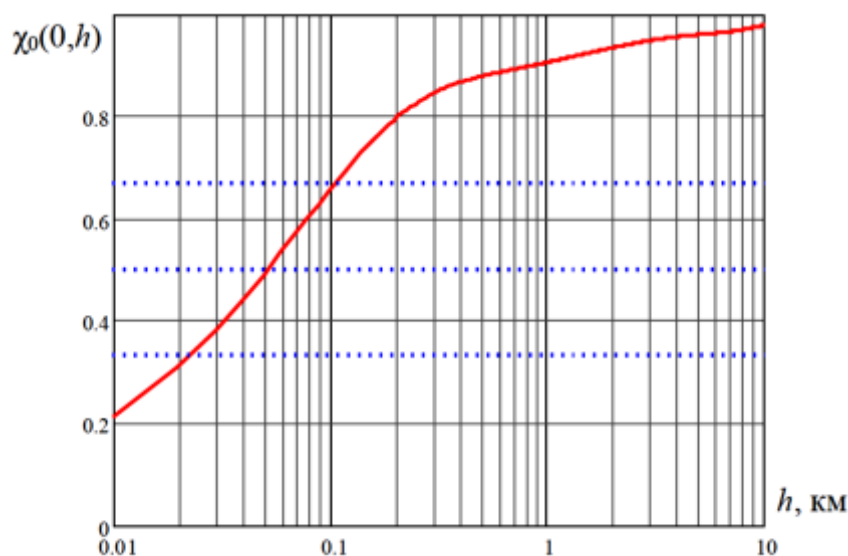


Рис. 2. Нормированная функция, характеризующая влияние различных слоев атмосферной турбулентности на величину радиуса когерентности для наземной оптической системы

Основной вклад в величину момента μ_0 и, как следствие, радиуса когерентности r_0 для рассмотренной модели вносит приземный слой атмосферной турбулентности, лежащей в диапазоне высот $h < 500$ м. Таким образом, на величины угла изопланатизма θ_0 и радиуса когерентности r_0 основное влияние оказывают различные слои атмосферной турбулентности: на величину угла изопланатизма θ_0 – слои атмосферной турбулентности толщиной в несколько километров со средней высотой около 10 км, а на величину радиуса когерентности r_0 – приземный слой атмосферной турбулентности толщиной в несколько сотен метров. Слой атмосферной турбулентности, определяющий величину r_0 , полностью лежит в нижнем слое атмосферной турбулентности, выделяемом при анализе ее влияния на величину угла изопланатизма θ_0 , а более высокие слои атмосферной турбулентности, выделяемые при анализе ее влияния на величину угла изопланатизма θ_0 , на величину радиуса когерентности r_0 влияния практически не оказывают. Следовательно, при многосопряженной адаптивной фазовой коррекции один корректор волнового фронта должен быть сопряжен с нижним слоем атмосферной турбулентности и обеспечивать коррекцию атмосферных искажений, влияющих на разрешающую способность наземной ОЭС без учета анизопланатизма, а остальные корректоры волнового фронта, сопряженные с более высокими слоями атмосферной турбулентности, корректируют только атмосферные искажения, влияющие на анизопланатизм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преодоление проблемы неизопланатичности действующих атмосферных фазовых искажений является одним из важных аспектов реализации базовых технологий адаптивной фазовой коррекции для применения наземных ОЭС с крупными телескопами в условиях среднего астроклимата. Проведенный анализ позволил определить на основе моделей атмосферы слои атмосферы, которые вносят основной вклад в выполнение условия изопланатизма для наземной оптической системы. Коррекция фазовых искажений в этих слоях атмосферы с помощью многосопряженных адаптивных оптических систем позволит устранить ошибку анизопланатизма.

С использованием модели высотного профиля флуктуаций показателя преломления атмосферы Хафнагеля – Валлея определены условия коррекции ошибки изопланатизма при многосопряженной адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений в наземных ОЭС с крупными оптическими телескопами. Показано, что высоты слоев атмосферной турбулентности, с которыми сопрягаются корректоры волнового фронта при многосопряженной адаптивной фазовой коррекции, оказываются примерно одинаковыми при различной степени атмосферной турбулентности. При этом корректор волнового фронта, сопряженный с нижним слоем атмосферной турбулентности, обеспечивает коррекцию атмосферных искажений, влияющих на разрешающую способность наземной ОЭС без учета анизопланатизма, а корректоры волнового фронта, сопряженные с более высокими слоями атмосферной турбулентности, корректируют только атмосферные искажения, влияющие на анизопланатизм. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании наземных высокоразрешающих ОЭС с адаптивной коррекцией атмосферных фазовых искажений.

Список используемых источников

1. Свиридов К. Н. Атмосферная оптика высокого углового разрешения. – М. : Знание, 2007. – Т. 1. – 200 с.

2. *Бронштейн Ю. Л.* Геометрия и юстировка крупных зеркальных систем. – М. : ДПК Пресс, 2020. – 820 с.
3. *Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И.* Теория оптических систем. – СПб. : Лань, 2022. – 448 с.
4. *Большасова Л. А., Лукин В. П.* Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. – М. : Физматлит, 2012. – 128 с.
5. *Зуев В. Е., Креков Г. М.* Оптические модели атмосферы. – Л. : Гидрометеиздат, 1986. – 258 с.
6. *Седов Е. С., Седова И. Е.* Физические и математические принципы адаптивной оптики. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. – 96 с.

М. С. Паршин¹;
С. Е. Шалдаев²,

доктор технических наук, профессор

¹ ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

² ЦНИИ ВКС МО РФ, г. Москва.

КОРРЕКЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Предложен способ коррекции поляризационных искажений поляриметрической широкополосной активной фазированной антенной решетки, возникающих вследствие не идеальности векторной амплитудно-фазовой частотной характеристики каждого излучателя, а также ошибок их положения и ориентации. При моделировании процесса зондирования передаточные функции элементов и процессов представлены в виде блочных матриц. Использование блочных матриц позволяет хранить и использовать информацию о поляризационных характеристиках радиочастотного тракта. Поляризационная калибровка проводится для каждого отдельного излучателя из состава антенного модуля АФАР. При получении коэффициентов коррекции применяется псевдообращение Мура – Пенроуза над матрицами парциальных калибровочных сигналов.

Ключевые слова: поляриметрические измерения, радиолокация, матрица рассеяния, активная фазированная антенная решетка, поляризационная калибровка.

ВВЕДЕНИЕ

Теория и практика применения поляриметрических широкополосных активных фазированных антенных решеток (ПМ ШП АФАР) для получения поляризационных характеристик точечных и распределенных целей на протяжении нескольких десятков лет широко используются для мониторинга погоды, радиоастрономических наблюдений, дистанционного зондирования Земли и пр. Учет поляризационных характеристик отражения объектов при решении радиолокационных задач позволяет повысить помехоустойчивость и вероятность обнаружения, а также улучшить эффективность распознавания лоцируемых объектов и поверхностей.

Процесс диаграммообразования в АФАР включает в себя работу множества радиочастотных компонентов, что повышает вероятность ошибок в приемопередающем тракте радиолокационной системы в результате искажения амплитудно-фазовой частотной характеристики последних. Кроме того, поляризационная составляющая комплексной векторной диаграммы направленности чувствительна к геометрическому положению излучателей и при отсутствии достоверной информации об их реальных координатах и ориентации может некорректно учитываться при управлении сканирующим лучом. Таким образом, в результате влияния различных дестабилизирующих и геометрических факторов поляриметрические измерения будут искажены, что снизит или полностью исключит эффективность поляризационной обработки радиолокационной информации.

Задача исправления искаженных сигналов решается с помощью применения к измерениям коэффициентов коррекции, полученных по результатам калибровки. Выбор схемы калибровки и коррекции непосредственно связан с выбором модели поляриметрической системы. Прежде всего, любая модель радиополяриметра должна иметь элементы матричной структуры, так как это задано измеряемой характеристикой – матрицей рассеяния цели. Кроме того, использование матриц характерно для имитации процессов в антенной решетке. Указанные особенности определяют матричное описание построения ДН ПМ ШП АФАР. Известные модели поляриметрических антенн [1–3] рассматривают антенную решетку либо как по-

ляриметрический измеритель в целом, что является самым верхним уровнем, либо как набор независимых антенных подрешеток, блоков или элементов с поляризационным управлением, что позволяет повышать детализацию модели вплоть до антенного модуля с двухпортовым управлением.

В моделях верхнего уровня, в целях сокращения поляризационных искажений в случае нарушения работы некоторого количества антенных модулей радиополяриметра, предъявляются высокие требования к повторяемости поляризационных характеристик направленности последних. Здесь калибровка используется для коррекции искажений от факторов, оказывающих равнодействующее влияние на все излучатели решетки, например наклон АФАР. Такие модели подходят к решеткам с небольшим количеством антенных модулей и механическим управлением лучом. При электронном управлении диаграммой направленности калибровку необходимо проводить для каждого набора управляющих весовых коэффициентов, что невозможно при осуществлении адаптивного управления.

При снижении уровня моделирования процесса диаграммообразования поляризационные искажения рассматриваются как факт перетекания энергии между поляризационными каналами модуля при их неортогональности в силу конструктивных особенностей или в результате влияния факторов искажения [4]. Как показано на рис. 1, а и б, поляризационные искажения в классических моделях могут рассчитываться до или после излучения. По отдельности показанные варианты недостаточны для отражения некоторых реальных процессов, а их совместное использование создает избыточность в модели.

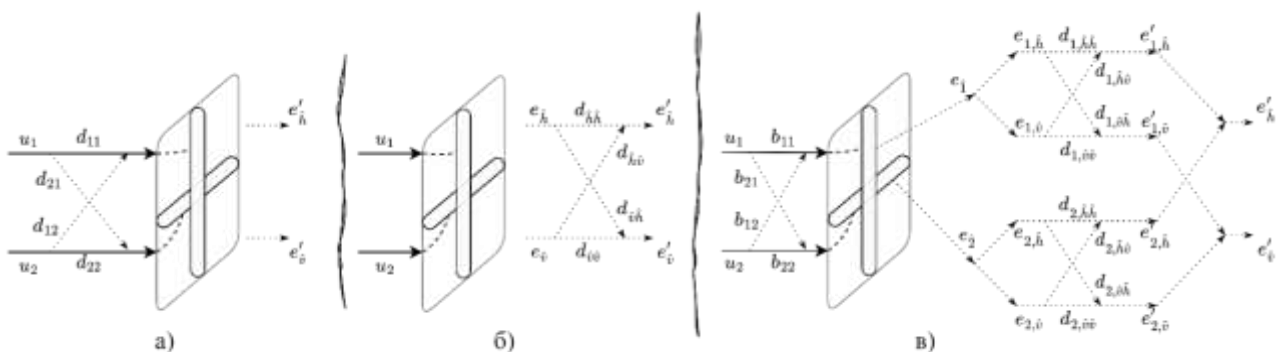


Рис. 1. Модели учета искажений поляризации зондирующего сигнала антенного модуля, состоящего из двух излучателей:

а, б – классическая модель; в – разработанная модель

Для преодоления недостатков существующих подходов предлагается моделировать ПМ АФАР множеством диаграмм направленности парциальных излучателей – как простейшего элемента антенной решетки, в котором не предусмотрено изменение поляризации излучаемой волны. Например, для крест-вибратора в роли парциальных излучателей выступают его плечи, а управляемая полосковая антенна разделяется на несколько излучателей с одной точкой питания для каждого. Как показано на рис. 1, в, такой подход в моделировании АФАР позволяет рассматривать искажение скалярных и векторных сигналов обособленно.

Цель данной статьи – коррекция искажений в измеренной матрице рассеяния цели, возникших в результате влияния дестабилизирующих и геометрических факторов на векторные зондирующие сигналы. Построение матричной модели ПМ ШП АФАР, отвечающей заданным требованиям, разработка способа ее калибровки и нахождение коэффициентов коррекции поляризационных измерений выступают как задачи, стоящие перед авторами, вариант решения которых предложен ими в статье.

ВЕКТОРНО-МАТРИЧНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АФАР

Диаграмма направленности (ДН) как зависимость распределения величины напряженности электромагнитного поля от направления наблюдения – есть базовая характеристика антенны:

$$f(\xi, \varphi, \theta) = |f(\xi, \varphi, \theta)| \cdot \exp(j \cdot \arg(f(\xi, \varphi, \theta))), \quad (1)$$

где ξ – частота сигнала;
 φ, θ – азимут и широта направления наблюдения в сферической системе координат (ССК);
 $|f(\xi, \varphi, \theta)|$ – амплитуда колебания;
 $\arg(f(\xi, \varphi, \theta))$ – фаза колебания;
 j – мнимая единица.

Для учета поляризационной характеристики направленности при моделировании процесса диаграммообразования используется определение комплексно-векторной диаграммы направленности (КВДН):

$$\vec{f}(\xi, \varphi, \theta) = f(\xi, \varphi, \theta) \cdot \vec{\rho}(\xi, \varphi, \theta), \quad (2)$$

где $\vec{\rho}(\xi, \varphi, \theta)$ – вектор, описывающий эллиптически поляризованную волну с единичной амплитудой и фиксированной фазой. Пусть вектор $\vec{\rho}$ задан в линейном поляризационном базисе $\{\hat{h}, \hat{v}\}$, где \hat{h} и \hat{v} – единичные векторы, касательные к координатным линиям ССК и направленные в сторону возвышения координат θ и φ соответственно:

$$\vec{\rho}(\xi, \varphi, \theta) = \begin{bmatrix} |\rho_{\hat{h}}(\xi, \varphi, \theta)| \cdot \exp(j \cdot \arg(\rho_{\hat{h}}(\xi, \varphi, \theta))) \\ |\rho_{\hat{v}}(\xi, \varphi, \theta)| \cdot \exp(j \cdot \arg(\rho_{\hat{v}}(\xi, \varphi, \theta))) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{\hat{h}}(\xi, \varphi, \theta) \\ \rho_{\hat{v}}(\xi, \varphi, \theta) \end{bmatrix},$$

$$\vec{\rho}(\xi, \varphi, \theta)^H \cdot \vec{\rho}(\xi, \varphi, \theta) = 1, \quad (3)$$

где H – знак эрмитового сопряжения.

С учетом (3) напряженность электрического поля, создаваемого излучателем с номером i на частоте ξ в точке заданной вектором \vec{r} в ССК, определяется выражением

$$\vec{E}_i(\xi, \vec{r}) = \sqrt{\frac{Z_r \cdot G_i(\xi) \cdot P_i}{4 \cdot \pi \cdot L_r}} \cdot \frac{\exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot (r/c + \tau_i))}{r + \tau_i \cdot c} \cdot \vec{\rho}_i(\xi, \varphi, \theta). \quad (4)$$

Здесь

$$L_r = \max\left(\left(4 \cdot \pi \cdot r \cdot \xi / c\right)^2; 1\right); \quad (5)$$

$$\tau_i = [-\cos(\varphi) \cdot \cos(\theta) \quad -\sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) \quad -\sin(\theta)] \cdot \mathbf{p}_i / c, \quad (6)$$

где Z_r – волновое сопротивление свободного пространства, $Z_r = 120\pi$ Ом;
 $G_i(\xi, \varphi, \theta)$ – коэффициент усиления излучателя;

- P_i – мощность излучения;
 L_r – потери при распространении в свободном пространстве;
 τ_i – временная задержка излучателя относительно центра системы координат АФАР [5];
 ψ_r – фазовый сдвиг в точке \vec{r} ;
 \vec{p}_i – вектор положения излучателя на АФАР в прямоугольной системе координат.

Здесь и далее под излучателем понимается самостоятельная антенна с неуправляемой поляризацией или парциальная антенна антенного модуля, выполненного в виде крест-вибраторной, полосковой, либо иной другой антенны, имеющей более одной точки питания.

Уравнение (4) оперирует векторной амплитудно-фазовой частотной характеристикой излучателя в рассматриваемом поляризационном базисе. Однако отношение $G_i(\xi)/(4 \cdot \pi)$ используется для описания равномерного распределения усиления в рассматриваемом секторе. Для более корректного отражения вклада амплитудной характеристики направленности необходимо заменить представленное отношение функцией направления наблюдения $G_i(\xi, \varphi, \theta)$. Тогда векторная передаточная функция i -го излучателя без учета временной задержки τ_i рассчитывается по формуле

$$\vec{g}_i(\xi, \varphi, \theta) = \sqrt{G_i(\xi, \varphi, \theta)/Z_i(\xi)} \cdot \vec{p}_i(\xi, \varphi, \theta), \quad (7)$$

где Z_i – полное сопротивление излучателя в функции мощности $P_i = u_i^2/Z_i$.

Потери мощности сигнала при прохождении расстояния $\tau_i \cdot c$ несравнимо малы по отношению к потерям на расстоянии r и ими можно пренебречь. Исключение коэффициентов, связанных с расстоянием, из уравнения (4) позволяет получить значение вектора интенсивности излучения:

$$\vec{E}_i(\xi, \varphi, \theta)/\sqrt{Z_r} = \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot \tau_i) \cdot \vec{g}_i(\xi, \varphi, \theta) \cdot u_i(\xi), \quad (8)$$

квадрат которого равен модулю вектора Пойнтинга.

Пусть далее фазосдвигающий коэффициент, вызванный временной задержкой τ_i , обозначается как $\psi_i = \psi_i(\xi, \varphi, \theta)$:

$$\psi_i(\xi, \varphi, \theta) = \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot \tau_i). \quad (9)$$

Для АФАР выражение (8) имеет вид

$$\frac{\vec{E}_i(\xi, \varphi, \theta)}{\sqrt{Z_r}} = \sum_{i=1}^n \left(\psi_i \cdot \begin{bmatrix} g_{\hat{h},i}(\xi, \varphi, \theta) \\ g_{\hat{v},i}(\xi, \varphi, \theta) \end{bmatrix} \cdot u_i(\xi) \right), \quad (10)$$

что в матричной форме записывается как

$$\frac{\vec{E}_i(\xi, \varphi, \theta)}{\sqrt{Z_r}} = \begin{bmatrix} g_{\hat{h},1}(\xi, \varphi, \theta) & \cdots & g_{\hat{h},n}(\xi, \varphi, \theta) \\ g_{\hat{v},1}(\xi, \varphi, \theta) & \cdots & g_{\hat{v},n}(\xi, \varphi, \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \psi_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(\xi) \\ \vdots \\ u_n(\xi) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где i, n – номер и количество излучателей.

Матричная модель, как правило, должна отражать процесс в той последовательности, в которой он происходит в реальности. В выражении (11) матрица фазовых задержек располо-

жена справа от матрицы множителей КВДН излучателей, что нарушает принцип последовательности. Перестановка матриц требует учитывать некоммутативность их умножения, следовательно, необходимо провести дополнительные преобразования структуры матричных множителей:

$$\frac{\vec{E}_i(\xi, \varphi, \theta)}{\sqrt{Z_r}} = \left(\mathbf{1}_n \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^T \cdot \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \psi_n \end{bmatrix} \right) \cdot \bigoplus_{i=1}^n \begin{bmatrix} g_{\hat{h},i}(\xi, \varphi, \theta) \\ g_{\hat{v},i}(\xi, \varphi, \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(\xi) \\ \vdots \\ u_n(\xi) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $\mathbf{1}_n$ – вектор-столбец из n единиц;

T – транспонирование матрицы;

\otimes – произведение Кронекера;

$\bigoplus_{i=1}^n$ – знак прямой суммы.

Далее для выражения (12) вводятся следующие замены:

$$\begin{aligned} \Upsilon_n &= \left(\mathbf{1}_n \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^T; \\ \Psi(\xi, \varphi, \theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \psi_n \end{bmatrix}; \\ \mathbf{G}(\xi, \varphi, \theta) &= \bigoplus_{i=1}^n \begin{bmatrix} g_{\hat{h},i}(\xi, \varphi, \theta) \\ g_{\hat{v},i}(\xi, \varphi, \theta) \end{bmatrix}; \\ \mathbf{u}(\xi) &= [u_1(\xi) \quad \cdots \quad u_n(\xi)]^T, \end{aligned}$$

где Υ_n – матрица суммирования (размер $2 \times 2n$), которая является блочным вектором-строкой, состоящим из n единичных матриц размером 2×2 ;

Ψ – матрица фазовых задержек;

$\mathbf{G}(\xi, \varphi, \theta)$ – блочно-диагональная матрица векторных передаточных функций излучателей АФАР;

$\mathbf{u}(\xi)$ – вектор-столбец напряжений на зажимах излучателей.

Излучатели на антенном полотне отказывают взаимное влияние друг на друга [6], учет которого реализуется с помощью матричного множителя $\mathbf{Z}_0(\xi)$, представляющего собой нормализованную матрицу собственных и взаимных импедансов:

$$\mathbf{u}_z(\xi) = \mathbf{Z}_0(\xi) \cdot \mathbf{u}(\xi). \quad (13)$$

Нахождение матрицы импедансов поляриметрической АФАР может осуществляться классическим способом [7]:

$$\mathbf{Z}_0(\xi) = \begin{bmatrix} 1 + Z_{11}/Z_1 & Z_{12}/Z_1 & \cdots & Z_{1n}/Z_1 \\ Z_{21}/Z_2 & 1 + Z_{22}/Z_2 & \cdots & Z_{2n}/Z_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}/Z_n & Z_{n2}/Z_n & \cdots & 1 + Z_{nn}/Z_n \end{bmatrix},$$

где $Z_{ij}(\xi)$ – взаимные сопротивления излучателей.

Управление формой КВДН АФАР осуществляется с помощью комплексных весовых коэффициентов $w_i(\xi)$ для каждого излучателя:

$$\mathbf{u}(\xi) = \mathbf{W}(\xi) \cdot \mathbf{x}(\xi), \quad (14)$$

где $\mathbf{W}(\xi)$ – диагональная матрица весовых коэффициентов управления КВДН;

$\mathbf{x}(\xi)$ – излучаемый сигнал.

Подстановка выражений (13), (14) в (12) позволяет переписать последнее как

$$\bar{E}_i(\xi, \varphi, \theta) / \sqrt{Z_r} = \Upsilon_n \cdot \Psi(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{G}(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{Z}_0(\xi) \cdot \mathbf{W}(\xi) \cdot \mathbf{x}(\xi), \quad (15)$$

где произведение $\Psi(\xi) \cdot \mathbf{G}(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{Z}_0(\xi)$ есть постоянный матричный множитель сигнала, который характеризует матричную передаточную функцию АФАР при формировании КВДН и далее определяется как оператор КВДН:

$$\mathbf{F}(\xi, \varphi, \theta) = \Psi(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{G}(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{Z}_0(\xi). \quad (16)$$

Выражение (16) характеризует процесс диаграммообразования в идеальных условиях, однако АФАР сложная многоступенчатая система формирования и обработки зондирующего сигнала, подверженная воздействию дестабилизирующих и геометрических факторов. В результате влияния настоящих факторов в радиолокационной системе происходит изменение парциальных составляющих зондирующего сигнала при их нахождении как в скалярной, так и в векторной формах. На схеме (рис. 2) блоками \mathbf{B} и \mathbf{D} показаны области, в которых сигналы претерпевают искажения. Для учета влияния совокупности факторов в уравнении оператора КВДН (16) представленные области искажений заданы в виде матриц $\mathbf{B}(\xi)$ и $\mathbf{D}(\xi, \varphi, \theta)$:

$$\mathbf{F}(\xi, \varphi, \theta) = \Psi(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{D}(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{G}(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{Z}_0(\xi) \cdot \mathbf{B}(\xi). \quad (17)$$

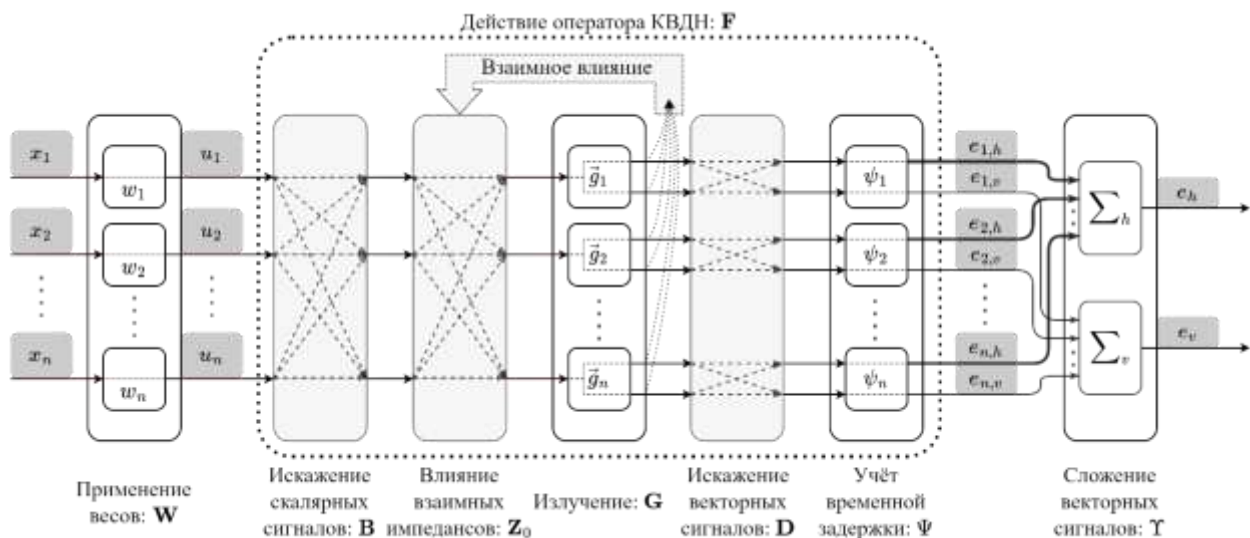


Рис. 2. Схема формирования КВДН поляриметрической АФАР при излучении зондирующего сигнала

Матрица $\mathbf{B}(\xi)$ отражает влияние дестабилизирующих факторов в тракте радиолокационной системы и может включать в себя учет неидеальности импульсных характеристик узлов и радиоэлементов тракта, наведенных и перекрестных помех в линиях передачи, фазовых шумов, ошибок управления, особенностей работы аппаратуры и других проявлений работы звеньев искажения скалярных сигналов [8]. Матрица $\mathbf{B}(\xi)$ является квадратной матрицей размером $n \times n$, где n – количество излучателей. В общем случае матрица $\mathbf{B}(\xi)$ будет плотной.

Матрица $\mathbf{D}(\xi, \varphi, \theta)$ отражает влияние как дестабилизирующих, так и геометрических факторов на парциальные составляющие векторных сигналов поля АФАР. К первым могут относиться ошибки амплитудно-фазовой частотной характеристики антенн, а ко вторым – процессы, приводящие к изменению положения и ориентации излучателей на антенном полотне. Матрица $\mathbf{D}(\xi, \varphi, \theta)$ является квадратной блочной матрицей размером $2n \times 2n$ и состоит из блоков размером 2×2 . Матрица $\mathbf{D}(\xi, \varphi, \theta)$ описывает поляризационные искажения парциальных векторных сигналов, а поскольку перетекание энергии между пространственными каналами излучателей не происходит [9], то все недиагональные блоки матрицы $\mathbf{D}(\xi, \varphi, \theta)$ состоят из нулей, следовательно,

$$\mathbf{D}(\xi, \varphi, \theta) = \bigoplus_{i=1}^n \mathbf{D}_i(\xi, \varphi, \theta). \quad (18)$$

Рассмотренные факторы имеют линейную природу и вызывают медленно меняющиеся ошибки в процессе функционирования системы.

Передающая и приемная системы могут состоять из разного набора радиоэлементов, однако в силу их взаимности использование оператора КВДН допустимо и целесообразно для последней в транспонированном виде, тогда $\mathbf{F}_T(\xi, \varphi, \theta)$ – оператор КВДН при излучении, $\mathbf{F}_R^T(\xi, \varphi, \theta)$ – при приеме. Таким образом, принятый сигнал $\mathbf{y}(\xi)$, как результат однократного зондирования цели с матрицей рассеяния $\mathbf{S}(\xi)$, равен:

$$\mathbf{y}(\xi) = \mathbf{W}_R(\xi) \cdot \mathbf{F}_R^T(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{Y}_q^T \cdot \mathbf{S}(\xi) \cdot \mathbf{Y}_p \cdot \mathbf{F}_T(\xi, \varphi, \theta) \cdot \mathbf{W}_T(\xi) \cdot \mathbf{x}(\xi) + \mathbf{n}(\xi), \quad (19)$$

где $\mathbf{W}_T(\xi)$, $\mathbf{W}_R(\xi)$ – диагональные матрицы весовых коэффициентов управления лучом ДН при излучении и приеме;

q, p – количество приемных и передающих излучателей соответственно;

$\mathbf{n}(\xi)$ – шум.

В формуле (19) и далее обозначения под чертой – это размер матрицы или вектора-столбца, расположенного над чертой, что указывается справочно.

Для вычисления матрицы $\mathbf{S}(\xi)$ необходимо провести минимум два измерения, между тем достаточность количества зондирований m определяется характеристиками радиолокационной системы, особенностями ее применения и уровнем отношения сигнал/шум. При реализации m зондирований выражение получения матрицы рассеяния цели $\mathbf{S}(\xi)$ записывается как

$$\mathbf{S}(\xi) = \mathbf{Y}_m \cdot \bigoplus_{j=1}^m \left(\mathbf{Y}_q \cdot \mathbf{F}_R(\xi, \varphi^{(j)}, \theta^{(j)}) \right)^{\#T} \cdot \mathbf{Y}_w(\xi) \cdot \left(\mathbf{Y}_m \cdot \bigoplus_{j=1}^m \left(\mathbf{Y}_p \cdot \mathbf{F}_T(\xi, \varphi^{(j)}, \theta^{(j)}) \right) \cdot \mathbf{X}_w(\xi) \right)^{\#}; \quad (20)$$

$$\mathbf{Y}_w(\xi) = \bigoplus_{j=1}^m (\mathbf{W}_R^{\{j\}+}(\xi) \cdot \mathbf{y}^{\{j\}}(\xi)), \quad \mathbf{X}_w(\xi) = \bigoplus_{j=1}^m (\mathbf{W}_T^{\{j\}}(\xi) \cdot \mathbf{x}^{\{j\}}(\xi)), \quad (21)$$

где # – псевдообращение Мура – Пенроуза;
 + – обращение матрицы;
 $\{j\}$ – номер зондирования (верхний числовой индекс);
 $\varphi^{\{j\}}, \theta^{\{j\}}$ – азимут и широта направления наблюдения в j -м зондировании;
 $\mathbf{X}_w(\xi)$,
 $\mathbf{Y}_w(\xi)$ – блочно-диагональные матрицы взвешенных излученных и принятых сигналов.

Корректное вычисление матрицы рассеяния по формуле (20) возможно при известных матрицах $\mathbf{Z}_0(\xi)$, $\mathbf{B}(\xi)$ и $\mathbf{D}(\xi, \varphi, \theta)$. Оценка вклада взаимного влияния и дестабилизирующих и геометрических факторов может осуществляться как в совокупности, так и отдельно, в зависимости от используемого калибровочного оборудования и задач калибровки. При раздельной калибровке способы получения коэффициентов матриц $\mathbf{Z}_0(\xi)$ и $\mathbf{B}(\xi)$ для поляриметрической АФАР схожи с подходами для обычных решеток без поляризационного канала и широко рассмотрены в литературе. В следующем разделе рассмотрен способ калибровки поляриметрической АФАР с получением коэффициентов коррекции сигнала, искажения в который внесены матрицами $\mathbf{D}_T(\xi, \varphi, \theta)$ и $\mathbf{D}_R(\xi, \varphi, \theta)$.

КАЛИБРОВКА ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ АФАР И КОРРЕКЦИЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Калибровка поляриметрической широкополосной АФАР проводится с использованием калибровочной мишени или калибровочного оборудования с передающей и/или приемной поляриметрической антенной. В настоящей статье показан способ калибровки с помощью приемной и передающей калибровочной антенны, который может быть обобщен для калибровки по мишеням в будущем [2].

Калибровка передающих излучателей осуществляется с использованием калибровочных сигналов, переданных в направлении приемной антенны калибровочного оборудования. Согласно разработанной модели, влияние матрицы $\mathbf{D}_{T,i}$ на векторную передаточную функцию $\vec{g}_{T,i}$ излучателя при передаче записывается как

$$\vec{E}_{T,i} = \mathbf{D}_{T,i} \cdot \vec{g}_{T,i} \cdot u_i. \quad (22)$$

Здесь и далее делитель $\sqrt{Z_r}$ из выражения (15) опущен, так как он не влияет на общность выводов. Также матрицы $\mathbf{Z}_0(\xi)$, $\mathbf{B}(\xi)$ считаются известными, и их влияние учтено в значениях напряжений.

Вектор $\vec{g}_{T,i}$ можно представить как единичный вектор $\vec{g}_{T,\hat{c}\hat{x},i} = [1 \ 0]^T$ путем его умножения на матрицу перехода:

$$\mathbf{Q}_i = \frac{1}{\vec{g}_i^H \cdot \vec{g}_i} \cdot \begin{bmatrix} \overline{g_{\hat{h}}} & \overline{g_{\hat{v}}} \\ -\overline{g_{\hat{v}}} & \overline{g_{\hat{h}}} \end{bmatrix}_i, \quad (23)$$

где обозначение в нижнем индексе квадратных скобок $[]_i$ – общий индекс для всех элементов матрицы. Так как $\mathbf{Q}_i^+ \cdot \mathbf{Q}_i$ – единичная матрица, то выражение (22) принимает вид

$$\begin{aligned} \vec{E}_{T,i} &= \mathbf{D}_{T,i} \cdot \mathbf{Q}_{T,i}^+ \cdot \mathbf{Q}_{T,i} \cdot \vec{g}_{T,i} \cdot u_i = \begin{bmatrix} d_{\hat{h}\hat{h}} \overline{g_{\hat{h}}} + d_{\hat{h}\hat{v}} \overline{g_{\hat{v}}} & d_{\hat{h}\hat{v}} \overline{g_{\hat{h}}} - d_{\hat{h}\hat{h}} \overline{g_{\hat{v}}} \\ d_{\hat{v}\hat{h}} \overline{g_{\hat{h}}} + d_{\hat{v}\hat{v}} \overline{g_{\hat{v}}} & d_{\hat{v}\hat{v}} \overline{g_{\hat{h}}} - d_{\hat{v}\hat{h}} \overline{g_{\hat{v}}} \end{bmatrix}_{T,i} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_i = \\ &= \begin{bmatrix} d_{\hat{h}\hat{h}} \overline{g_{\hat{h}}} + d_{\hat{h}\hat{v}} \overline{g_{\hat{v}}} \\ d_{\hat{v}\hat{h}} \overline{g_{\hat{h}}} + d_{\hat{v}\hat{v}} \overline{g_{\hat{v}}} \end{bmatrix}_{T,i} \cdot u_i, \end{aligned} \quad (24)$$

где $\mathbf{D}_{T,i} \cdot \mathbf{Q}_{T,i}^+$ – это матрица искажений в поляризованном базисе вектора \vec{g}_i , $\mathbf{D}_{T,\hat{c}\hat{x},i} = \mathbf{D}_{T,i} \cdot \mathbf{Q}_{T,i}^+$, $\mathbf{Q}_i \cdot \vec{g}_i = [1 \ 0]^T$. Фактически коэффициенты $d_{T,\hat{c}\hat{x},i} = d_{T,\hat{h}\hat{v},i} \overline{g_{T,\hat{h},i}} - d_{T,\hat{h}\hat{h},i} \overline{g_{T,\hat{v},i}}$ и $d_{T,\hat{x}\hat{x},i} = d_{T,\hat{v}\hat{v},i} \overline{g_{T,\hat{h},i}} - d_{T,\hat{v}\hat{h},i} \overline{g_{T,\hat{v},i}}$ в выражении (24) не могут быть реализованы, а следовательно избыточны и их можно приравнять к нулю. Тогда матрица искажений $\mathbf{D}_{T,\hat{c}\hat{x},i}$ заменяется на $\tilde{\mathbf{D}}_{T,\hat{c}\hat{x},i}$ при помощи операции поэлементного умножения:

$$\tilde{\mathbf{D}}_{T,\hat{c}\hat{x},i} = \mathbf{D}_{T,\hat{c}\hat{x},i} \circ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{\hat{c}\hat{c}} & 0 \\ d_{\hat{x}\hat{x}} & 0 \end{bmatrix}_{T,i} = \begin{bmatrix} d_{\hat{h}\hat{h}} \overline{g_{\hat{h}}} + d_{\hat{h}\hat{v}} \overline{g_{\hat{v}}} & 0 \\ d_{\hat{v}\hat{h}} \overline{g_{\hat{h}}} + d_{\hat{v}\hat{v}} \overline{g_{\hat{v}}} & 0 \end{bmatrix}_{T,i}, \quad (25)$$

следовательно,

$$\tilde{\mathbf{D}}_{T,\hat{c}\hat{x},i} = \frac{1}{u_i} \begin{bmatrix} e_{\hat{h}} & 0 \\ e_{\hat{v}} & 0 \end{bmatrix}_{T,i}. \quad (26)$$

Тогда, при известных значениях сигнала $\vec{E}_{T,i}$, матрица искажений i -го излучателя $\tilde{\mathbf{D}}_{T,i}$ определяется как

$$\tilde{\mathbf{D}}_{T,i} = \tilde{\mathbf{D}}_{T,\hat{c}\hat{x},i} \cdot \mathbf{Q}_{T,i} = \frac{1}{\vec{g}_{T,i}^H \cdot \vec{g}_{T,i} \cdot u_i} \begin{bmatrix} d_{\hat{c}\hat{c}} \overline{g_{\hat{h}}} & d_{\hat{c}\hat{c}} \overline{g_{\hat{v}}} \\ d_{\hat{x}\hat{x}} \overline{g_{\hat{h}}} & d_{\hat{x}\hat{x}} \overline{g_{\hat{v}}} \end{bmatrix}_{T,i} = \frac{1}{\vec{g}_{T,i}^H \cdot \vec{g}_{T,i} \cdot u_i} \begin{bmatrix} e_{\hat{h}} \overline{g_{\hat{h}}} & e_{\hat{h}} \overline{g_{\hat{v}}} \\ e_{\hat{v}} \overline{g_{\hat{h}}} & e_{\hat{v}} \overline{g_{\hat{v}}} \end{bmatrix}_{T,i}. \quad (27)$$

Из формулы (27) следует, что для калибровки передающего излучателя требуется одно зондирование, но необходимо разносить работу с каждым излучателем в частотном или временном диапазонах.

Калибровка приемных излучателей осуществляется с использованием калибровочных сигналов от антенны калибровочного оборудования. Напряжение на зажиме излучателя при приеме сигнала определяется по формуле

$$v_i = \vec{g}_{R,i}^T \cdot \mathbf{D}_{R,i}^T \cdot \vec{E}_{R,i}, \quad (28)$$

где $E_{R,i}$ – калибровочный сигнал, аппроксимированный в область i -го излучателя.

Применение процедуры, проведенной в (24), позволяет получить следующее соотношение:

$$v_i = \vec{g}_{R,i}^T \cdot \mathbf{Q}_{R,i}^T \cdot \mathbf{Q}_{R,i}^{T+} \cdot \mathbf{D}_{R,i}^T \cdot \vec{E}_{R,i} = [1 \ 0] \cdot \mathbf{D}_{R,\hat{c}\hat{x},i}^T \cdot \vec{E}_{R,i}. \quad (29)$$

Здесь умножение на единичный вектор трактуется как поляризационные потери на i -м излучателе, следовательно, приемлемо повторить уже использованный ранее прием:

$$\tilde{\mathbf{D}}_{R,\hat{c}\hat{x},i} = \mathbf{D}_{R,\hat{c}\hat{x},i} \circ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Из выражения (29) следует, что для вычисления коэффициентов матрицы искажений $\tilde{\mathbf{D}}_{T,\hat{c}\hat{x},i}$ необходимо два калибровочных измерения с сигналами различной поляризации:

$$\begin{bmatrix} v_i^{(1)} & v_i^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \tilde{\mathbf{D}}_{R,\hat{c}\hat{x},i}^T \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_{R,i}^{(1)} & \vec{E}_{R,i}^{(2)} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{R,\hat{c}\hat{x},i} = \frac{1}{e_{R,\hat{h},i}^{(1)} e_{R,\hat{v},i}^{(2)} - e_{R,\hat{h},i}^{(2)} e_{R,\hat{v},i}^{(1)}} \begin{bmatrix} -e_{R,\hat{v}}^{(1)} v^{(2)} + e_{R,\hat{v}}^{(2)} v^{(1)} & 0 \\ e_{R,\hat{h}}^{(1)} v^{(2)} - e_{R,\hat{h}}^{(2)} v^{(1)} & 0 \end{bmatrix}_i, \quad (32)$$

а так как $\tilde{\mathbf{D}}_{R,i} = \mathbf{Q}_{R,i} \cdot \tilde{\mathbf{D}}_{R,\hat{c}\hat{x},i}$, то

$$\tilde{\mathbf{D}}_{R,i} = \frac{1}{\bar{g}_{R,i}^H \cdot \bar{g}_{R,i} \cdot (e_{R,\hat{h},i}^{(1)} e_{R,\hat{v},i}^{(2)} - e_{R,\hat{h},i}^{(2)} e_{R,\hat{v},i}^{(1)})} \begin{bmatrix} -\bar{g}_{\hat{h}} (e_{\hat{v}}^{(1)} v^{(2)} - e_{\hat{v}}^{(2)} v^{(1)}) & \bar{g}_{\hat{h}} (e_{\hat{h}}^{(1)} v^{(2)} - e_{\hat{h}}^{(2)} v^{(1)}) \\ \bar{g}_{\hat{v}} (e_{\hat{h}}^{(1)} v^{(2)} - e_{\hat{h}}^{(2)} v^{(1)}) & -\bar{g}_{\hat{v}} (e_{\hat{h}}^{(1)} v^{(2)} - e_{\hat{h}}^{(2)} v^{(1)}) \end{bmatrix}_{R,i}. \quad (33)$$

Приемные излучатели АФАР могут быть откалиброваны одновременно, без частного или временного разнесения, при использовании двух калибровочных сигналов. Такая калибровка требует меньшего ресурса и может проводиться для передающих излучателей при наличии технической возможности.

Как ранее было указано, для вычисления матрицы ошибок \mathbf{D}_i излучателя необходимо малое количество измерений, но в реальных условиях эксплуатации и при наличии шумов количество необходимых измерений может возрасти до m , тогда

$$\tilde{\mathbf{D}}_{T,i} = \begin{bmatrix} \vec{E}_{T,i}^{(1)} \dots \vec{E}_{T,i}^{(m)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i^{(1)} \dots u_i^{(m)} \end{bmatrix}^\# \cdot \bar{g}_{T,i}^\#, \quad (34)$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{R,i} = \begin{bmatrix} \vec{E}_{R,i}^{(1)} \dots \vec{E}_{R,i}^{(m)} \end{bmatrix}^{\#T} \cdot \begin{bmatrix} v_i^{(1)} \dots v_i^{(m)} \end{bmatrix}^T \cdot \bar{g}_{R,i}^\#, \quad (35)$$

где m – количество калибровочных измерений.

Диагональные матрицы искажений формируются как

$$\tilde{\mathbf{D}}_T = \bigoplus_{i=1}^p \tilde{\mathbf{D}}_{T,i}, \quad \tilde{\mathbf{D}}_R = \bigoplus_{i=1}^q \tilde{\mathbf{D}}_{R,i}. \quad (36)$$

Калибровка приемных и передающих каналов может осуществляться как из ближней, так и из дальней зоны. На рис. 3 представлен вариант калибровки из ближней зоны АФАР. Откуда следует, что для i -го, j -го и k -го излучателей значение переданного в направлении или принятого от калибровочной антенны сигнала будет различным. Данная особенность решается путем добавления в матрицу фазовых задержек Ψ индивидуального множителя для каждого излучателя.

Матрицы коррекции выражаются из уже известных и рассчитанных по результатам калибровки матриц:

$$\mathbf{C}_T(\xi) = \Upsilon_{mp} \cdot \bigoplus_{j=1}^m (\Psi_T(\xi, \varphi^{(j)}, \theta^{(j)}) \cdot \tilde{\mathbf{D}}_T(\xi, \varphi^{(j)}, \theta^{(j)}) \cdot \mathbf{G}_T(\xi, \varphi^{(j)}, \theta^{(j)})); \quad (37)$$

$$\mathbf{C}_R(\xi) = \Upsilon_{mq} \cdot \bigoplus_{j=1}^m (\Psi_R(\xi, \varphi^{(j)}, \theta^{(j)}) \cdot \tilde{\mathbf{D}}_R(\xi, \varphi^{(j)}, \theta^{(j)}) \cdot \mathbf{G}_R(\xi, \varphi^{(j)}, \theta^{(j)})). \quad (38)$$

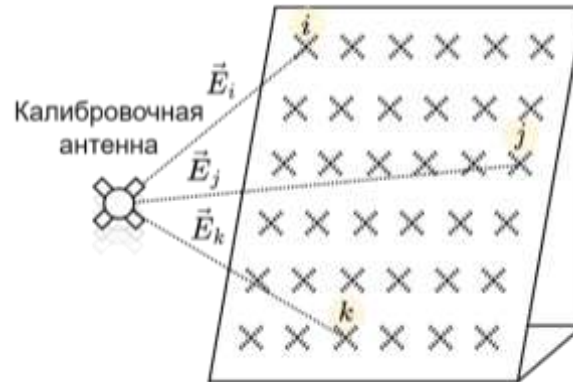


Рис. 3. Особенности калибровки в ближней зоне АФАР

Использование выражений (37) и (38) в уравнении (20) позволяет вычислить матрицу рассеяния цели:

$$\tilde{\mathbf{S}}(\xi) = \mathbf{C}_T^{\#T}(\xi) \cdot \mathbf{Y}_w(\xi) \cdot \left(\mathbf{C}_T(\xi) \cdot \mathbf{X}_w(\xi) \right)^{\#} \quad (39)$$

$\frac{2 \times 2}{2 \times 2}$ $\frac{2 \times qm}{2 \times qm}$ $\frac{qm \times m}{qm \times m}$ $\frac{2 \times pm}{2 \times pm}$ $\frac{pm \times m}{pm \times m}$ $m \times 2$

Выражение (39) отвечает цели статьи и является итоговым соотношением для коррекции искажений в измеренной поляризационной матрице рассеяния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье решена задача коррекции искажений в измеренной матрице рассеяния цели. Разработанная векторно-матричная модель позволяет без потери общности реализовать калибровку ПМ ШП АФАР и осуществить коррекцию сигналов, искаженных в результате влияния дестабилизирующих и геометрических факторов на парциальные составляющие векторного зондирующего сигнала.

Продемонстрирован способ калибровки с помощью приемной и передающей калибровочной антенны, который может быть обобщен до калибровки по мишеням.

Потенциал разработанной модели позволяет расширить способы матричного моделирования поляриметрических активных фазированных антенных решеток, что, в свою очередь, позволяет перевести вычисления на графические процессоры и обеспечить рост производительности поляриметрической радиолокационной системы с активной фазированной антенной решеткой, как на этапе калибровки, так и в процессе функционирования.

Список используемых источников

1. Freeman A. A new system model for radar polarimeters // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1991. – Vol. 29, № 5. – P. 761–767.
2. Polarimetric calibration of the gaofen-3 mission using active radar calibrators and the applicable conditions of system model for radar polarimeters / W. Liang [et al.] // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 2. – P. 176.
3. Polarimetric calibration of circularly polarized synthetic aperture radar data / P. Pincus [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 55, № 12. – P. 6824–6839.

4. Пространственные поляризационные свойства вибраторной фазированной антенной решетки с широким углом сканирования / М. С. Паршин [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. – 2022. – № 3. – С. 140–151.
5. *Rotman R., Tur M., Yaron L.* True Time Delay in Phased Arrays // Proceedings of the IEEE. – 2016. – Vol. 104(3). – P. 504–518. – DOI: 10.1109/jproc.2016.2515122.
6. Диаграммообразование в антенных решетках / И. Б. Вендик [и др.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2020. – 112 с.
7. *Singh H., Jha R.* Mutual Coupling Effects in Phased Arrays // Active Radar Cross Section Reduction: Theory and Applications Cambridge. – Cambridge University Press, 2015. – P. 177–215. – DOI: 10.1017/CBO9781316136171.006.
8. *Babbé E.* Instrumentación – Efecto Crosstalk: Profundizando en el Crosstalk // Revista española de electronica. – 2017. – № 752-753. – P. 48–50.
9. Overview of spatial channel models for antenna array communication systems / R. B. Ertel [et al.] // IEEE Personal Communications. – 1998. – Vol. 5, № 1. – P. 10–22. – DOI: 10.1109/98.656151.

М. И. Андрейченко;
А. В. Бессалов;
Д. В. Кушнарев;
А. С. Тимощук,
кандидат технических наук

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ И ФОРМИРОВАНИЯ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПРИАЗОВЬЯ

В статье в систематизированном виде представлены результаты исследований погодно-климатических условий, влияющих на безопасность полетов (перелетов) авиации в различные периоды года на территории Приазовья, с учетом особенностей рассматриваемого физико-географического района.

Ключевые слова: сезонные и широтные особенности циркуляции атмосферы, метеорологическое обеспечение полетов (перелетов) авиации, опасные явления погоды.

ВВЕДЕНИЕ

В сентябре 2022 года в состав Российской Федерации по результатам референдума вошли четыре новых субъекта: Донецкая Народная Республика (ДНР), Луганская Народная Республика (ЛНР), Запорожская и Херсонская области. Одной из проблем, наряду с разрушенной инфраструктурой гидрометеорологических постов в новых субъектах, является отсутствие гидрометеорологической информации по соседней с ними территории Украины. В связи с этим весьма актуальной является проблема анализа гидрометеорологических условий на неосвещенных и слабо освещенных в гидрометеорологическом отношении территориях и использования гидрометеорологических данных, накопленных гидрометеорологическими подразделениями, климатических описаний новых субъектов с целью выявления типовых синоптических ситуаций, сопровождающихся опасными явлениями погоды (ОЯП) и существенно влияющих на безопасность полетов авиации. С учетом вышесказанного в статье предлагается использовать результаты проведенного на кафедре технологий и средств геофизического обеспечения Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского анализа гидрометеорологической и климатической информации, полученной при помощи модернизированного автоматизированного рабочего места военного гидрометеоролога (АРМ ВГМ-М).

В целях качественного метеорологического обеспечения полетов (перелетов) авиации необходим корректный и полный учет влияния на них метеорологических условий. Такой учет требуется не только при планировании деятельности и обеспечения безопасности полетов (перелетов), но и также в задачах экономии горюче-смазочных материалов, ресурсов наземного авиационного оборудования и т. п. С данной точки зрения особый интерес имеют погодно-климатические условия территории Приазовья, расположенной на юге Восточно-Европейской равнины, куда входят части территорий Запорожской и Херсонской областей, ДНР, ЛНР, юго-западные районы Ростовской области, районы Краснодарского края, а также часть побережья Крыма.

Атмосферные процессы и погодно-климатические условия территории Приазовья характеризуются сезонным и широтным разнообразием, так как на их формирование и трансформацию оказывают масштабное воздействие крупноразмерные географические системы, такие как Азовское море, Приазовская возвышенность, Приазовская низменность, Донецкий кряж, Черное море.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КЛИМАТА ПРИАЗОВЬЯ

Территория Приазовья находится на границе субтропических и умеренных широт, вследствие чего ее климату характерны свойства обоих поясов. Однако преобладают черты умеренного пояса, так как в течение года здесь господствуют умеренные (полярные) воздушные массы (ВМ). Повторяемость умеренных ВМ составляет зимой более 80%, а летом – 60–70%. Территория Приазовья находится в глубине Евразийского материка, вдали от Атлантического океана, и ее климат определяется гораздо большим воздействием континента, чем океана. Это воздействие несколько ослабляется под влиянием Черного и Азовского морей, особенно весной и осенью. Циркуляция ВМ зимой формируется при взаимодействии местной барической депрессии над теплыми морями и сибирского антициклона [1].

Наиболее высокие средние значения скорости ветра наблюдаются в холодное время года (5,5–7,0 м/с). Летом из-за ослабления атмосферной циркуляции скорости ветра немного ниже и составляют 4,5–5,5 м/с [2]. Особенно часто на территории Приазовья наблюдаются ветры со скоростью около 5 м/с. Сильные ветры (свыше 15 м/с) наблюдаются редко. В 78–90% случаев преобладают ветры со скоростью 15–18 м/с, продолжительностью от 7 до 12 ч [3].

Величина суммарной радиации на территории Приазовья за год достигает 115–120 ккал/см², радиационный баланс – 45 ккал/см², продолжительность солнечного сияния составляет 2200–2400 ч/год. Наибольших значений величина солнечной радиации достигает на Таманском полуострове и в черноморской части дельты [4, 5]. Продолжительность теплового периода года составляет 9–10 месяцев (период с температурой воздуха выше 0°). Самым теплым месяцем является июль (от +23,5 до +24,5°), а самым холодным – январь (от –1 до –3°). Значительные годовые амплитуды (25–28°) обусловлены высокими температурами летнего сезона [6].

Распределение осадков по району Приазовья равномерное, их годовое количество составляет 400–500 мм, немного увеличиваясь по мере удаления от моря (до 500–600 мм). Максимум осадков (200–300 мм) наблюдается в теплый период года. По влагообеспеченности рассматриваемая территория подразделяется на несколько частей. Северная ее часть, территории вокруг Ахтарского и Бейсугского лиманов, характеризуется недостаточным увлажнением (коэффициент увлажнения Д. И. Шашко равен 0,25). В дельте Кубани наблюдается умеренное увлажнение (0,30–0,40), а южная часть, расположенная к западу от Пересыпского гирла, также имеет недостаточное увлажнение (0,25) [1]. На основании приведенных данных можно сделать вывод, что климат территории Приазовья является умеренно-континентальным.

СЕЗОННЫЕ И ШИРОТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ И ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПРИАЗОВЬЯ

Осенне-зимний период. В осенне-зимний период преобладает западно-восточный перенос воздушных масс с активной циклонической деятельностью [1]. Однако с середины ноября до конца января в тылу циклонов нередко происходит вторжение очень холодного континентально-арктического воздуха с северо-востока (ультраполярные вторжения) и севера, а также с востока по юго-западной периферии сибирского антициклона. Ядро этого антициклона находится над югом Урала или Западной Сибири. Такие вторжения имеют продолжительность от 7 до 15 дней. В начале и конце осенне-зимнего периода, при наличии малоподвижной депрессии над Средиземным и Черными морями, в районе Приазовья наблюдаются сильные восточные ветра со скоростями 15–20 м/с. Продолжительность такой синоптической обстановки 10–12 дней. В этот период в приземном слое наблюдается резкий сдвиг ветра, что приводит к сильной «болтанке». Периоды низких зимних температур часто сменяются

сильными оттепелями с повышенной влажностью, особенно при отсутствии устойчивого ледяного покрова над Азовским морем. При адвекции тепла в районе Приазовья наблюдается сплошная облачность слоистых форм, обложные дожди, морозящие осадки. Над Таганрогским заливом слоистая облачность переходит в туман, который при юго-восточных и южных ветрах выносится в район Мелитополя, где он может не рассеиваться до 3–4 суток, пока не произойдет смена воздушных масс. Снежный покров неустойчив, в период оттепелей тает и наблюдается в среднем с декабря по апрель. Таким образом, в осенне-зимний период сложные летно-метеорологические условия над районом Приазовья характеризуются низкой слоистой облачностью, частыми и продолжительными по времени туманами, метелями с резко меняющейся видимостью и ветрами со скоростью 15–20 м/с. Частая смена морозных периодов и оттепелей создает условия для отложения гололедицы на взлетно-посадочной полосе (ВПП), что приводит к ограничению полетов и перелетов. Основными синоптическими процессами, формирующими сложные летно-метеорологические условия в районе Приазовья, являются:

- выход черноморских и средиземноморских циклонов (рис. 1);
- смещение каспийского циклона в район Нижней Волги (рис. 2);
- ультраполярные вторжения.

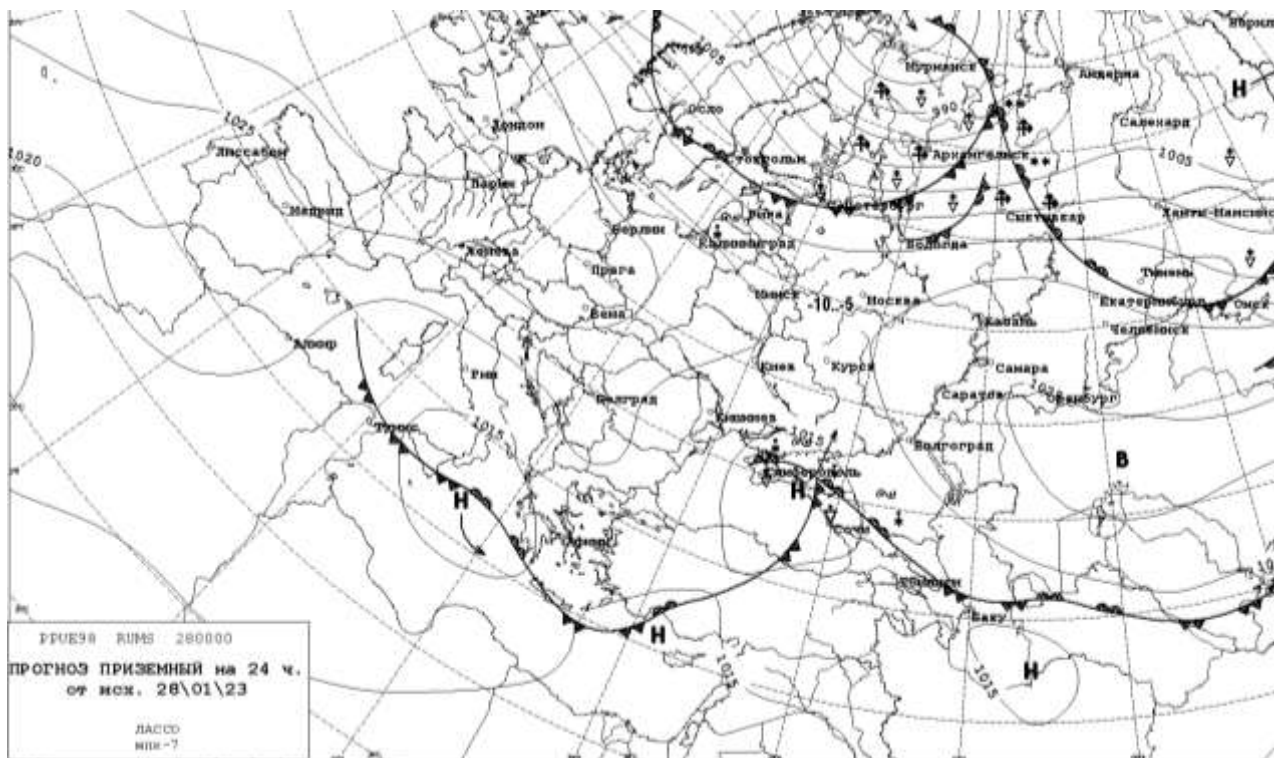


Рис. 1. Выход черноморского циклона на территорию Приазовья

Выход черноморского циклона на территорию Приазовья. Наблюдаются самые сложные летно-метеорологические условия. Ухудшение погоды наступает резко и внезапно. Сильный снегопад с видимостью менее 1000 м сменяется дождем и резким потеплением после прохождения теплого фронта через район Приазовья. В теплом секторе наблюдается низкая облачность высотой 200–300 м с понижением в морозящих осадках до 50–100 м, гололед, адвективный туман и густые дымки. В тылу циклона, после прохождения холодного фронта, усиливается ветер до 15–20 м/с. Наблюдаются кратковременные заряды снега и осадков с видимостью 500–1500 м. В случае, когда происходит заток холодных воздушных масс с отрицательными температурами в тыл циклона, на подтаявшем снегу образуется ледяная корка, что затрудняет уборку снега с ВПП и надолго выводит ее из строя.

Взаимодействие черноморского циклона с Восточным отрогом. На начальном периоде данной синоптической ситуации наблюдается адвекция холода в приземном слое по восточной периферии антициклона, смещающегося с северо-запада на Каспийское море. Температура за сутки в среднем понижается на $7-10^{\circ}$, преобладает малооблачная погода. Постепенно к середине периода антициклон стабилизируется над Каспийским морем и становится отрогом сибирского антициклона. В приземном слое по его периферии и периферии черноморской депрессии с юга, из районов Закавказья, начинается адвекция тепла. В результате взаимодействия воздушных масс над районом Приазовья наблюдается слоистая и слоисто-дождевая облачность высотой $100-200$ м, снегопады с видимостью $1-2$ км, усиление ветра восточной четверти до $15-20$ м/с. Постепенно, по мере адвекции тепла, снегопад переходит в морось, дождь с отложением гололеда, а затем – в туман с видимостью $400-600$ м.

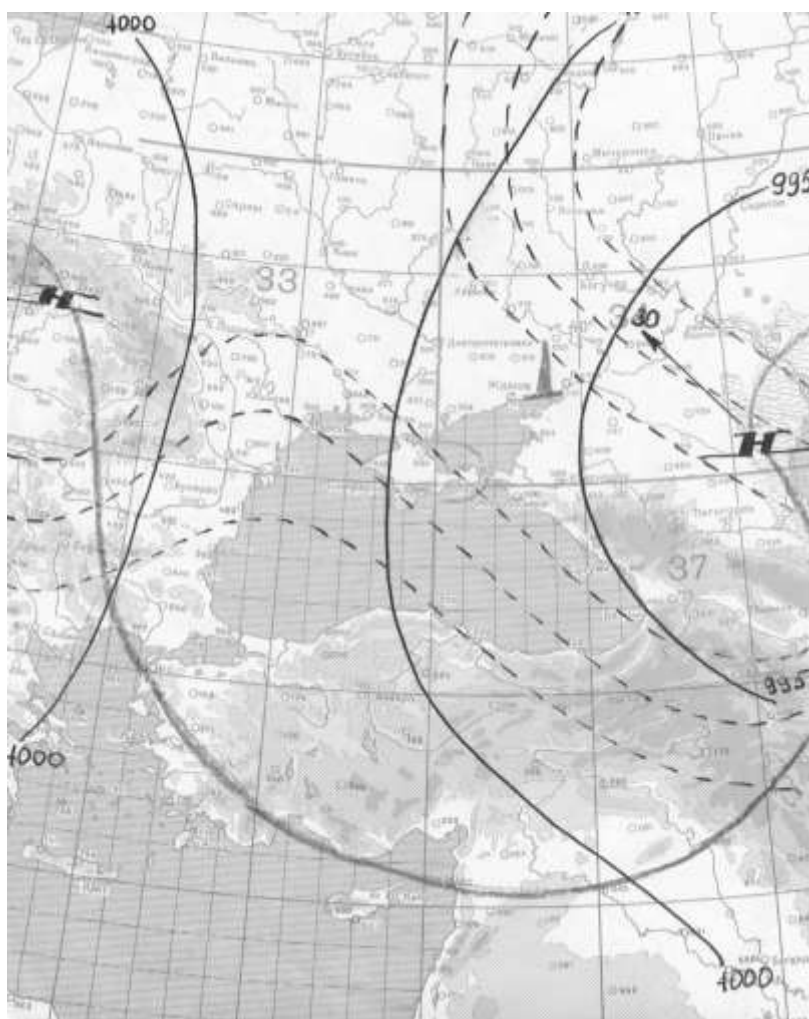


Рис. 2. Выход каспийского циклона в район Нижней Волги и Приазовья

Выход каспийского циклона в район Нижней Волги и Приазовья. Наблюдается десятибалльная многослойная облачность с нижней границей $200-300$ м, в зоне фронта в осадках – $50-150$ м. В зоне теплого фронта и на западной периферии циклона – сильные снегопады, переходящие в метель при видимости $500-1500$ м и скорости ветра $12-15$ м/с, порывы ветра достигают при активной фронтальной зоне $20-25$ м/с. Особенно характерны такие летно-метеорологические условия в конце зимнего периода. Прохождение холодного фронта через район Приазовья сопровождается ветром $15-20$ м/с, сильными снегопадами и метелями с видимостью $500-1500$ м [1].

Весенне-летний период. В весенний период постепенно начинает разрушаться сибирский антициклон, вторжение арктического воздуха не так сильно выражено из-за дневного прогрева воздуха [1]. Возрастающая интенсивность поступления солнечной энергии обуславливает развитие конвективных облаков. Однако до полного схода снежного покрова потепление существенным образом зависит от адвекции тепла с юго-западными воздушными потоками из Средиземноморья и восточными – из Средней Азии. Наступление весны характеризуется нарастанием среднесуточной температуры от нуля до 15 градусов. В основном этот период наступает после 15 марта. Поэтому март является переходным периодом к весенне-летней циркуляции атмосферы для района Приазовья. Устойчивый снежный покров отмечается вплоть до 2 марта, но в отдельные годы он наблюдается до середины марта и только потом окончательно тает. Средняя высота снежного покрова на территории Приазовья в начале марта составляет 3–7 см, однако в некоторые годы, со снежными зимами, достигает значений 30 см. Весенние заморозки наблюдаются в среднем до конца апреля, но иногда отмечаются и в первой декаде мая. После 10 мая температура поднимается выше 15 градусов; весенний период заканчивается, уступая место летним процессам. Вместе с повышением температуры происходит резкое уменьшение количества дней с низкой облачностью и туманом. Вынос восточными потоками воздушных масс из районов Средней Азии по периферии антициклона обуславливает жаркий и сухой режим летних месяцев. В среднем летний период продолжается до 20 сентября. В этот период преобладает малооблачная погода с нижней границей облаков кучевых форм выше 1000 м, с хорошей видимостью и низкой влажностью (20–30%). Количество летних дней по метеорологическим условиям в месяце – более 20. Однако в отдельные дни, после полудня, развиваются мощные конвективные облака и грозовая деятельность, которые существенно затрудняют полеты авиации или исключают их вообще. Наиболее благоприятной синоптической обстановкой для возникновения и развития кучево-дождевых облаков являются: атмосферные фронты, перемещающиеся через район Приазовья, или заполняющаяся депрессия; тыловая часть циклона и восточная периферия антициклона. Дополнительным импульсом для развития кучево-дождевых облаков является Таганрогский залив. В утренние часы более теплая водная поверхность залива способствует формированию облаков вертикального развития или их усилению при смещении на залив. В конце дня и в первую половину ночи, наоборот, происходит процесс размывания облаков над более холодной водной поверхностью.

Фронтальные грозы в процентном отношении на различных типах фронтов представлены следующим образом: холодный фронт – 41%; теплый фронт – 36%; малоподвижный фронт – 13%, фронт окклюзии – 10%.

Особо неблагоприятным явлением погоды при прохождении кучево-дождевых облаков являются ураганные порывы ветра до 30 м/с.

Основными синоптическими процессами, приводящими к возникновению ОЯП в весенне-летний период, являются:

- выход циклонов с юго-запада;
- смещение циклонов с северо-запада (рис. 3);
- выход каспийского циклона в район Нижней Волги;
- местный циклогенез над юго-западом Приазовья;
- внутримассовые грозы.

Выход циклонов с юго-запада. В светлое время суток теплые фронты размыты и выражены лишь верхней и тонкой средней облачностью. В ночное время наблюдаются: мощные кучево-дождевые облака, как правило, 7–10 баллов, с нижней границей в дожде 300–500 м, верхней границей 8–9 км, грозы, ливневые осадки с видимостью 1–2 км.

На холодных фронтах отмечаются кучево-дождевые облака 7–10 баллов с нижней границей 500–800 м, верхней границей 7–8 км, а при скоростях смещения более 35–40 км/ч верхняя граница достигает 10–12 км. Наблюдаются сильные грозы с порывами ветра до 20–25 м/с, ливни с видимостью 1–2 км.

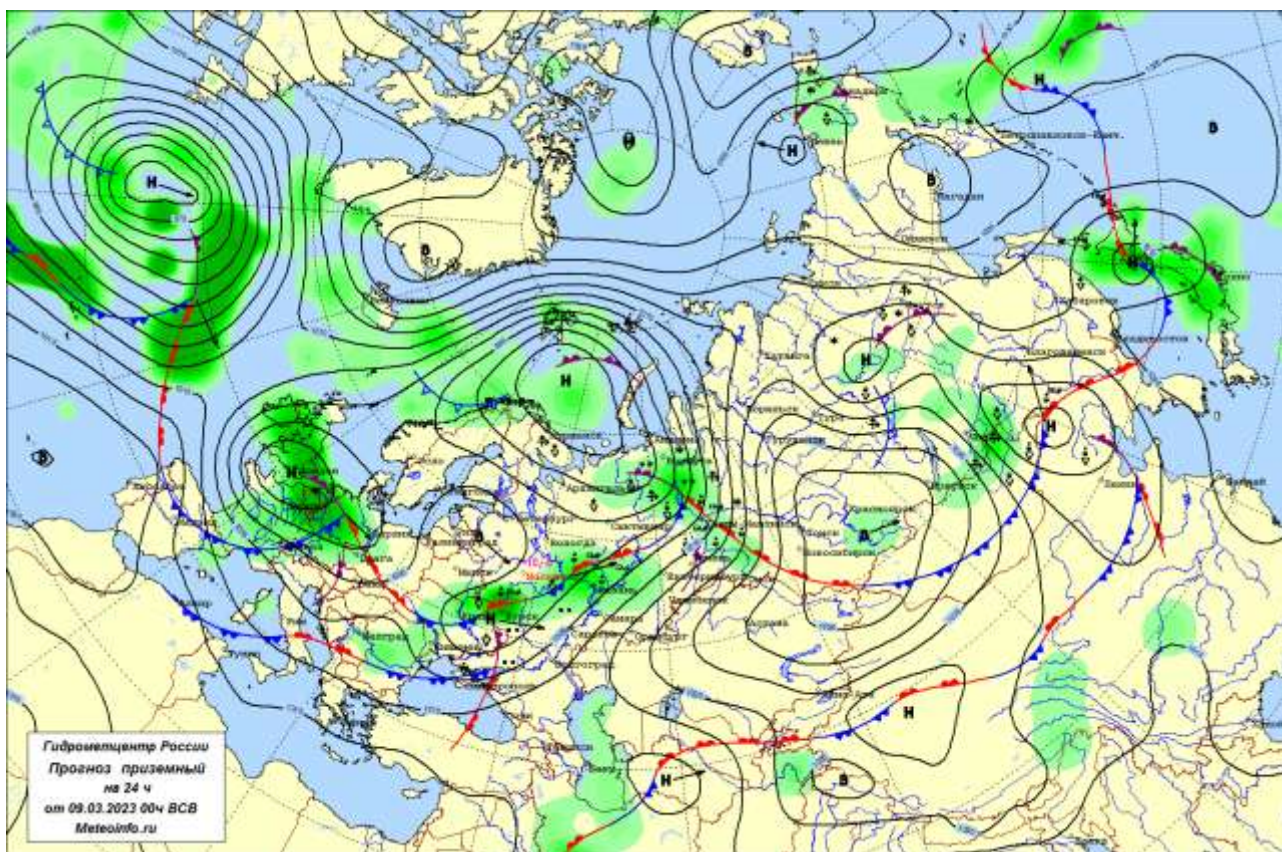


Рис. 3. Смещение циклонов с северо-запада в район Приазовья [7]

Северо-западное вторжение циклона. Через район Приазовья смещается, как правило, холодный фронт, на котором наблюдаются кучево-дождевые облака высотой 1000–1500 м с верхней границей 5–7 км, грозы без выпадения осадков. Скорость ветра достигает при порывах 15–20 м/с, в приземном слое – сильная «болтанка». Основное ухудшение летно-метеорологических условий наблюдается в тылу циклона на вторичных фронтах, когда происходит основной заток морского арктического воздуха. В этих синоптических условиях над Приазовьем наблюдаются 7–10 баллов кучево-дождевых облаков с верхней границей 10–12 км, шквальные усиления ветра до 25 м/с. В зоне фронта сильные ливневые дожди с видимостью 1–2 км, град, гроза. В данной обстановке наблюдаются самые сильные градобития над Северным Кавказом.

Выход каспийского циклона в район Нижней Волги. В тылу циклона по району Приазовья наблюдается 7–10 баллов облаков кучевых форм с высотой нижней границы 300–500 м, очаги гроз с верхней границей кучево-дождевых облаков 8–10 км и отдельными вершинами до 12 км. Во второй половине дня наблюдаются сильные ливни, усиление ветра северного направления порывами до 15–20 м/с [1].

ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПОГОДЫ В РАЙОНЕ ПРИАЗОВЬЯ

По результатам выполненного в работе анализа особенностей развития атмосферных процессов и формирования погодно-климатических условий на территории Приазовья выделены ОЯП и метеорологические условия, оказывающие наиболее существенное влияние на обеспечение безопасности полетов (перелетов) авиации.

1. Наибольшая повторяемость облачности с высотой нижней границы ниже 200 м отмечается в холодную половину года с максимумом в декабре (36%) и январе (43%); в период же с

февраля по март повторяемость такой облачности не превышает 25%. Облака высотой ниже 100 м в теплый период практически отсутствуют, а в холодный период их повторяемость составляет менее 23%.

В суточном ходе максимальная повторяемость случаев низкой облачности наблюдается в утренние часы (6–9 часов), минимальная повторяемость в 14–17 часов. Почти в 50% случаев низкая облачность наблюдается при юго-восточных и юго-западных ветрах, повторяемость ее при северо-западных и западных ветрах значительно ниже [1].

2. Наиболее высокая повторяемость плохой метеорологической дальности видимости всех пределов отмечается в холодное время года с максимумом в ноябре и декабре. Резкий скачок, связанный с ухудшением видимости, отмечается в апреле по отношению к марту и маю. Это связано с образованием в утренние часы радиационных туманов. Повторяемость случаев метеорологической дальности видимости менее 1 км составляет около 12% времени в месяц. В теплый период года повторяемость значений метеорологической дальности видимости менее 6 км не превышает 1%. В суточном ходе максимум ухудшения метеорологической дальности видимости отмечается в 6–9 часов, минимум – в 13–15 часов. Ухудшение значений метеорологической дальности видимости наблюдается в основном за счет туманов, в зимние месяцы и весной – из-за метелей и выпадений снега.

3. Максимальная повторяемость сложных метеорологических условий наблюдается в зимние месяцы, по времени – в ночные и утренние часы. Максимально простые метеорологические условия отмечаются днем; повторяемость случаев с достаточно простыми условиями составляет 50% в период с 12 до 15 часов. В переходные периоды повторяемость простых метеорологических условий значительно выше, и в период с 12 до 15 часов составляет около 75%. В этот период, даже в ночные и утренние часы, метеорологические условия в 50% случаев простые. Летом метеорологические условия максимально простые (90%), и даже кратковременные дожди и утренние туманы не вносят существенных корректив.

4. ОЯП, связанные с осадками. Наименьшее количество осадков выпадает в марте и сентябре – около 32 мм, в остальное же время их количество колеблется в пределах 33–59 мм, с максимумом в июне 59 мм. Наибольшее количество дней (ночей) с осадками приходится на холодный период – 11–17 дней (ночей). На теплый период приходится от 9 до 11 дней (ночей) с осадками. Летом осадки, в основном, носят ливневой характер, в переходные периоды как ливневые, так и обложные осадки. В холодный период осадки идут как в виде снега, так и в виде дождя, нередко наблюдается смешанная фаза осадков. Изредка наблюдаются снежные иглы, морось, крупа и ледяной дождь. Летом кратковременно наблюдается град.

5. Гроза, в основном, наблюдается летом – 8–10 дней. Вообще же грозовая деятельность продолжается с апреля по октябрь. Максимум в июне, июле – 10 дней.

На период с 12 до 21 часа приходится основное количество гроз; минимум грозовой деятельности наблюдается в утренние часы – 9–12 часов. Продолжительность гроз редко превышает 3–4 ч. Но иногда в июне могут отмечаться грозы продолжительностью 9–10 ч.

6. Град отмечается в период с апреля по сентябрь, повторяемость его небольшая, в течение месяца может регистрироваться один случай града. В суточном ходе максимальная повторяемость приходится на 13–18 часов, продолжительность выпадения редко превышает 10 мин.

7. ОЯП, связанные с ветром. В районе Приазовья преобладают ветры восточных направлений, чуть меньше – западных. Северо-западные и северные направления ветра преобладают летом. В летние месяцы наблюдается и наибольшая повторяемость штилей. Северо-западные и северные направления ветра зимой достаточно редки, они бывают за холодными фронтами и, вследствие роста давления, подворачивают на северо-восточные. Южные ветра имеют наименьшую повторяемость, а юго-восточные и юго-западные ветра повторяются достаточно часто. Наибольшая скорость ветра наблюдается в холодный период года, наименьшая – в теплый. Ветер имеет ярко выраженный суточный ход. Максимальные скорости – днем, а минимальные – ночью (особенно в утренние часы). Зимой сильный ветер связан с

барическими градиентами в приземном слое, летом добавляется резкий температурный контраст. Максимальные порывы ветра отмечаются, как правило, в феврале и достигают порядка 23–25 м/с, но это явление редкое и кратковременное.

8. Самым теплым месяцем считается июль, самым холодным – январь. Суточный ход выражен следующим образом: минимальная температура в момент восхода солнца, максимальная – в период с 15 до 17 часов. Максимальный контраст температур от минимальной до максимальной – летом, минимальный – зимой.

9. Максимальные значения относительной влажности воздуха наблюдаются в утренние предрассветные часы, минимальные – в момент максимального прогрева. При наличии осадков или устойчивого снежного покрова ее суточный ход выражен слабее, при их отсутствии она имеет достаточно выраженные тенденции.

10. Устойчивый снежный покров отмечается в среднем с декабря до середины марта. Средняя высота около 10–12 см. Достаточно часто в зимние месяцы из-за потепления отмечаются гололедные явления [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях обеспечения безопасности полетов (перелетов) авиации в районе Приазовья необходимы точные метеорологические данные по маршруту полета (перелета) и простые метеорологические условия, особенно по облачности и наклонной дальности видимости в районах полета, взлета и посадки воздушного судна. Однако простые метеорологические условия в районе Приазовья, наблюдающиеся преимущественно в теплый период года, в переходный и холодный его периоды, могут достаточно резко трансформироваться в сторону их усложнения и ухудшения, что не может не сказаться на продолжительности и интенсивности полетов (перелетов) воздушных судов.

Особое внимание специалистам метеорологических подразделений при обеспечении полетов (перелетов) авиации необходимо уделять в первую очередь диагностике и прогнозированию ОЯП, характерных для Приазовья, таких как высота нижней границы облаков ниже 200 м, радиационные туманы, ливневые осадки, град, гроза, шквалистое усиление ветра. Максимальная повторяемость сложных метеорологических условий наблюдается в зимние месяцы, по времени – в ночные и утренние часы. Максимально простые метеорологические условия наблюдаются днем; повторяемость случаев с достаточно простыми условиями составляет 50% в период с 12 до 15 часов. В переходные периоды года повторяемость простых метеорологических условий значительно выше, и в период с 12 до 15 часов составляет около 75%. В этот период, даже в ночные и утренние часы, метеорологические условия в 50% случаев простые. Летом метеорологические условия максимально просты (90%).

Необходимо качественно планировать полеты (перелеты) авиации с учетом сезонных особенностей атмосферной циркуляции и климата Приазовья путем оперативной обработки разнородной метеорологической информации и разработки краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов всего комплекса метеорологических условий (особенно ОЯП) с применением современных автоматизированных средств обработки гидрометеорологической и климатической информации.

Список используемых источников

1. Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – Вып. 10. – 605 с.

2. Экосистема Азовского моря: режим, продуктивность, проблемы управления : моногр. : в 2 ч. / С. П. Воловик [и др.]. – Краснодар, КубГУ. – Ч. 2 : Климат и водные ресурсы бассейна во второй половине XX века. – 2010. – 493 с.
3. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. – Л. : Гидрометеоиздат, 1962. – 856 с.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР : в 10 т. – Л., [б. и.]. – Т. 5 : Азовское море / под ред Н. П. Гоптарева [и др.]. – 1991. – 240 с.
5. Климат Краснодара. – Л. : Гидрометеоиздат, 1990. – 150 с.
6. Агроклиматические ресурсы Краснодарского края. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 276 с.
7. Приземные прогностические карты. – URL: <https://www.meteoinfo.ru/prognosticheskie-karty/> (дата обращения: 09.03.2023).

А. В. Астапович,
кандидат технических наук, доцент;
Д. А. Куничкин

МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ В ЛОКАЛЬНОМ РАЙОНЕ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ КООРДИНАТНОГО ПРОСТРАНСТВА 1942 ГОДА

В статье, с позиции многофакторной регрессии невязок координат совмещенных пунктов, описана модель преобразования между глобальной и референцной системами координат. Приведены необходимые формулы для вычисления параметров модели многофакторной регрессии дифференциальных искажений координатного пространства СК-42 и оценки в локальном районе остаточных невязок координат. Алгоритм оценивания дифференциальных искажений координат апробирован для территории Якутии по данным каталогов геодезических пунктов СК-42 и материалам инженерно-геодезических изысканий по созданию каркасной геодезической сети спутниковыми методами космической геодезии в локальном районе. Экспериментальная проверка показала, что применение модели многофакторной регрессии невязок координат позволяет учитывать дифференциальные искажения координатного пространства СК-42 с необходимой для войск точностью.

Ключевые слова: глобальные параметры трансформирования, дифференциальные искажения координат, многофакторная регрессия, ортогональные преобразования координат.

ВВЕДЕНИЕ

Использование глобальных спутниковых навигационных систем (GPS/ГЛОНАСС и др.) для решения задач топогеодезического и навигационного обеспечения войск требует наличия параметров связи между системами координат 1942 года (СК-42) и ПЗ-90.11. Поскольку любая система координат устанавливается по результатам измерений и закрепляется на местности пунктами соответствующих геодезических сетей с координатами в принятой системе отсчета, то вследствие влияния неизбежных и количественно неопределенных погрешностей измерений, связь между различными системами координат может быть определена лишь приближенно. Поэтому для координатных преобразований важно иметь такую процедуру трансформирования координат, при которой погрешности преобразований не оказывали бы существенного влияния на пространственное положение точек местности в требуемой системе отсчета.

Для системы координат СК-42 по результатам многосуточных спутниковых геодезических наблюдений на пунктах ГГС, распределенных по территории Российской Федерации, определены глобальные параметры для ортогонального преобразования координат. Средняя квадратическая погрешность преобразований координат с использованием глобальных параметров для СК-42 составляет 4–5 м, что не удовлетворяет современным требованиям к геодезическому обеспечению решения задач обороны страны [3, 6]. Поэтому для координатных преобразований важно иметь такую взаимосвязь между системами отсчета, при которой преобразования между системами координат СК-42 и ПЗ-90.11 выполнялись бы с точностью в несколько дециметров без проведения дополнительных и трудоемких измерений. Повышение точности трансформирования может быть достигнуто на основе изучения дифференциальных искажений координатного пространства СК-42 и их исключения из результатов преобразования координат по глобальным параметрам. Решение данной задачи рассматривается в статье.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что ортогональные преобразования между пространственными системами координат A и B , у которых не совпадают начало счета, направление координатных осей и масштаб, осуществляются по формуле [7]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B = (1 + m) \begin{bmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – линейные параметры трансформирования при переходе из системы A в систему B ;

$\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ – угловые параметры трансформирования при переходе из системы A в систему B ;

m – масштабный параметр трансформирования при переходе из системы A в систему B .

Если при преобразовании координат СК-42 в ПЗ-90.11 использовать обозначения:

$$R_{\text{ПЗ-90.11}}^{\text{ВЫЧ}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{ПЗ-90.11}}^{\text{ВЫЧ}}$$

– пространственные координаты пунктов в системе ПЗ-90.11 полученные при преобразовании координат из системы СК-42;

$$R_{\text{СК-42}}^{\text{ИЗМ}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{СК-42}}^{\text{ИЗМ}}$$

– пространственные координаты пунктов в системе СК-42;

$$\Delta R = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}$$

– смещение центра эллипсоида Красовского системы координат СК-42 по отношению к центру общеземного эллипсоида системы координат ПЗ-90.11, а

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{bmatrix},$$

– угловые элементы трансформирования систем координат при переходе из системы A в систему B [рад], то формулу (1) можно представить в виде

$$R_{\text{ПЗ-90.11}}^{\text{ВЫЧ}} = (1 + m) AR_{\text{СК-42}}^{\text{ИЗМ}} + \Delta R.$$

Пусть в локальном районе имеется некоторое подмножество совмещенных геодезических пунктов, координаты которых независимо инструментально определены в СК-42 и ПЗ-90.11. Тогда между измеренными и преобразованными по ГОСТ Р 32453-2017 координатами будут наблюдаться невязки:

$$dR = R_{\text{ПЗ-90.11}}^{\text{ИЗМ}} - R_{\text{ПЗ-90.11}}^{\text{ВЫЧ}}.$$

Величина невязок dR может достигать десятка метров [2, 7]. Это обусловлено тем, что ГОСТ Р 32453-2017 предписывает использование глобальных параметров трансформирования, которые определены по координатам совмещенных пунктов, равномерно расположенных по всей территории РФ. Но из-за влияния погрешностей положения пунктов геодезических сетей, распространяющих систему координат 1942 года на территории бывшего СССР, в локальных районах могут наблюдаться значительные невязки. Это говорит о невозможности применения глобальных параметров для высокоточного преобразования координат.

Таким образом, для высокоточного преобразования координат необходимо обосновать подходы к оценке пространственного распределения искажений СК-42 по невязкам dR множества совмещенных геодезических пунктов, расположенных в локальном районе, и применять эти оценки для внесения поправок в результаты преобразований по формуле (1).

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Положение пунктов ГГС в СК-42 в каталогах координат задано на плоскости проекции Гаусса – Крюгера в 6-градусных зонах. Высотное положение зафиксировано относительно квазигеоида.

Положение геодезических пунктов в ПЗ-90.11 получают спутниковыми методами космической геодезии в геоцентрической пространственной прямоугольной системе координат.

Предположим, что на геодезическом пункте СК-42 спутниковыми методами космической геодезии определены геоцентрические прямоугольные координаты. Сопоставим пространственные прямоугольные координаты пункта (X', Y', Z') и (X'', Y'', Z'') в системах отсчета ПЗ-90.11 и СК-42 соответственно [4]. Для этого совместим начала и направления осей сопоставляемых систем координат. Тогда координаты пункта будут представлять компоненты двух векторов (рис. 1) [8].

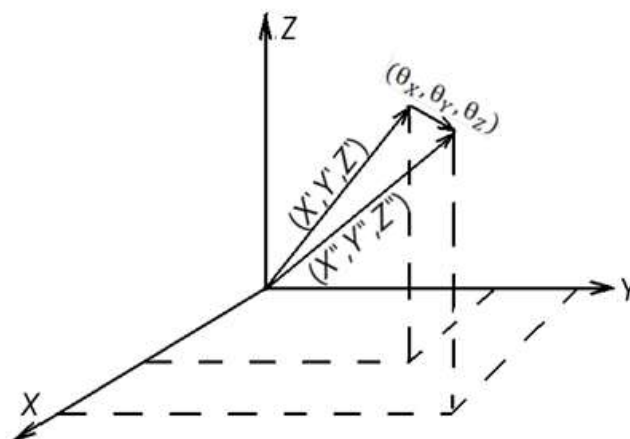


Рис. 1. Сопоставление пространственных координат

Выделим в разности векторов

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'' - X' \\ Y'' - Y' \\ Z'' - Z' \end{bmatrix}$$

систематическую и стохастическую составляющие.

Систематическая составляющая обусловлена несовпадением центров отсчетных эллипсоидов и направлений координатных осей:

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ МНОГОФАКТОРНОЙ РЕГРЕССИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ КООРДИНАТ

Исходными данными для построения модели многофакторной регрессии дифференциальных искажений координатного пространства СК-42 в локальном районе должны являться координаты геодезических пунктов, которые независимо определены в деформированной СК-42 и недеформированной ПЗ-90.11 системах отсчета.

Поскольку в СК-42 положение геодезических пунктов задаются на плоскости проекции Гаусса – Крюгера координатами (x, y) и нормальными высотами H^Y , то для построения модели множественной регрессии (2) плоские координаты и нормальные высоты преобразуются в пространственные прямоугольные координаты (X'', Y'', Z'') . Преобразование координат выполняется по формулам ГОСТ Р 32453-2017 в последовательности

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ H^Y \end{bmatrix}_i \Rightarrow \begin{bmatrix} B \\ L \\ H^Y \end{bmatrix}_i \Rightarrow \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix}_i \quad (i = 1, 2, \dots, p).$$

По набору координат совмещенных геодезических пунктов

$$\begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix}_i, \quad \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_i \quad (i = 1, 2, \dots, p)$$

вычисляются свободные члены:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{X_i} &= (1 + m)X''_i + (1 + m)Y''_i \omega_Z - (1 + m)Z''_i \omega_Y + \Delta X - X'_i; \\ \varepsilon_{Y_i} &= (1 + m)Y''_i - (1 + m)X''_i \omega_Z + (1 + m)Z''_i \omega_X + \Delta Y - Y'_i; \\ \varepsilon_{Z_i} &= (1 + m)Z''_i + (1 + m)X''_i \omega_Y - (1 + m)Y''_i \omega_X + \Delta Z - Z'_i \end{aligned} \quad (4)$$

и коэффициенты в уравнениях (3):

$$\begin{aligned} (X_i - X_{cp}) &= X''_i - X''_{cp}; \\ (Y_i - Y_{cp}) &= Y''_i - Y''_{cp}; \\ (Z_i - Z_{cp}) &= Z''_i - Z''_{cp}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $X''_{cp} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X''_i$; $Y''_{cp} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p Y''_i$; $Z''_{cp} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p Z''_i$.

Если коэффициенты при неизвестных параметрах:

$$\begin{aligned} A &= [A_0, A_X, A_Y, A_Z]^T, \\ B &= [B_0, B_X, B_Y, B_Z]^T, \\ C &= [C_0, C_X, C_Y, C_Z]^T \end{aligned}$$

объединить в матрицу

$$G = \begin{bmatrix} 1 & (X_1 - X_{cp}) & (Y_1 - Y_{cp}) & (Z_1 - Z_{cp}) \\ 1 & (X_2 - X_{cp}) & (Y_2 - Y_{cp}) & (Z_2 - Z_{cp}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & (X_p - X_{cp}) & (Y_p - Y_{cp}) & (Z_p - Z_{cp}) \end{bmatrix},$$

то уравнения (3) примут вид:

$$\begin{aligned} GA &= \boldsymbol{\varepsilon}_X; \\ GB &= \boldsymbol{\varepsilon}_Y; \\ GC &= \boldsymbol{\varepsilon}_Z, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_X = [\varepsilon_{X_1} \ \varepsilon_{X_2} \ \dots \ \varepsilon_{X_p}]^T$, $\boldsymbol{\varepsilon}_Y = [\varepsilon_{Y_1} \ \varepsilon_{Y_2} \ \dots \ \varepsilon_{Y_p}]^T$, $\boldsymbol{\varepsilon}_Z = [\varepsilon_{Z_1} \ \varepsilon_{Z_2} \ \dots \ \varepsilon_{Z_p}]^T$ – векторы свободных членов линейных уравнений.

Переопределенные уравнения (6) решаются методом наименьших квадратов, который позволяет найти такие значения параметров модели (2) [1]:

$$\begin{aligned} A &= (G^T P G)^{-1} G^T P_X \boldsymbol{\varepsilon}_X; \\ B &= (G^T P G)^{-1} G^T P_Y \boldsymbol{\varepsilon}_Y; \\ C &= (G^T P G)^{-1} G^T P_Z \boldsymbol{\varepsilon}_Z, \end{aligned} \quad (7)$$

которые будут минимизировать невязки v_X , v_Y , v_Z в уравнениях (6):

$$\begin{aligned} GA - \boldsymbol{\varepsilon}_X &= \mathbf{v}_X; \\ GB - \boldsymbol{\varepsilon}_Y &= \mathbf{v}_Y; \\ GC - \boldsymbol{\varepsilon}_Z &= \mathbf{v}_Z. \end{aligned} \quad (8)$$

В выражении (7) P_X , P_Y , P_Z – весовые матрицы стохастических векторов $\boldsymbol{\varepsilon}_X$, $\boldsymbol{\varepsilon}_Y$, $\boldsymbol{\varepsilon}_Z$. Средние квадратические значения [1] невязок \mathbf{v}_X , \mathbf{v}_Y , \mathbf{v}_Z :

$$m_X = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_X^T P_X \mathbf{v}_X}{p-4}}, \quad m_Y = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_Y^T P_Y \mathbf{v}_Y}{p-4}}, \quad m_Z = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_Z^T P_Z \mathbf{v}_Z}{p-4}}$$

характеризуют точность исключения дифференциальных искажений координатного пространства СК-42 по модели (2).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ КООРДИНАТ В ЛОКАЛЬНОМ РАЙОНЕ

Экспериментальная апробация алгоритма построения модели многофакторной регрессии дифференциальных искажений координатного пространства СК-42 выполнена в локальном районе на территории Якутии. Исходными послужили данные каталогов геодезических пунктов СК-42 и материалы инженерно-геодезических изысканий по созданию каркасной геодезической сети спутниковыми методами космической геодезии. Для построения модели многофакторной регрессии использовались пространственные геоцентрические ПЗ-90.11 и пространственные референсные СК-42 координаты 22 пунктов ГГС, равномерно расположенных на площади около 1200 км².

По формулам (5) и (4) были вычислены коэффициенты:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & (X_1 - X_{cp}) & (Y_1 - Y_{cp}) & (Z_1 - Z_{cp}) \\ 1 & (X_2 - X_{cp}) & (Y_2 - Y_{cp}) & (Z_2 - Z_{cp}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & (X_{22} - X_{cp}) & (Y_{22} - Y_{cp}) & (Z_{22} - Z_{cp}) \end{bmatrix}$$

и свободные члены:

$$\epsilon_X = \begin{bmatrix} \epsilon_{X_1} \\ \epsilon_{X_2} \\ \dots \\ \epsilon_{X_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4,676 \\ -4,742 \\ -5,397 \\ -4,608 \\ -4,595 \\ -4,578 \\ -4,602 \\ -5,042 \\ -4,452 \\ -4,608 \\ -4,421 \\ -4,832 \\ -5,042 \\ -4,719 \\ -4,767 \\ -4,820 \\ -5,057 \\ -4,766 \\ -5,265 \\ -4,465 \\ -4,821 \\ -4,404 \end{bmatrix}; \quad \epsilon_Y = \begin{bmatrix} \epsilon_{Y_1} \\ \epsilon_{Y_2} \\ \dots \\ \epsilon_{Y_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7,549 \\ -7,354 \\ -8,068 \\ -7,426 \\ -7,545 \\ -7,505 \\ -7,414 \\ -7,337 \\ -7,507 \\ -7,412 \\ -7,615 \\ -7,374 \\ -7,404 \\ -7,399 \\ -8,077 \\ -7,351 \\ -8,415 \\ -7,401 \\ -7,576 \\ -7,458 \\ -8,755 \\ -7,491 \end{bmatrix}; \quad \epsilon_Z = \begin{bmatrix} \epsilon_{Z_1} \\ \epsilon_{Z_2} \\ \dots \\ \epsilon_{Z_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,175 \\ -0,123 \\ -1,258 \\ -0,056 \\ -0,458 \\ -0,262 \\ -0,224 \\ -0,196 \\ -0,009 \\ -0,023 \\ 0,037 \\ 0,031 \\ -0,272 \\ -0,069 \\ -0,276 \\ -0,167 \\ -0,633 \\ 0,008 \\ -0,502 \\ -0,010 \\ -0,812 \\ -0,018 \end{bmatrix},$$

которые отражают дифференциальные искажения координатного пространства в данном локальном районе.

Точность преобразования координат с использованием глобальных параметров в данном локальном районе составляет:

$$m_X = \sqrt{\frac{\epsilon_X^T P_X \epsilon_X}{p}} = 4,76 \text{ м}, \quad m_Y = \sqrt{\frac{\epsilon_Y^T P_Y \epsilon_Y}{p}} = 7,62 \text{ м}, \quad m_Z = \sqrt{\frac{\epsilon_Z^T P_Z \epsilon_Z}{p}} = 0,40 \text{ м}.$$

Поскольку в каркасную сеть вошли пункты ГГС одного класса точности, то весовые матрицы P_X , P_Y , P_Z приняты равными единичным матрицам.

В результате реализации формулы (7) получены значения параметров $A_0, A_X, A_Y, A_Z, B_0, B_X, B_Y, B_Z, C_0, C_X, C_Y, C_Z$ модели многофакторной регрессии:

$$A = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_X \\ A_Y \\ A_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4,758 \\ -13,913 \cdot E - 5 \\ 31,512 \cdot E - 5 \\ 66,228 \cdot E - 5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_0 \\ B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7,611 \\ -21,890 \cdot E - 5 \\ 50,441 \cdot E - 5 \\ 101,141 \cdot E - 5 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} C_0 \\ C_X \\ C_Y \\ C_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,248 \\ -27,228 \cdot E - 5 \\ 61,448 \cdot E - 5 \\ 126,225 \cdot E - 5 \end{bmatrix}.$$

По формулам (8) на каркасных пунктах вычислены остаточные ошибки координат u_X, u_Y, u_Z :

$$u_X = \begin{bmatrix} 0,064 \\ -0,059 \\ 0,137 \\ 0,014 \\ -0,160 \\ 0,019 \\ -0,012 \\ -0,035 \\ 0,133 \\ -0,048 \\ -0,101 \\ 0,065 \\ -0,061 \\ 0,132 \\ -0,049 \\ -0,021 \\ 0,058 \\ 0,046 \\ 0,101 \\ 0,007 \\ -0,163 \\ -0,069 \end{bmatrix}, u_Y = \begin{bmatrix} 0,022 \\ -0,003 \\ -0,115 \\ 0,024 \\ 0,290 \\ 0,119 \\ 0,056 \\ -0,075 \\ -0,197 \\ 0,050 \\ 0,013 \\ 0,107 \\ -0,146 \\ 0,023 \\ 0,059 \\ -0,033 \\ 0,203 \\ 0,027 \\ -0,276 \\ -0,149 \\ 0,228 \\ -0,229 \end{bmatrix}, u_Z = \begin{bmatrix} 0,145 \\ 0,004 \\ 0,385 \\ -0,055 \\ 0,335 \\ 0,222 \\ 0,142 \\ -0,182 \\ -0,020 \\ -0,121 \\ -0,043 \\ -0,118 \\ -0,194 \\ 0,088 \\ -0,143 \\ 0,018 \\ -0,037 \\ -0,084 \\ -0,125 \\ -0,171 \\ -0,014 \\ -0,032 \end{bmatrix}.$$

Точность преобразования координат по глобальным параметрам после исключения дифференциальных искажений координатного пространства СК-42 в локальном районе по модели (2) оценивается средними квадратическими значениями остаточных (не исключаемых) ошибок:

$$m_X = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_X^T P_X \mathbf{v}_X}{p-4}} = 0,09 \text{ м}, \quad m_Y = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_Y^T P_Y \mathbf{v}_Y}{p-4}} = 0,16 \text{ м}, \quad m_Z = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_Z^T P_Z \mathbf{v}_Z}{p-4}} = 0,17 \text{ м}.$$

Таким образом, экспериментальная проверка показала, что предлагаемая модель позволяет в локальном районе учитывать дифференциальные искажения координатного пространства СК-42 с необходимой для войск точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличительной особенностью данной модели высокоточного преобразования координат является использование многофакторного регрессионного анализа невязок координат подмножества совмещенных пунктов для вычисления поправок к координатам, полученным по глобальным параметрам перехода между системами координат. Точность перевычисления координат пунктов из системы СК-42 в ПЗ-90.11 в локальных районах, в соответствии с предлагаемым алгоритмом, находится на дециметровом уровне.

Модель преобразования координат из одной системы в другую на основе многофакторной регрессии возможно использовать для геодезического обеспечения решения задач обороны страны.

Список используемых источников

1. *Астапович А. В.* Теория математической обработки измерений : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – Ч. 1: Ошибки измерений. – 194 с.
2. Опыт создания геоцентрической системы координат ПЗ-90 / В. В. Бойков [и др.] // Геодезия и картография. – 1993. – № 11. – С. 17–21.
3. *Герасимов А. П.* Уравнивание государственной геодезической сети. – М. : Картгеоцентр – Геодезиздат, 1996. – 216 с.
4. *Залуцкий В. Т.* О преобразовании координат в спутниковой технологии // Геодезия и картография. – 2000. – № 7. – С. 17–24.
5. *Кремер Н. Ш., Путко Б. А.* Эконометрика : учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. Н. Ш. Кремера. – 4-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2018. – 354 с.
6. Основные положения о Государственной геодезической сети Российской Федерации. ГКИНП (ГНТА) – 01-006-03. – М., 2004. – 28 с.
7. Параметры Земли 1990 года : специализированный справочник ВТУ ГШ РФ. – М., 2020. – 64 с.
8. *Веселовская А. З., Шепелявая Н. Б.* Элементы линейной алгебры. Пространство R^n и его линейные подпространства : учеб. пособие. – СПб. : СПбГУ, 2021. – 50 с.

Ф. А. Галкин,
кандидат технических наук, доцент;
Е. Э. Филиппских,
кандидат технических наук

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТИПОВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДАТЧИКАМ С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

В статье представлено описание модели расчета радиолокационных изображений (РЛИ) типовых растительных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн (3,4 см) применительно к датчикам с высокой разрешающей способностью (1,4 x 2,1 м). В рамках разработанной авторами модели на основе результатов анализа натуральных (экспериментальных) данных радиолокационной станции с синтезированной апертурой (РСА) «Компакт-100» (АО «НИИ точных приборов») в части определения статистических и корреляционных свойств типовых растительных покровов в СВЧ-диапазоне предложен для практического использования генератор матриц флюктуаций отсчетов яркости РЛИ растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес).

Ключевые слова: модель расчета, радиолокационные изображения, типовые растительные покровы, флюктуации отраженных сигналов, статистические и корреляционные свойства отсчетов яркости.

ВВЕДЕНИЕ

Активное применение современных высокодетальных средств дистанционного зондирования земной поверхности сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона в интересах решения разнообразных задач, таких как картографирование местности, контроль и предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций, противодействие незаконной хозяйственной деятельности, а также комплексный мониторинг окружающей среды, предусматривающий, в том числе, осуществление охраны, контроля и учета использования природных ресурсов, особенно территорий лесного фонда, приводят к необходимости повышения степени автоматизации операций анализа и обработки больших объемов получаемых радиолокационных данных [1].

При этом основным проблемным вопросом в настоящее время является обеспечение достоверной идентификации растительных покровов различных типов (классов) с определением их морфологических и лесопатологических характеристик по отсчетам яркости РЛИ в интересах решения вышеуказанных народно-хозяйственных задач. Вместе с тем необходимо отметить, что в силу специфичности физической природы формирования РЛИ различных объектов местности, в том числе объектов (покровов) растительного происхождения, их изображения в СВЧ-диапазоне существенным образом отличаются от изображений в видимом диапазоне спектра и являются очень сложными для адекватного восприятия и интерпретации не только системами технического зрения, но и человеком (оператором).

Кроме того, следует также отметить, что при использовании современных высокодетальных СВЧ-датчиков дистанционного зондирования земной поверхности в сантиметровом диапазоне длин волн обеспечивается высокая (порядка единиц метров) разрешающая способность на местности [2, 3]. В этом случае при обзоре фонов растительного происхождения может наблюдаться резкое изменение статистических и корреляционных свойств их РЛИ, обусловленное соизмеримостью геометрических размеров отдельных структурных элементов растительных фонов с размерами разрешаемой элементарной площадки на местности [4]. Данные свойства РЛИ растительных покровов представляют собой основополагающие ин-

формационные признаки для анализа их морфологических (лесопатологических) свойств в СВЧ-диапазоне и последующего отношения к тому или иному типу (классу) растительности.

Следовательно, для рассматриваемого случая эффективность обработки данных дистанционного зондирования в СВЧ-диапазоне определяется уровнем подготовленности операторов и степенью внедрения автоматизированных средств, в том числе средств для обеспечения их визуальной поддержки на основе использования адекватных модельных (прогнозных) РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес), учитывающих их статистические и корреляционные свойства в сантиметровом диапазоне длин волн.

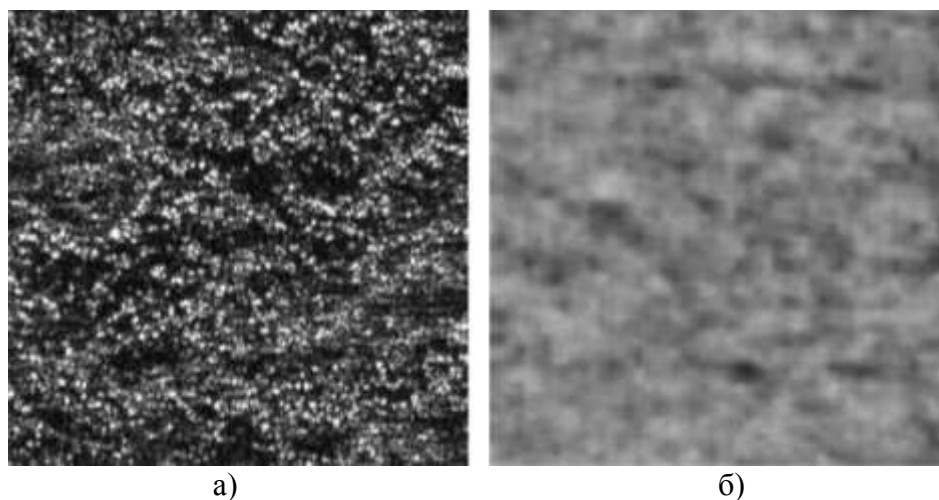
В этой связи становится актуальной разработка модели расчета радиолокационных изображений типовых растительных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн применительно к датчикам с высокой разрешающей способностью.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ РАСЧЕТА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТИПОВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ

Целью разработки модели расчета РЛИ типовых растительных покровов является учет статистических и корреляционных свойств при формировании модельных (прогнозных) РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес) применительно к радиолокационным датчикам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с высокой разрешающей способностью.

Разработанная модель должна обеспечивать учет вышеуказанных особенностей флюктуаций отраженных сигналов при формировании отсчетов яркости РЛИ типовых растительных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн применительно к высокдетальным СВЧ-датчикам средств ДЗЗ.

На рис. 1 представлены примеры зависимости изменения характера флюктуаций отраженных сигналов, соответствующих участкам леса на экспериментальных РЛИ, полученных датчиками с различной разрешающей способностью на местности.



*Рис. 1. Примеры зависимости изменения характера флюктуаций отраженных сигналов от участков леса на экспериментальных РЛИ при разрешающей способности радиолокационного датчика:
а – $1,5 \times 2,0$ м; б – 5×5 м*

Для учета статистических и корреляционных свойств РЛИ растительных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн предлагается модель расчета РЛИ типовых растительных

покровов (низкорослый луг, смешанный лес), которая подразумевает последовательное выполнение следующих основных технологических этапов (рис. 2):

- расчета матриц флюктуаций отсчетов яркости РЛИ растительного покрова;
- расчета энергетического портрета растительного покрова с использованием угловых (регрессионных) зависимостей среднего значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) типовых растительных покровов;
- формирования прогнозного РЛИ растительного покрова на основе комплексирования результатов расчета матриц флюктуаций отсчетов яркости и энергетического портрета растительного покрова.

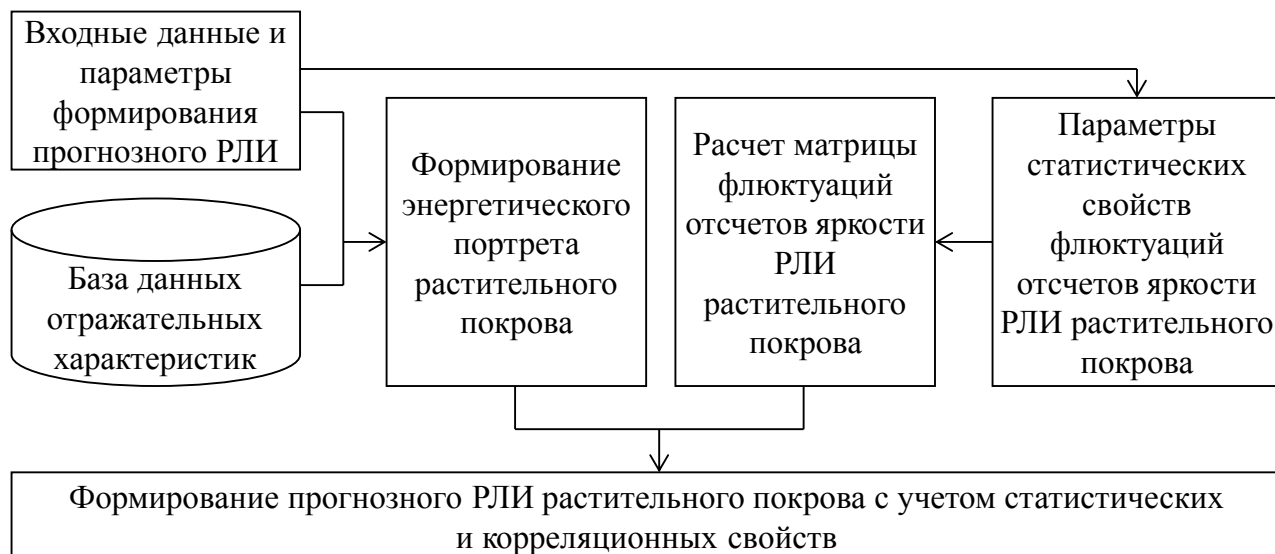


Рис. 2. Блок-схема предлагаемой модели расчета РЛИ типовых растительных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн применительно к датчикам с высокой разрешающей способностью

В интересах разработки модели расчета РЛИ типовых растительных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн применительно к датчикам с высокой разрешающей способностью необходимо решить следующий комплекс задач:

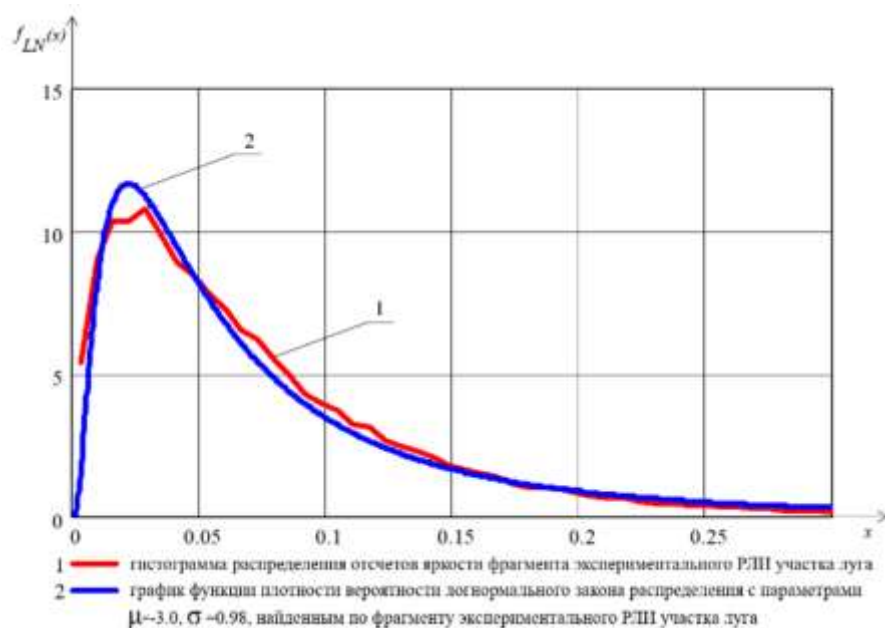
- определить параметры статистических и корреляционных свойств флюктуаций отсчетов яркости РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес) на примере натуральных данных, полученных РСА «Компакт-100» с разрешающей способностью на местности $1,4 \times 2,1$ м;
- разработать генератор матриц флюктуаций отсчетов яркости РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАТИСТИЧЕСКИХ И КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФЛЮКТУАЦИЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТИПОВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАТУРНЫХ ДАННЫХ

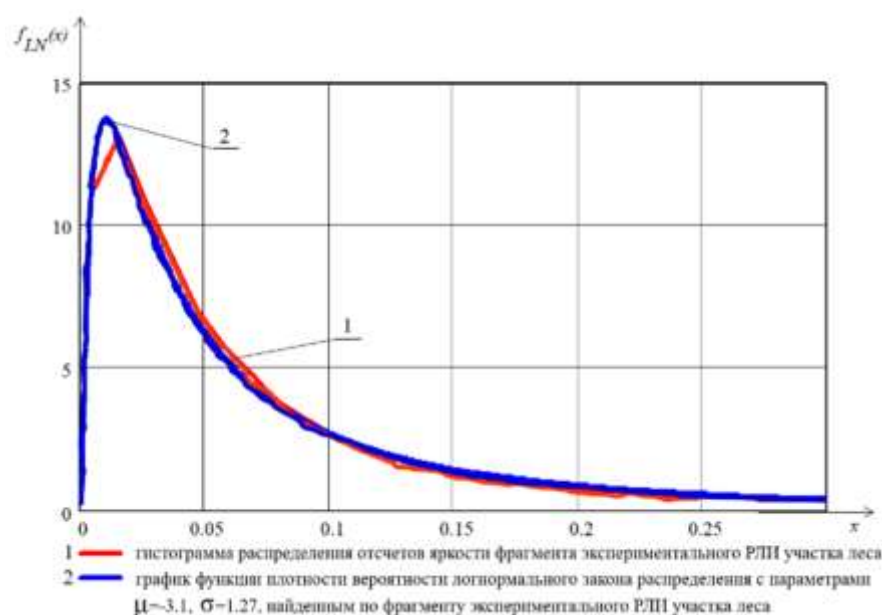
Определение параметров статистических и корреляционных свойств РЛИ низкорослого луга и смешанного леса осуществлялось по 48 фрагментам натуральных РЛИ, полученных РСА «Компакт-100» с пространственным разрешением на местности $1,4 \times 2,1$ м. При определении статистических и корреляционных свойств РЛИ растительных фонов (низкорослый луг,

смешанный лес) оценивались законы распределения, параметры законов распределения и интервалы пространственной корреляции отсчетов яркости их РЛИ.

При оценке закона распределения отсчетов яркости РЛИ луга и леса проверялась гипотеза о логнормальном законе распределения $f_{LN}(x)$ по критерию согласия χ^2 [5]. В основе данного предположения лежат результаты анализа внешнего вида гистограмм распределения отсчетов яркости фрагментов экспериментальных РЛИ участков растительного фона и графиков функций плотности вероятности, соответствующих логнормальному закону распределения с параметрами, определенными по натурным данным (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Гистограммы распределения отсчетов яркости фрагментов экспериментального РЛИ участка луга (а) и леса (б) и графики функций плотности вероятности

Существенным достоинством критерия χ^2 является возможность его применения тогда, когда априорно известен лишь вид гипотетического распределения случайной величины x с плотностью распределения $f_{LN}(x)$, но не известны его параметры.

Проверка гипотезы $f_{LN}(x)$ осуществляется на основе представительной выборки фрагментов натуральных РЛИ, содержащих области растительных покровов. Совокупность N отсчетов яркости x с истинной плотностью распределения $p(x)$ в составе каждого фрагмента РЛИ разбивается на количество интервалов $K = 256$, называемых разрядами, которые в совокупности образуют гистограмму частот. Число наблюдаемых значений в i -м разряде f_i является наблюдаемой частотой.

Число отсчетов яркости F_i , которое, как можно ожидать, попадет в i -й разряд, если истинная плотность распределения $p(x) = f_{LN}(x)$, является ожидаемой частотой в i -м разряде. Для определения общего расхождения для всех разрядов между наблюдаемой и ожидаемой частотами рассчитывается статистика $\chi_{\text{расч}}^2$:

$$\chi_{\text{расч}}^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i}. \quad (1)$$

Величина $\chi_{\text{расч}}^2$ имеет приблизительно то же распределение, что и случайная величина, имеющая закон распределения хи-квадрат. Число степеней свободы n в этом случае равно $(K - 1)$ минус число неизвестных параметров прогнозируемого закона распределения случайной величины. В рассматриваемом случае неизвестными параметрами закона распределения $f_{LN}(x)$ являются параметр формы σ и масштабный параметр μ , а следовательно число степеней свободы $n = K - 3 = 253$.

Ширина каждого i -го разряда выбирается в предположении о логнормальном законе распределения отсчетов яркости $f_{LN}(x)$ таким образом, чтобы ожидаемые частоты F_i в пределах каждого разряда были одинаковыми $F_i = N / K$.

Одновременно для каждого фрагмента натуральных РЛИ строится гистограмма распределения наблюдаемых отсчетов f_i в этих равновероятностных разрядах. С использованием выражения (1) для каждого анализируемого фрагмента РЛИ низкорослого луга и смешанного леса определяется статистика $\chi_{\text{расч}}^2$.

Область принятия гипотезы определяется неравенством

$$\chi_{\text{расч}}^2 \leq \chi_{n,\alpha}^2, \quad (2)$$

где $\chi_{n,\alpha}^2$ – порог испытаний, определяемый по уровню значимости α и числу степеней свободы n .

Если для всей выборки фрагментов натуральных РЛИ, содержащих области растительных покровов, подтверждается выполнение условия (2), то гипотеза $f_{LN}(x)$ о логнормальном законе распределения отсчетов яркости РЛИ растительных покровов подтверждается для уровня значимости α .

Случайная величина x с логнормальным законом распределения характеризуется функцией плотности вероятности:

$$f_{LN}(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \frac{-(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}, \quad (3)$$

где x – область значений, $(0 \leq x < +\infty)$;
 σ – параметр формы;
 μ – масштабный параметр.

Для оценки параметров логнормального распределения случайной величины использовались известные соотношения:

$$\mu = \ln(m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i); \quad m = \exp\left(\mu - \frac{\sigma^2}{n}\right). \quad (4)$$

Для всех двадцати восьми фрагментов натуральных РЛИ луга ($N_{\text{луг}} = 28$) и двадцати фрагментов леса ($N_{\text{лес}} = 20$) оказалось, что условие (2) выполняется. Следовательно, гипотеза $f_{LN}(x)$ о логнормальном законе распределения отсчетов яркости РЛИ луга и леса по экспериментальным данным, полученным РСА «Компакт-100», подтвердилась при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Отдельно для каждого фрагмента экспериментальных РЛИ луга ($N_{\text{луг}} = 28$) и леса ($N_{\text{лес}} = 20$) были найдены значения масштабного параметра μ . На основе полученной выборки было найдено среднее значение масштабного параметра $\bar{\mu}$ и дисперсия $D(\mu)$.

Для получения интервальной оценки (доверительного интервала) масштабных параметров $\mu_{\text{луг}}$ и $\mu_{\text{лес}}$ использовалось выражение [5]

$$\left[\left(\bar{\mu} - \frac{\sqrt{D(\mu)} \cdot t_{n,\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right) \leq \mu_{\mu} < \left(\bar{\mu} + \frac{\sqrt{D(\mu)} \cdot t_{n,\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right) \right], \quad n = N - 1, \quad (5)$$

где $\bar{\mu}$ – выборочное среднее значение масштабного параметра логнормального закона распределения луга ($\bar{\mu}_{\text{луг}}$), леса ($\bar{\mu}_{\text{лес}}$);

N – объем выборки ($N_{\text{луг}} = 28$; $N_{\text{лес}} = 20$);

$\sqrt{D(\mu)}$ – выборочное среднеквадратическое отклонение случайной величины μ ($\sqrt{D(\mu_{\text{луг}})} = 0,27$; $\sqrt{D(\mu_{\text{лес}})} = 0,25$);

$(1 - \alpha)$ – доверительная вероятность, $\alpha = 0,05$;

$t_{n,\alpha/2}$ – процентная точка t -распределения Стьюдента (из таблиц получено: для луга – $t_{27,0,025} = 2,052$; для леса – $t_{19,0,025} = 2,11$).

Для определения интервала изменения параметра формы σ , соответствующего 95% доверительного интервала параметра масштаба μ , использовалось выражение для определения среднего значения \bar{x} случайной величины x с логнормальным законом распределения [6]:

$$\bar{x} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right). \quad (6)$$

Тогда граничные значения интервала изменения параметра формы σ логнормального закона распределения вычисляются по формуле

$$\sigma = \sqrt{2 \ln\left(\frac{\bar{x}}{\exp(\mu_{\mu})}\right)}. \quad (7)$$

Обобщенные результаты проверки гипотезы о логнормальном законе распределения флюктуаций РЛИ леса и луга по критерию χ^2 и определения доверительных интервалов параметров распределения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обобщенные результаты проверки гипотезы о логнормальном законе распределения флюктуаций РЛИ леса и луга по критерию χ^2 и определения доверительных интервалов параметров распределения

Тип фона	Объем выборки, N	Порог принятия гипотезы $\chi^2_{n=253; \alpha=0,05}$	Условие принятия гипотезы	Среднее значение		Доверительный интервал при $1 - \alpha = 0,95$	
				$\bar{\mu}$	$\bar{\sigma}$	μ	σ
Луг	28	291,1	$\chi^2_{расч} < \chi^2_{n; \alpha}$ для всех N	-3,075	0,935	[-3,18;-2,97)	[0,82;1,05)
Лес	20			-3,225	1,335	[-3,35;-3,10)	[1,24;1,43)

В ходе анализа корреляционных свойств РЛИ луга и леса, полученных РСА «Компакт-100» с разрешением на местности $\Delta x = 1,4$ м (вдоль линии пути РСА), $\Delta y = 2,1$ м (поперек линии пути РСА), удалось выяснить, что РЛИ луга содержат одномасштабные (мелкомасштабные) неоднородности.

В свою очередь, на РЛИ леса явно присутствуют двухмасштабные (мелкомасштабные и крупномасштабные) неоднородности. Под мелкомасштабными неоднородностями будем в дальнейшем понимать неоднородности, интервалы корреляции которых вдоль Δp_x и поперек линии пути Δp_y по уровню $R(p) = 0,5$ удовлетворяют условиям $\Delta p_x \leq \Delta x$, $\Delta p_y \leq \Delta y$.

Примеры зависимости коэффициента корреляции $R(p)$ отсчетов яркости РЛИ луга и леса от величины пространственного сдвига p показаны на рис. 4 и 5.

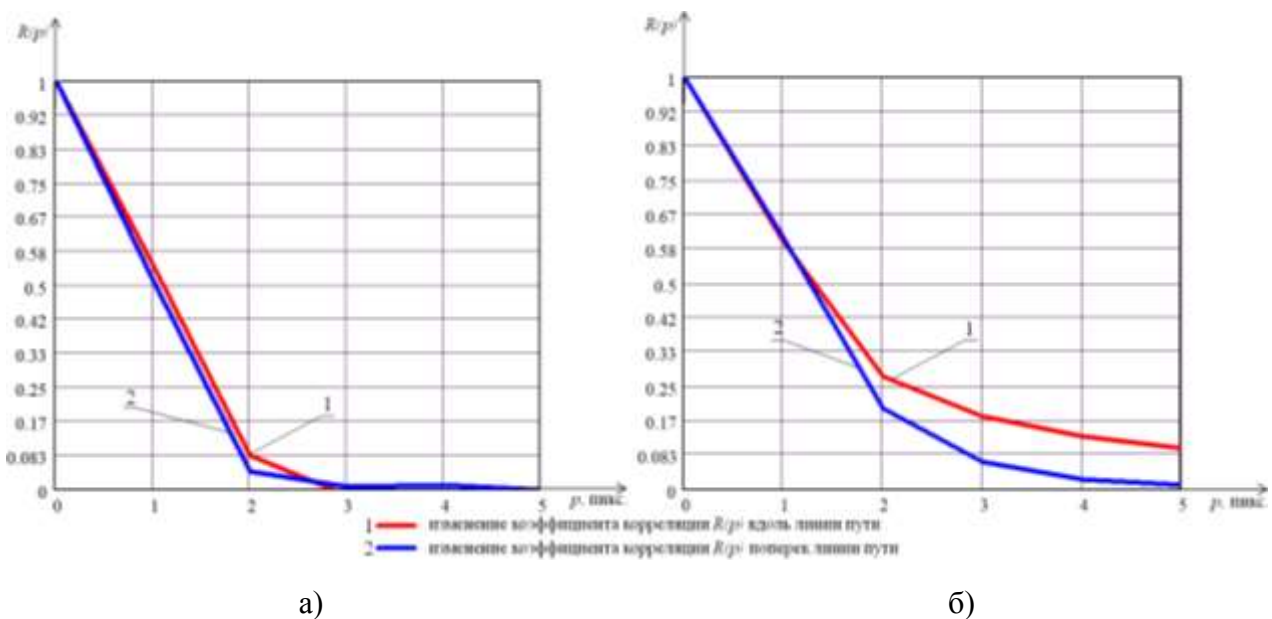


Рис. 4. Примеры зависимости коэффициента корреляции $R(p)$ отсчетов яркости, соответствующих мелкомасштабным неоднородностям на РЛИ луга (а) и леса (б), от величины пространственного сдвига p

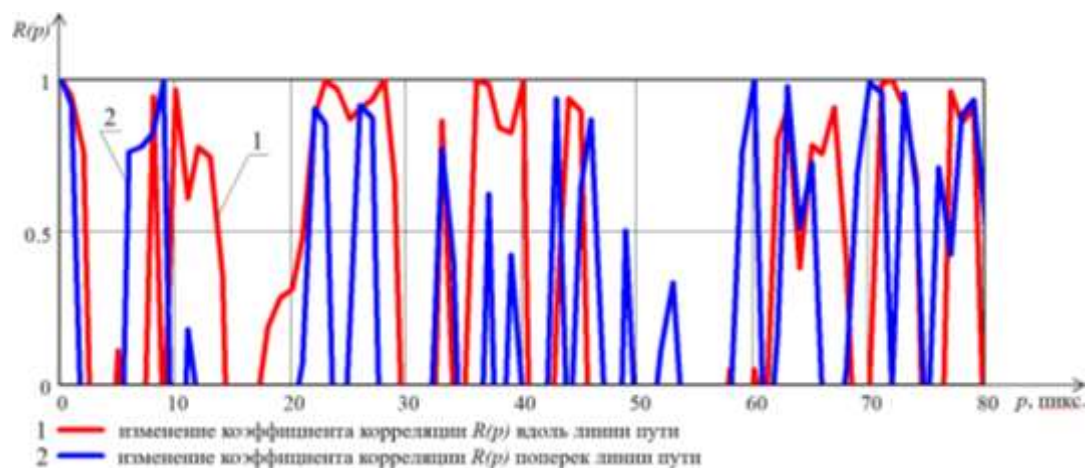


Рис. 5. Пример зависимости коэффициента корреляции $R(p)$ отсчетов яркости, соответствующих крупномасштабным неоднородностям на РЛИ леса, от величины пространственного сдвига p

Обобщенные результаты оценивания интервалов корреляции отсчетов яркости флюктуаций РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес) на примере экспериментальных данных РСА «Компакт-100» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Обобщенные результаты оценивания интервалов корреляции отсчетов яркости флюктуаций РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес) на примере экспериментальных данных РСА «Компакт-100»

Тип фона	Интервал корреляции			
	по азимуту (вдоль линии пути)		по горизонтальной дальности (поперек линии пути)	
	мелкомасштабные неоднородности, пиксели (м)	крупномасштабные неоднородности, пиксели (м)	мелкомасштабные неоднородности, пиксели (м)	крупномасштабные неоднородности, пиксели (м)
Луг	1 (1)	–	1 (1,25)	–
Лес	3 (3)	20 (20)	2 (2,5)	7 (8,75)

Из анализа данных в табл. 2 следует, что величина мелкомасштабных неоднородностей, присущих РЛИ обоих типов рассматриваемых растительных покровов, и по азимуту, и по горизонтальной дальности меньше у низкорослого луга и не превышает для него соответствующих значений пространственного разрешения по обеим координатам.

Это объясняется тем, что размеры элементов низкорослого луга (в отличие от элементов смешанного леса) не превышают размеров разрешаемой на местности площадки.

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА МАТРИЦ ФЛЮКТУАЦИЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТИПОВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ

Полученные оценки параметров статистических (табл. 1) и корреляционных (табл. 2) свойств флюктуаций РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес) в дальнейшем используются в разработанной модели расчета РЛИ типовых раститель-

ных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн применительно к датчикам с высокой разрешающей способностью.

Для формирования расчетных (модельных) РЛИ луга и леса применительно к РСА «Компакт-100» и другим радиолокационным датчикам с аналогичными параметрами функционирования предлагается сформировать матрицы случайных величин с равномерным законом распределения [6]:

$$R_{i,j}^{\text{ЛЮГ}}(0,1), i \in [0, W-1+pw], j \in [0, H-1+ph], pw = ph = 1, \quad (8)$$

$$R1_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(0,1), i \in [0, W-1+pw1], j \in [0, H-1+ph1], pw1 = 3, ph1 = 2, \quad (9)$$

$$R2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(0,1), i \in [0, W-1+pw2], j \in [0, H-1+ph2], pw2 = 20, ph2 = 7, \quad (10)$$

где W, H – ширина и высота формируемой матрицы, пикс.;
 pw, ph – радиус корреляции мелкомасштабных неоднородностей луга, пикс.;
 $pw1, ph1$ – радиус корреляции мелкомасштабных неоднородностей леса, пикс.;
 $pw2, ph2$ – радиус корреляции крупномасштабных неоднородностей леса, пикс.

С использованием метода «скользящего окна» на основе матриц (8)–(10) формируются матрицы случайных величин с нормальным законом распределения:

$$N_{i,j}^{\text{ЛЮГ}}(0,1) \approx 1,43 \cdot \left(\sum_i^{i+ph} \sum_j^{j+pw} R_{i,j}^{\text{ЛЮГ}}(0,1) - 2,001 \right), \quad (11)$$

$$i \in [0, W-1], j \in [0, H-1], pw = ph = 1;$$

$$N1_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(0,1) \approx \sum_i^{i+ph1} \sum_j^{j+pw1} R1_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(0,1) - 6,006; \quad (12)$$

$$N2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(0,1) \approx 0,267 \cdot \left(\sum_i^{i+ph2} \sum_j^{j+pw2} R2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(0,1) - 83,948 \right), \quad (13)$$

$$i \in [0, W-1], j \in [0, H-1], pw1 = 3, ph1 = 2, pw2 = 20, ph2 = 7.$$

С использованием известных соотношений на основе матриц случайных величин с нормальным законом распределения генерируются матрицы с логнормальным законом распределения [6]:

$$L1_{i,j}^{\text{ЛЮГ}}(-3, 1,05) \approx e^{-3} e^{1,05 \cdot N_{i,j}^{\text{ЛЮГ}}(0,1)}; \quad (14)$$

$$L1_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,18, 1,18) \approx e^{-3,18} e^{1,18 \cdot N1_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(0,1)}; \quad (15)$$

$$L2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,23, 1,22) \approx e^{-3,23} e^{1,22 \cdot N2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(0,1)}. \quad (16)$$

Формирование итоговых матриц флюктуаций отсчетов яркости РЛИ луга $L_{i,j}^{\text{ЛУГ}}$ и леса $L_{i,j}^{\text{ЛЕС}}$ осуществляется с использованием следующих выражений:

$$L2_{i,j}^{\text{ЛУГ}}(-3,12,1) = \frac{L1_{i,j}^{\text{ЛУГ}}(-3,1,05)}{1,03} - 0,0027; \quad (17)$$

$$L_{i,j}^{\text{ЛУГ}}(-3,12,1) = \begin{cases} 1,015, & \text{если } L2_{i,j}^{\text{ЛУГ}}(-3,12,1) > 0,789 \\ L2_{i,j}^{\text{ЛУГ}}, & \text{если } L2_{i,j}^{\text{ЛУГ}}(-3,12,1) \leq 0,789 \end{cases}; \quad (18)$$

$$L3_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,15,1,29) = \begin{cases} L1_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,18,1,18) \cdot 1,6, & \text{если } L2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,23,1,22) \leq 0,094 \\ \frac{L2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,23,1,22)}{15,5}, & \text{если } L2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,23,1,22) > 0,094 \end{cases}; \quad (19)$$

$$L_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,22,1,32) = \begin{cases} 3,64, & \text{если } L3_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,15,1,29) > 3,64 \\ 2,6 \cdot 10^{-4}, & \text{если } L3_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,15,1,29) \leq 3,5 \cdot 10^{-3} \\ 0,943 \cdot L2_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,23,1,22), & \text{если } L3_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,15,1,29) \in (3,5 \cdot 10^{-3}; 3,64) \end{cases}. \quad (20)$$

На рис. 6 представлены результаты сравнения гистограмм распределения флюктуаций отсчетов яркости РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес), полученных на основе расчета и анализа экспериментальных данных РСА «Компакт-100».

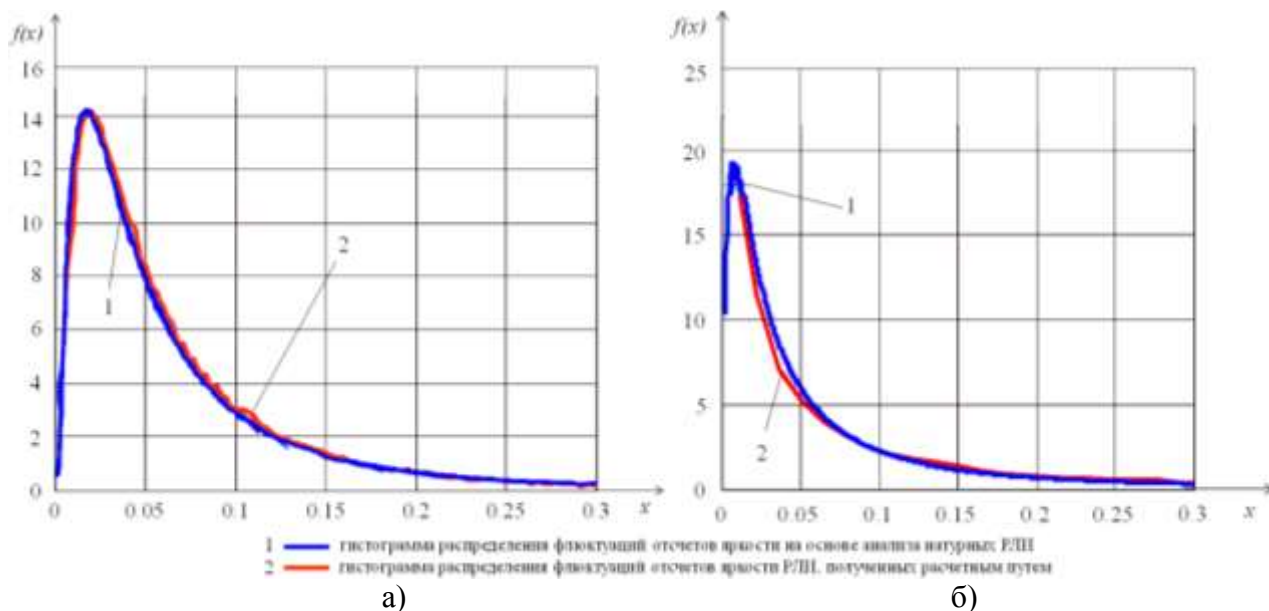


Рис. 6. Результаты сравнения гистограмм распределения флюктуаций отсчетов яркости РЛИ луга (а) и леса (б), полученных расчетным путем и на основе анализа экспериментальных (натурных) данных РСА «Компакт-100»

РАСЧЕТ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТИПОВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ С УЧЕТОМ ИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ И КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

С учетом результатов, полученных в ходе определения параметров статистических и корреляционных свойств флюктуаций РЛИ типовых растительных покровов на основе анализа натуральных данных РСА «Компакт-100», а также разработки генератора соответствующих матриц флюктуаций РЛИ, выражения, описывающие процедуру расчета модельных РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес) с учетом их статистических и корреляционных свойств в сантиметровом диапазоне длин волн ($\lambda = 3,4$ см) для радиолокационных датчиков с высокой разрешающей способностью ($1,4 \times 2,1$ м), имеют вид:

$$\sigma_{i,j}^{\text{ЛУГ}} = \left(\sigma_{\text{ЛУГ},i,j}^o(\theta) + L_{i,j}^{\text{ЛУГ}}(-3,12,1) - 0,067 \right) \cdot S_{\text{ЭР},i,j}, \quad (21)$$

$$\sigma_{i,j}^{\text{ЛЕС}} = \left(\sigma_{\text{ЛЕС},i,j}^o(\theta) + L_{i,j}^{\text{ЛЕС}}(-3,22,1,32) - 0,096 \right) \cdot S_{\text{ЭР},i,j}, \quad (22)$$

где $\sigma_{i,j}^{\text{ЛУГ}}$, $\sigma_{i,j}^{\text{ЛЕС}}$ – значения эффективной площади рассеяния (ЭПР) растительности (низкорослый луг, смешанный лес) в элементе разрешения i, j ;
 $\sigma_{\text{ЛУГ},i,j}^o$, $\sigma_{\text{ЛЕС},i,j}^o$ – значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) растительности (низкорослый луг, смешанный лес) в элементе разрешения i, j ;
 $S_{\text{ЭР},i,j}$ – значение площади поверхности растительного покрова в пределах элемента разрешения i, j ;
 $L_{i,j}^{\text{ЛУГ}}$, $L_{i,j}^{\text{ЛЕС}}$ – отсчеты матриц флюктуаций низкорослого луга и смешанного леса соответственно.

На рис. 7 показаны примеры результатов применения разработанной модели расчета РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес).

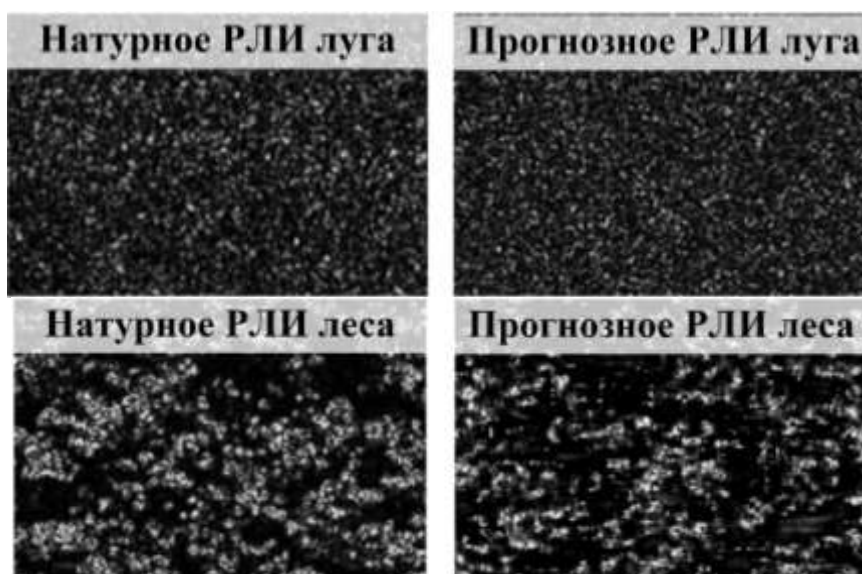


Рис. 7. Примеры результатов применения разработанной модели расчета РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес)

Как можно видеть из рис. 7 разработанная модель расчета РЛИ типовых растительных покровов, учитывающая их статистические свойства в сантиметровом диапазоне длин волн применительно к датчикам с высокой разрешающей способностью, обеспечивает формирование адекватных прогнозных изображений соответствующих типов растительности (низкорослый луг, смешанный лес) с учетом их статистических и корреляционных свойств в сантиметровом диапазоне длин волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель расчета радиолокационных изображений типовых растительных покровов в сантиметровом диапазоне длин волн применительно к датчикам с высокой разрешающей способностью обеспечивает расчет достоверных высокодетальных (с разрешающей способностью на местности $1,4 \times 2,1$ м) радиолокационных изображений фонов растительного происхождения различных типов (низкорослый луг, смешанный лес), учитывающих их статистические и корреляционные свойства, проявляющиеся в X-диапазоне длин волн ($\lambda = 3,4$ см) при функционировании РСА воздушного базирования семейства «Компакт-100» и им подобных.

В ходе разработки данной расчетной модели были решены задачи, обеспечившие реализацию ее вышеуказанных особенностей, а именно:

– на примере натуральных данных, полученных РСА «Компакт-100» с разрешающей способностью на местности $1,4 \times 2,1$ м, определены параметры статистических и корреляционных свойств флюктуаций отсчетов яркости РЛИ типовых растительных покровов (низкорослый луг, смешанный лес);

– в части типовых фонов растительного происхождения (низкорослый луг, смешанный лес) разработан генератор матриц флюктуаций отсчетов яркости их РЛИ.

Результаты применения разработанной модели в составе модельно-ориентированной методики расчета радиолокационных портретов [7] подтвердили ее эффективность и в целом обеспечили:

– снижение значений ошибок моделирования средней интенсивности отсчетов яркости прогнозных РЛИ местности, содержащих в своем составе типовые растительные покровы, в 1,7 раза, а среднеквадратического отклонения – в 1,2 раза;

– уменьшение среднего значения ошибок (расхождений) передачи относительных контрастов на прогнозных РЛИ местности, содержащих в своем составе типовые растительные покровы, в 1,4 раза.

Разработанную модель целесообразно использовать в качестве основы для дальнейшего развития в направлении расширения номенклатуры типов (классов) моделируемых растительных покровов в интересах повышения эффективности решения задач дистанционного зондирования фоновых образований растительного происхождения в СВЧ-диапазоне спектра.

С учетом отмеченных возможностей и особенностей областью применения разработанной методики является информационная поддержка процессов автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования земной поверхности, получаемых в СВЧ-диапазоне с использованием современных высокодетальных радиолокационных датчиков, при решении различных народно-хозяйственных задач, таких как экологический мониторинг, картографирование местности и контроль за использованием природных ресурсов, в том числе обширных территорий лесного фонда.

Список используемых источников

1. Карманова Н. А., Карманов А. Г., Петров А. А. Разработка модели радара с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата для дистанционного зондирования лесных массивов // *Информация и Космос*. – 2021. – № 4. – С. 114–122.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Вербя [и др.]. – М. : Радиотехника, 2010. – 676 с.
3. Самарин О. Ф., Соловьев А. А., Шарова Т. В. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов : в 3 т. – М. : Радиотехника, 2007. – Т. 3 : Вычислительные системы РЛС многофункциональных самолетов. – 280 с.
4. Методика уточнения параметров радиолокационных датчиков на основе обработки натуральных радиолокационных изображений местности / Е. Э. Филиппских [и др.] // *Информация и Космос*. – 2020. – № 1. – С. 138–148.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М. : Мир, 1974. – 42 с.
6. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. – 3-е изд. – СПб. : Питер; Киев : Издательская группа ВНУ, 2004. – 847 с.
7. Методика формирования радиолокационных портретов (сигнатур) объектов сложной пространственной конфигурации с проводящей поверхностью / Е. Э. Филиппских [и др.] // *Информация и Космос*. – 2022. – № 1. – С. 20–27.

С. В. Пилькевич,
доктор технических наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ АТАК, НАЦЕЛЕННЫХ НА КРАЖУ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Проведен анализ публикаций по тематике, посвященной реализации атак и соответствующих мер защиты моделей машинного обучения. Затронута проблема терминологической разобщенности, характерной для рассматриваемой предметной области. Представлена классификация атак кражи модели с достаточно подробным описанием реализуемых нарушителем мероприятий, составляющих суть деструктивных действий, направленных на хищение модели искусственного интеллекта. В заключении статьи приводится полная таксономия атак кражи моделей в виде «руководства для нарушителя». Это позволяет спрогнозировать возможные противоправные действия и выстроить архитектуру эшелонированной системы защиты, блокирующую доступ нарушителя к защищаемой информации и обеспечивающую сохранность модели машинного обучения.

Ключевые слова: атаки, кража данных, модель машинного обучения, искусственный интеллект.

ВВЕДЕНИЕ

Машинное обучение как услуга (MLaaS) стало широко распространенной парадигмой, благодаря ей даже самые сложные модели машинного обучения становятся доступными для рядовых пользователей. В результате понятие искусственного интеллекта прочно занимает свою нишу на рынке информационных услуг, переходя из области передовых технологических решений, доступных лишь избранным потребителям, в категорию обыденной реальности, позволяя решать сугубо прагматические задачи, хотя и чрезвычайно широкого класса. Это позволяет конечным потребителям избежать трудоемких процессов сбора данных, настройки гиперпараметров и обучения модели. Однако, предоставляя своим клиентам доступ к моделям, поставщики MLaaS подвергают опасности свою интеллектуальную собственность, такую как конфиденциальные обучающие данные, оптимизированные гиперпараметры или изученные параметры модели. Злоумышленники могут создать копию модели с (почти) идентичным поведением, используя только метки предсказания.

Несмотря на то, что описано много вариантов атак на модели искусственного интеллекта (ИИ) (которые в рамках настоящей публикации будут синонимизироваться с понятием атак на модели машинного обучения), в то же время необходимо отметить, что были предложены лишь разрозненные стратегии защиты, направленные на устранение отдельных угроз. Данное обстоятельство вызывает необходимость тщательной систематизации сферы информационной безопасности в части, касающейся области кражи моделей, чтобы прийти к всестороннему пониманию того, почему эти атаки успешны и как от них можно комплексно защититься.

ФАКТОГРАФИЯ ПУБЛИКАЦИЙ НА ТЕМУ АТАК, НАЦЕЛЕННЫХ НА КРАЖУ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Исследование разработок в части атак на технологии искусственного интеллекта (ИИ) базируется как на анализе литературных источников (публикаций в периодической печати, докладов на конференциях и книг), так и на материалах проведенного, в рамках подготовки настоящей статьи, патентного поиска.

Анализ более 50 статей об атаках и средствах защиты от кражи моделей показал, что своеобразный «пик заинтересованности» пройден (рис. 1). Начиная с 2016–2017 годов было

опубликовано огромное количество работ, при этом отмечается, что преобладают работы по атакам, объем литературы по защитным стратегиям «догоняет» их, но с существенным запаздыванием.

Следует отметить, что некоторые авторы публикаций не только рассматривают атаку на ранее известную технологию защиты, но и предлагают новую защиту, невосприимчивую к этой атаке.

Содержание подавляющего большинства работ сосредоточено на атаках с замещающими моделями обучения. В то же время представлено множество публикаций, относящихся к атакам с использованием побочных каналов (SCA), аппаратных (HW) или программных (SW), данные атаки используют несколько различных типов побочных каналов и образуют довольно неоднородную группу.

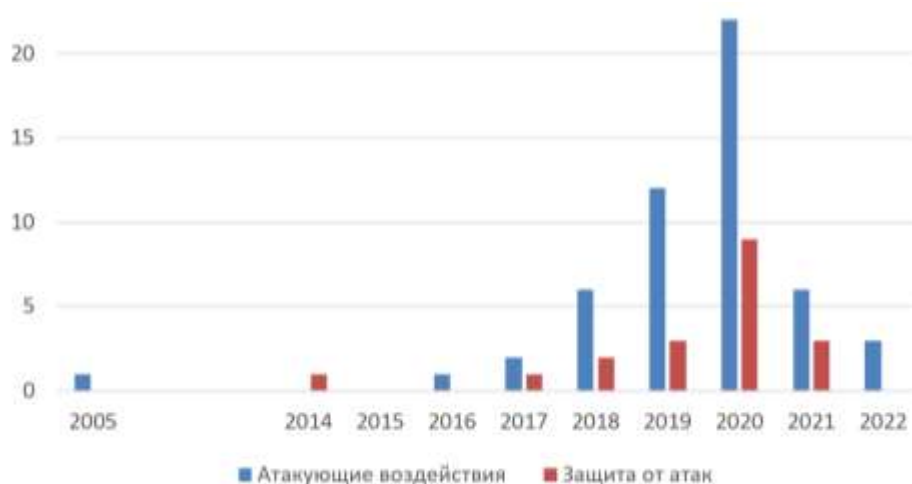


Рис. 1. Публикационная активность по тематике атак и защиты моделей машинного обучения за последние годы

Анализ публикаций, посвященных разным типам защиты, позволяет заключить, что в целом существует довольно равномерное распределение между различными методами и алгоритмами. Следует также отметить, что в большинстве своем подходы к защите подразделяются на две категории: одни являются реактивными и направлены на обнаружение атаки, в то время как другие – упреждающими и пытаются предотвратить атаку.

Большое количество публикаций, достаточно короткий временной промежуток развития рассматриваемого направления, преобладание англоязычных авторов – все это привело к многообразию используемой терминологии. Здесь и далее предлагается использовать наименования, сведенные в табл. 1.

Таблица 1

Многозначность терминологии в области атак «кража модели»

Терминология, используемая в настоящем исследовании (русский и английский варианты)	Другие обозначения с тем же значением
Атака «кража (извлечение) модели» / <i>Model stealing (extraction) attack</i> [1]	Атака обратного проектирования / <i>Reverse-engineering attack</i> [2], атака «черного ящика» / <i>black-box attack</i> [3], атака копированием / <i>copy attack</i> [4], исследовательская атака / <i>exploratory attack</i> [5], атака логического вывода / <i>inference attack</i> [6], атака дублирования / <i>duplication attack</i> [7], атака имитации / <i>mimicking attack</i> [8]

Окончание табл. 1

Терминология, используемая в настоящем исследовании (русский и английский варианты)	Другие обозначения с тем же значением
Целевая модель / <i>Target model</i> [1]	(Цель) оракул [1, 9], классификатор (модель) под атакой [5], секретная модель [10], модель жертвы / <i>victim model</i> [11], модель «черный ящик» [11], оригинальная модель [12], проприетарная модель [13], модель наставника / <i>mentor model</i> [8]
Замещающая модель / <i>Substitute model</i> [3]	Состязательный классификатор (модель) / <i>Adversarial classifier (model)</i> [5], имитирующая сеть / <i>copycat network</i> [4], поддельная модель / <i>knockoff model</i> [11], суррогатная модель [14], извлеченная модель / <i>extracted model</i> [12], выведенный классификатор (модель) / <i>inferred classifier (model)</i> [6], аппроксимация модели [13], модель студента [8], украденная модель [15]
Данные нарушителя / <i>Attacker's data</i>	Поддельный набор данных / <i>Fake dataset</i> [4], набор данных вора / <i>thief dataset</i> [10], набор злоумышленника / <i>attacker set</i> [16], набор передачи / <i>transfer set</i> [11]
Точность / <i>Fidelity</i> [17]	Точность извлечения / <i>Extraction accuracy</i> [1], совпадение меток предсказаний / <i>label prediction match</i> [3], сходство / <i>similarity</i> [9], согласованность / <i>agreement</i> [10], точность аппроксимации [12]

В первом столбце указан термин, используемый в основном в литературе, а значит, и в данном исследовании. Во втором – перечислены другие эквивалентные термины, используемые в открытых источниках для обозначения одного и того же понятия, а также ссылки на соответствующие работы.

АТАКА MODEL STEALING

Модель, которую нарушитель стремится украсть, называется *целевой моделью* и обозначается как f . Нарушитель может использовать эту модель в качестве оракула для сбора *данных*, представленных парами (x, y) . Вход x – это образец данных, который злоумышленник отправляет оракулу. Выход y является предсказанием целевой модели, т. е. $f(x) = y$. Одно такое взаимодействие с целевой моделью называется *запросом*. Если выходные данные являются единственной информацией, которую можно получить из f , то считается, что рассматривается модель «*черный ящик*». Если известны архитектура и параметры целевой модели, то говорят, что рассматривается модель «*белый ящик*». Любое промежуточное состояние называется «*серый ящик*». Если в результате атаки злоумышленник получает (возможно, приближительную) копию целевой модели, то эта модель обозначается символом \hat{f} .

В качестве возможностей злоумышленника рассматриваются три основных аспекта: знание целевой модели и данных, на которых она обучалась (т. е. *оригинальные данные*), действия, которые может выполнить злоумышленник, и ресурсы, которые ему доступны.

1. Знания злоумышленника о целевой модели и данных, на которых она обучалась. Злоумышленник может иметь один из трех типов доступа к целевой модели: «белый ящик», «серый ящик» или «черный ящик». Наличие доступа к «белому ящику» означает, что нет смысла воровать модель, поскольку она уже известна. Однако эту модель можно использо-

вать для выявления гиперпараметров обучения [18]. Доступ типа «серый ящик», в частности, относится к ситуации, когда известна архитектура целевой модели, что требуется для некоторых типов атак. Однако стандартное предположение для атак с кражей модели состоит в том, что существует только доступ типа «черный ящик», поэтому единственная раскрываемая информация – это выходные данные модели.

Некоторые из атак кражи модели не зависят от данных и не требуют ни данных вообще, ни каких-либо значимых данных. Однако существует большой перечень атак, для которых важно качество данных. Выделим следующие категории: исходные данные, данные проблемной области и данные непроблемной области. Исходные данные – это данные, которые использовались для обучения целевой модели. Данные проблемной области – это любые данные, значимые для задачи, которую решает целевая модель (например, изображения собак для классификатора кошек/собак), но не исходные данные. Данные непроблемной области – это данные, которые не связаны со спецификацией целевой модели (например, изображения автомобилей для классификатора кошек/собак). В то время как наличие исходных данных может быть полезным для некоторых атак, в реальном сценарии это может быть не так.

2. Действия злоумышленника. Введенное понятие запросов является основой взаимодействия между злоумышленником и целевой моделью. Категория атак, использующая только этот тип действия, называется «на основе запросов», так как запросы являются единственным источником информации. Указанное обстоятельство характеризует эти атаки как подходящие для настройки MLaaS.

Если у злоумышленника есть аппаратный или программный доступ к вычислительному ресурсу, на котором развернута модель, это открывает дополнительную возможность для реализации атаки «кража модели». В этих условиях нарушитель может использовать *побочный канал* утечки, выполняя так называемые *атаки по сторонним каналам*.

3. Ресурсы атакующего. Как правило, могут существовать некоторые ограничения API, влияющие на количество запросов, которые может выполнить злоумышленник. Из-за этого атаки кражи моделей, основанные на запросах, обычно рассматриваются совместно с так называемым бюджетом запросов – количеством запросов, необходимых для атаки. Важной задачей является поиск компромисса между производительностью атаки и требуемым бюджетом запросов.

Информация о возможностях злоумышленников позволяет классифицировать их на условно *слабых* и *сильных*. Например, нарушитель, обладающий знаниями об архитектуре целевой модели и исходных обучающих данных, сильнее нарушителя, не обладающего этими знаниями. Не всегда можно сказать, какие возможности приводят к более сильному нарушителю (меньше знаний и больше ресурсов против большего количества знаний и меньшего количества ресурсов). Однако такой подход позволяет ранжировать нарушителей внутри одного и того же аспекта (знания, возможности, ресурсы).

Каждая атака кражи модели направлена на копирование целевой модели или некоторых ее элементов. На верхнем уровне выделим две категории атак: первая направлена на кражу точных свойств модели, а вторая – на получение приблизительного поведения модели. Первая категория включает кражу обучающих гиперпараметров, архитектуры или изученных параметров.

В случае кражи «поведения модели» выделяют две цели: достижение того же уровня эффективности, что и у исходной модели, и обеспечение согласованности прогнозов с целевой моделью.

Отметим, что в зависимости от цели кражи эффективность проведенной атаки измеряется по-разному:

– эффективность атак кражи моделей, которые ориентированы на кражу «поведения модели», обычно измеряется одной или несколькими метриками: точностью, достоверностью

или переносимостью. Кроме того, можно рассчитать различные коэффициенты ошибок, но они обратны упомянутым выше метрикам;

– эффективность кражи точных свойств модели характеризует успешность действий нарушителя в контексте решения задачи, при которой извлеченные значения очень близки или равны соответствующим целевым значениям. Таким образом, наиболее распространенным способом измерения эффективности является вычисление абсолютной разницы между целевыми и украденными значениями.

Для измерения эффективности атаки обычно используются две метрики: количество запросов (*бюджет запроса*) и *время*, необходимое для проведения атаки. Однако в публикациях, посвященных атакам на основе решения уравнений, чаще всего применяется метрика, характеризующая *количество запросов на параметр*. Раскроем содержание каждой из этих метрик более детально.

1. Условным ресурсом, расходуемым нарушителем при проведении атаки, является *количество запросов* (бюджет запроса) и обычно оно рассчитывается только для атак на основе запросов. Более того, эта метрика в основном актуальна для атак с подменой обучения модели, поскольку для них количество необходимых запросов не является фиксированным и теоретически может быть бесконечным. Основным недостатком этой метрики является то, что ее можно сравнивать только с моделями одинакового размера, поскольку сам бюджет запроса не дает достаточно информации для объективного вывода.

2. *Время*, необходимое для проведения атаки, измеряется реже и, как правило, обозначает время подготовки к атаке. Например, если API предоставляет 1000 запросов в день бесплатно, а у злоумышленника нет соответствующего бюджета, но он хочет применить атаку, требующую 3000 запросов, три дня будут потрачены только на сбор данных. Другой пример – обучение метамодели для кражи архитектуры в работе [19]: авторы потратили 40 условных дней для обучения метамодели на базе GPU-вычислителя.

3. *Количество запросов на параметр* рассчитывается путем деления бюджета запроса атаки на количество изученных параметров в целевой модели. Эта метрика более объективна, чем бюджет запроса, так как включает в себя сложность целевой модели.

ТАКСОНОМИЯ АТАК КРАЖИ МОДЕЛИ

Как правило атаки можно разделить на две категории: кража *точных свойств модели* и хищение *приблизительного поведения модели* (рис. 2).



Рис. 2. Классификация атак кражи модели

Кражи *точных свойств модели* (*Extract model properties*) разделяются на атаки, реализуемые в отношении: заученных параметров (например, весовых коэффициентов нейронной сети), гиперпараметров обучения (например, параметра регуляризации, используемого во время обучения) и архитектуры (например, расположения узлов и слоев в нейронной сети). В отношении атак кражи *приблизительного поведения модели* целью может быть достижение того же уровня эффективности, что и у целевой модели, или попытка достичь согласованности прогноза с целевой моделью.

Детализируем разницу между перечисленными классами атак кражи модели, рассматривая классификацию по цели атак.

Гиперпараметры обучения. В этой категории атак злоумышленник пытается выявить гиперпараметр, отвечающий за процесс обучения. В работе [18] авторы предложили подход к решению уравнений для кражи гиперпараметра регуляризации на основе логистической регрессии, методом опорных векторов (SVM) и искусственными нейронными сетями (NN). В публикации [19] рассматривается обучение *метамодели*, позволяющей предсказывать некоторые гиперпараметры обучения, такие как размер пакета или алгоритм оптимизации.

Архитектура. Атака кражи архитектуры обычно применяется к нейронным сетям, поскольку другие модели в основном различаются только гиперпараметрами обучения и имеют фиксированную архитектуру. Здесь под архитектурой понимается набор гиперпараметров, определяющих структуру целевой модели. В частности, количество слоев, тип слоя и его характеристики, такие как размер ядра и т. д., являются частями архитектуры свёрточной нейронной сети (CNN).

В литературе были предложены два основных подхода к краже архитектуры. Первый – это вышеупомянутая атака метамодели [19], которая предсказывает архитектуру целевой модели с помощью запросов. В других работах [20–25] используется доступ к модели по побочному каналу.

Заученные параметры. Атака с кражей параметров направлена на извлечение параметров целевой модели, для которой известна структура (архитектура). Авторы работы [2] были первыми, кто предложил атаку извлечения модели для кражи весов бинарного классификатора путем нахождения выборок, расположенных на границе решения. Позже в статье [1] идея была расширена и введены атаки с решением уравнений, которые позволяют извлекать точные параметры (мультиклассовой) логистической регрессии и многослойного персептрона. Авторы публикации [12] представили атаку на решение уравнений также для регрессии опорных векторов с линейными или квадратичными ядрами.

Как правило, извлечение заученных параметров тесно связано с другими типами атак. Например, его можно применить после атаки кражи архитектуры, чтобы украсть целевую модель с неизвестным типом модели. Выполняя успешное извлечение параметров модели, нарушитель автоматически получает модель с идентичным поведением.

Атака «достижения того же уровня эффективности». В отличие от ранее упомянутых категорий, эта охватывает атаки, направленные на обеспечение *«приблизительного поведения модели»* и на получение копии целевой модели, которая достигает того же уровня эффективности, что следует из ее названия.

Учитывая целевую модель f , злоумышленник стремится создать модель \hat{f} , которая функционирует аналогично f в отношении исходных данных. В результате нарушитель может использовать \hat{f} для решения той же задачи, что и f , без каких-либо ограничений.

Чтобы получить украденную модель с аналогичными показателями эффективности, злоумышленник может использовать ту же архитектуру модели, что и целевая модель [1, 4, 13], тот же тип модели, но с другой структурой [11, 26], или использовать полностью другой класс моделей [5, 27].

Атака «непротиворечивость прогноза». Вторая категория атак, направленная на кражу *приблизительного поведения модели*, состоит из атак, которые создают модель \hat{f} , предска-

зываются выходные данные согласованно с моделью f . Непротиворечивость прогнозов означает, что для любой выборки x предсказание украденной модели должно совпадать с предсказанием целевой модели $f(x) = \hat{f}(x)$. Следовательно, даже если f неправильно классифицирует выборку из исходных данных, требуется, чтобы \hat{f} также неправильно классифицировал ее. В зависимости от набора исходных данных x , различают две подкатегории: согласованность с реальными данными и согласованность с созданными состязательными данными. Для случая с реальными данными получим модель, которая имеет такую же эффективность, как и целевая модель, и допускает те же ошибки, например, в исходных данных. В этом смысле f и \hat{f} более похожи, чем в предыдущей категории.

Непротиворечивость прогнозов на созданных злоумышленниками данных может быть целью атаки кражи модели, если она применяется для открытия целевой модели «черный ящик» для дальнейших атак в отношении модели «белый ящик». Для полностью извлеченных моделей, т. е. когда и архитектура, и изученные параметры эквивалентны исходной модели, могут быть применены все атаки «белого ящика». Однако даже если архитектура отличается, то потенциально может быть применена атака уклонения. Решающим аспектом для измерения возможности переноса атаки уклонения с украденной модели на целевую модель являются состязательные примеры [28]. В публикации [29] авторы показали, что враждебные примеры, созданные с использованием украденной модели «черный ящик», приводят к высокому уровню ошибочной классификации целевой модели. При краже модели для дальнейшей эксплуатации для атак уклонения точность украденной модели больше не имеет решающего значения. Такие атаки извлечения направлены на достижение аналогичного поведения на образцах, расположенных близко к границе решения, что более важно для создания состязательных примеров [3].

Другая классификация атак кражи модели основана на оценке их производительности. Авторы [17] классифицировали подмножество атак на нейронные сети на основе их точности и производительности. В публикации [30] указанная таксономия дополнена третьей метрикой – *возможностью передачи (переносимостью)*.

Точность. Точность показывает, насколько близки прогнозы модели по сравнению с реальными значениями. Показатель рассчитывается как для целевых, так и для украденных моделей, и ожидается, что результаты будут схожими. Однако даже одинаковая производительность не означает, что украденная модель идеально имитирует исходную – модели могут по-прежнему давать разные прогнозы для отдельных точек данных, а усредненная одинаковая точность может быть просто совпадением.

Поскольку эта метрика позволяет сравнивать эффективность целевой и украденной моделей, она используется для оценки приблизительных атак с целью достижения того же уровня эффективности, что и целевая модель.

Правильность. Правильность рассчитывается как точность целевой модели, с учетом того, что предсказание целевой модели является метками достоверности. Таким образом, эта метрика показывает, насколько хорошо украденная модель имитирует оригинал. Более того, метрика «правильность» не требует разметки данных, поскольку использует только метки целевой модели, которые можно наблюдать, запрашивая модель. Следовательно, ее можно вычислить на любых данных из любого распределения без потери актуальности.

Правильность показывает сходство между выходами целевой и украденной моделей. Благодаря этому, данную метрику можно использовать для оценки успешности атаки, направленной на создание модели, которая делает прогнозы в соответствии с целевой моделью.

Возможность передачи (переносимость). Переносимость показывает, сколько из состязательных примеров, сгенерированных для украденной модели \hat{f} , также являются таковыми для целевой модели f . Другими словами, пусть x – набор данных, $f(x) = \hat{f}(x) = y$, и x^* –

набор состязательных примеров для \hat{f} , таких что $\hat{f}(x) \neq \hat{f}(x^*)$. Тогда $f(x) \neq f(x^*)$ означает, что существует возможность передачи (переносимость) между украденной и целевой моделями. Чтобы количественно измерить переносимость, можно создать тестовый набор состязательных примеров, созданных для \hat{f} , и измерить, сколько из них неправильно классифицированы моделью f . Данная метрика может использоваться, когда злоумышленник хочет атаковать модель «черный ящик» с помощью атаки уклонения. В таком случае кража модели является промежуточным шагом, который применяется для наблюдения за моделью «белый ящик» вместо исходной – «черный ящик».

КРАЖА МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЗАПРОСОВ

Исследование названных атак осуществляется посредством их группировки по способу кражи с дальнейшим детальным разбором. В табл. 2 представлена таксономия атак на основе запросов с использованием описанной ранее классификации.

Таблица 2

Таксономия атак на основе запросов

Цель атаки	Метод кражи	Типы данных	Целевая модель	Источники
Гиперпараметры обучения	Решение уравнений	Таблицы	RR, LR, SVM, NN	[18]
Изученные параметры	Поиск свидетелей		LBM, SVM–poly	[1, 2, 12]
	Решение уравнений		LR, MLR, MLP, SVR–lin/quad	[1, 31, 12]
	Поиск пути		DT, RT	[1]
Архитектура	Восстановление	Изображения	ReLU-DNN	[17, 32–34]
	Метамодель		DNN, CNN	[19]
	Восстановление		ReLU-DNN	[33]
Уровень эффективности	Замещающая модель	Изображения, Таблицы, Тексты, Последовательности, Графы	LBM, MLogReg, DT, RF, SVM, NN, CNN, BERT, chip, GCN	[11, 35, 4, 14, 8, 13, 36, 15, 27, 32, 37–41]
Согласованность прогноза	Замещающая модель	Изображения, Таблицы, Тексты, Графика, Среда обучения с подкреплением	(M)LogReg, kNN, DT, SVM, SVR, NB, NN, CNN, RNN, BERT, DRL agent, GCN	[1, 3, 5, 35, 42, 16, 43, 9, 26, 6, 12, 15, 38, 40, 44]

Обращает на себя внимание, что цель атаки, заключающаяся в краже изученных параметров, в большинстве случаев также неявно обеспечивает кражу поведения.

Цель атаки определяется как уровень эффективности, если эффективность атаки оценивается с помощью точности. Если эффективность оценивается с использованием точности или переносимости, цель атаки определяется как непротиворечивость предсказания. В некоторых проанализированных работах измерялись как точность, так и достоверность (или точность и переносимость).

Рассмотрим ряд наиболее значимых атак, характеризующих основные подходы, реализуемые нарушителями информационной безопасности.

1. Атака «с поиском свидетелей» для линейных бинарных моделей. Самая ранняя атака кражи модели, которая направлена на кражу параметров линейных бинарных моделей

(LBM), изложена в работе [2]. Рассматривая одну положительную выборку и одну отрицательную выборку, авторы меняют одно за другим значения признаков положительной выборки, пока не найдут *подпись свидетелей* – пару образцов, которые идентичны, за исключением одного значения признака f , и относятся к разным классам. Соответствующий вес w_f устанавливается до 1 или -1 в зависимости от значения знака *свидетелей*, а затем используется линейный поиск для определения относительного веса других функций. Поскольку основным этапом атаки является поиск свидетелей, то она называется «атака с поиском свидетелей» (WFA).

Для выполнения этой атаки злоумышленнику требуется архитектура целевой модели и две выборки данных (одна положительная и одна отрицательная). Поскольку атака позволяет осуществлять точное извлечение весов, она создает модель с той же производительностью, что и целевая. Главный ее недостаток – неэффективность атаки: для кражи модели требуется не менее 11 запросов на параметр (вес), что может быть проблематично для больших моделей.

2. Атаки на основе решения уравнений. Класс атак, основанных на решении уравнений (ESA), объединяет те из них, которые основаны на составлении системы уравнений и ее решении. Решение соответствует значениям, которые противник хочет извлечь. Таким образом, этот тип атаки возникает, когда целью извлечения являются точные значения целевой модели, а именно либо изученные параметры, либо обучающие гиперпараметры.

ESA были впервые использованы для кражи изученных параметров логистической регрессии, многоклассовой логистической регрессии и многоуровневого персептрона [1]. Авторы метода отправили образцы данных x_1, x_2, \dots, x_n к целевой модели f_w с изученными параметрами w и использовали выходные результаты y_1, y_2, \dots, y_n для построения системы уравнений:

$$\begin{cases} f_w(x_1) = y_1 \\ f_w(x_2) = y_2 \\ \vdots \\ f_w(x_n) = y_n \end{cases} \quad (1)$$

Решение системы (1) выявляет значения параметров w .

ESA более эффективна, чем атака с поиском свидетелей, требующая от 1 до 4 запросов на параметр в зависимости от типа целевой модели. Подобно атаке по поиску свидетелей, она достигает идеальных показателей извлечения. Атака требует, чтобы архитектура целевой модели была известна. Кроме того, злоумышленнику нужны образцы данных для запроса модели. Однако, поскольку запросы используются только для построения системы уравнений, злоумышленник может использовать любые выборки, не обязательно настоящие или осмысленные.

В работе [12] показано, что ESA можно применять к машине регрессии опорных векторов (SVR) с линейным или квадратичным ядром. Позднее ESA использовали для кражи MLP при дифференциальной защите конфиденциальности [31], которая добавляет шум к выходным данным, лежащим близко к границе решения [45]. При этом авторы продублировали запросы и, наблюдая разные результаты для одних и тех же входных данных, создали систему уравнений, решение которой аппроксимирует результаты исходной модели.

В публикации [18] авторы применили ESA для кражи гиперпараметра регуляризации, используемого в целевой функции, для баланса между функцией потерь и членом регуляризации. Изученные параметры целевой модели должны минимизировать значение целевой функции. Следовательно, градиент целевой функции, рассчитанный по параметрам модели, должен быть (близок) к 0. Исходя из этого, противник сначала вычисляет градиенты целевой

функции и устанавливает их равными 0. Полученную переопределенную систему можно решить с использованием линейного метода наименьших квадратов. Для выполнения этой атаки злоумышленнику необходим доступ к целевой модели через «белый ящик». Таким образом, для извлечения обучающих гиперпараметров с доступом только к «черному ящику» необходимо сначала выполнить атаку по извлечению архитектуры и изученных параметров.

3. Атака по поиску пути (на основе поиска пути) (PFA) была представлена в работе [1] для кражи деревьев решений (DT) и деревьев регрессии (RT). Для этой атаки требуются прогнозные метки и идентификатор листа дерева, который выводит метку. Нарушитель отправляет в целевое дерево t входные данные x и собирает выходные результаты $t(x)$ и идентификатор листа id . Затем, варьируя значения признаков, злоумышленник раскрывает условия, которым должна удовлетворять входная выборка, чтобы достичь листа id . Идентификатор листа требуется, чтобы иметь возможность различать разные конечные узлы, которые приводят к возвращению одной и той же метки, и, таким образом, неразличимы только по этой информации. Помимо предсказаний, эта атака также воссоздает условия, которым должна удовлетворять выборка, чтобы быть классифицированной определенным листом. Если все листы имеют уникальные идентификаторы, украденное дерево имеет ту же функциональность, что и исходное. Относительно задач регрессии и RT соответственно авторы добились идеальной точности, поскольку все листья имели уникальные идентификаторы. В то же время для задач классификации это было не так, и показатель производительности был ниже. По сравнению с вышеупомянутыми атаками PFA характеризуется наименьшей эффективностью, требуя 66–317 запросов на параметр в зависимости от целевого дерева. Существуют исследования по оптимизации указанной атаки, получившие название *незавершенные запросы*. В результате количество запросов на параметр уменьшилось до 44–91.

4. Восстанавливающая атака (RA) предназначена для раскрытия весов или даже архитектуры (D)NN с (по крайней мере, частично) линейными функциями активации. Подавляющее большинство публикаций посвящено (D)NN с функциями активации ReLU (ReLU-(D)NN). Авторы [32] описали восстанавливающую атаку для кражи параметров ReLU-(D)NN с двумя слоями. Идея атаки состоит в том, чтобы веса сети ReLU рассматривать как разделяющие гиперплоскости, найдя входные точки, лежащие на этих гиперплоскостях, их можно восстановить до их знаков. Эти точки называются также критическими [17, 34] и граничными [33] точками. Наконец, можно восстановить знак весов, запросив образцы и решив систему уравнений.

Описанная атака была реализована, а в публикации [17] показано, что украденная модель имеет очень высокую точность и идеальную переносимость.

Обращает на себя внимание модификация рассматриваемой атаки, в рамках которой реализована кража модели произвольной глубины и раскрывается ее архитектура [33].

Атаки RA наименее эффективны для небольших моделей. Для кражи модели с 210 параметрами требуется примерно 312 запросов на один параметр [34]. Для моделей с десятками тысяч параметров этот показатель снижается до 12, но атаки по-прежнему остаются одними из самых неэффективных. В то же время успешное проведение RA позволяет получить точную копию целевой модели, которая полностью воспроизводит поведение оригинала.

ОБУЧЕНИЕ ЗАМЕЩАЮЩЕЙ МОДЕЛИ

Этот подход широко используется в последние годы множеством авторов. Идея состоит в том, чтобы обучить замещающую модель, используя данные, помеченные целевой моделью, т. е. используя целевую модель в качестве оракула для меток.

Замещающая модель может иметь ту же архитектуру, что и целевая модель, но это не обязательно и обычно не так. Главным условием является скорее синтаксическое соответствие

между моделями, т. е. замещающая модель должна принимать тот же формат входных данных и возвращать выходные данные в том же представлении, что и целевая модель.

Первая атака замещающей модели, помимо других представленных атак, была представлена в публикации [1]. Авторы обучили замещающую модель для LBM, логистической регрессии (LogReg), мультиклассовой логистической регрессии (MultiLogReg), MLP и SVM с ядром RBF. Существует версия атаки [12], в которой тот же подход использовался для кражи SVM и SVR с линейным и квадратичным ядром.

Альтернативный вариант атаки на основе замещающей модели опубликован в [3]. Авторы предложили две заменяющие модели: более сложную глубокую нейронную сеть (DNN) и более простую логистическую регрессию (LogReg) для кражи DNN, например: SVM, деревья решений и метод k -ближайших соседей. Основная цель состояла в том, чтобы обучить модель с границей решения, аналогичной границе решения исходной модели. Вариант использования, рассмотренный авторами, заключался в том, что такое приближение к исходной модели позволяет создавать состязательные примеры, которые с высокой вероятностью обманут целевую модель и, таким образом, могут использоваться для дальнейших состязательных атак.

Архитектура замещающей модели. Для реализации атаки с подменой обучающей модели, нарушитель должен сначала выбрать архитектуру модели. Обычно это решение принимается на основе типа входных данных модели. Например, если модель является классификатором изображений, то хорошим выбором архитектуры является CNN. Более того, недавние работы показали, что для большей успешности кражи модель злоумышленника должна быть не менее глубокой (сложной), чем целевая модель [3, 5, 11, 35, 39].

Замена обучающих данных модели. Другим важным аспектом атаки с заменой обучающей модели является набор данных, используемый для обучения. Этот набор данных часто не имеет маркировки, поэтому сначала запрашивается целевая модель для наблюдения за соответствующими выходными данными. Вместе с этими метками указанный набор данных подается на замещающую модель на этапе обучения.

Мы можем выделить различные сценарии, касающиеся предметной области проблемы или данных. В то время как в отношении кражи модели отсутствует четкое определение концепции предметной области, эта концепция также подробно исследуется в контексте трансферного обучения [46]. Область характеризуется как состоящая из двух компонентов [46]: пространства признаков и предельного распределения вероятностей. Если две области разные, то они могут различаться пространством признаков или предельным распределением вероятностей. Эти компоненты, используются для того, чтобы охарактеризовать различные параметры кражи модели.

Данные проблемной области (PD) [3] – это данные, полученные на основе распределения, которое очень похоже на секретный набор данных целевой модели. Например, использование изображений человеческих лиц для кражи модели, обученной распознаванию лиц на подобных изображениях. Обращает на себя внимание ситуация, когда некоторые данные предметной области являются «исходными» данными, т. е. некоторыми данными, которые фактически использовались для обучения исходной модели. Однако в большинстве случаев эти данные относятся только к тому же домену и, например, получены из «общедоступных» хранилищ данных. Тогда это будут данные, в которых пространство признаков одинаково, а предельное распределение вероятностей может быть очень похожим, но не идентичным. В зависимости от домена получение таких данных может быть сложным и дорогим.

Данные естественного непроблемного домена (NNPD) [4] представляют собой выборку данных того же типа, что и входные данные целевой модели. Например, изображения для моделей распознавания изображений и текстовые данные для текстовых моделей. Эти данные имеют тот же синтаксический тип и, возможно, то же самое пространство признаков, но совсем другое предельное распределение вероятностей.

В качестве данных *искусственного неproblemного домена* (SNPD) используются данные, полученные из стандартных распределений вероятностей (таких как равномерное распределение) [1]. Таким образом, подобные данные обычно имеют совсем другое предельное распределение вероятностей, не моделируют распределения проблемной области и часто менее эффективны для атаки.

С точки зрения нарушителя, распределение данных (или происхождение) сильно коррелирует со знаниями нарушителя. Различают «слабое» знание и «сильное» знание. Самое сильное знание соответствует ситуации, когда противник имеет доступ к актуальному набору данных целевой модели. Более слабое знание, которое обычно соответствует сценариям реального мира, означает наличие доступа к некоторым данным, входящим в проблемную область, но не к исходным обучающим данным.

Обычно относительно легко догадаться о проблемной области, например, по описанию службы или API. Действительно, если злоумышленник запрашивает классификатор цифр, модель, скорее всего, обучалась на изображениях цифр.

Знание самого слабого противника означает, что противник имеет доступ только к *случайным данным без знания проблемной области*. К классу таких атак относится атака под названием *Soruceat*, которая успешно крадет CNN, используя данные NNPD [4]. В статье [11] также использовали данные NNPD для обучения замещающей модели («подделки»). Показано, что запрос данных, поступающих из другого распределения, отличного от исходных обучающих данных, приводит к хорошо работающей замещающей модели.

Количество запросов. Другим важным аспектом является количество данных, отправляемых в модель «черный ящик» для маркировки (т. е. количество запросов), поскольку это один из наиболее важных показателей с точки зрения эффективности атаки, а также потенциальный способ для защитника обнаруживать атаки. Самое сильное предположение в этом случае означает, что у злоумышленника нет ограничений на количество запросов. В более слабых настройках злоумышленник имеет ограниченное количество запросов и, следовательно, применяет различные методы для уменьшения количества запросов. Существует два основных способа оптимизации процесса запросов: сбор самых информативных образцов или применение технологии увеличения обучающих данных (аугментация) в случае небольшого набора запрашиваемых данных.

Для атаки «переобучения» предложено три стратегии запросов: однородные запросы (без оптимизации), линейный поиск (выборки, лежащие близко к границе решения) и адаптивное переобучение (основанное на активном обучении).

Активное обучение – один из наиболее широко исследованных методов оптимизации процесса запросов. Существуют два метода активного обучения: метод наименьшей достоверности и метод на основе маржи. В работе [10] исследованы такие стратегии активного обучения, как неопределенность, проблема k -центра вершины и активное обучение на основе DeepFool (DFAL) для определения наиболее значимых образцов и их использования для атаки *Activethief*.

Еще один способ оптимизировать запросы – генерировать образцы, которые помогают злоумышленнику обучать модель с большей производительностью. Обычно эта проблема возникает, когда злоумышленник не имеет доступа к исходным обучающим данным или хочет украсть (узнать) границу решения модели. Ряд исследователей использовали расширение данных на основе якобиана (JBDA) для создания новых выборок, которые лежат близко к границе решения [3].

В публикации [8] описан подход, использующий метод генерации составных данных. Авторы создали новый набор данных из существующего путем наложения двух случайно выбранных изображений и использовали его для обучения модели-заменителя. Авторы показали, что замещающая модель, обученная воспроизведению наложенных изображений, даже когда из модели доступны только предсказанные метки, работает лучше, чем модель, обученная на обычных данных с показателями достоверности, т. е. дает более подробный вывод.

Одним из наиболее широко используемых подходов к расширению данных является использование генеративно-сопоставительных сетей (GAN). В статье [15] предложена атака «ES Attack». Два ключевых шага атаки: первый – «E» – оценка параметров замещающей модели; второй – «S» – синтез данных. Авторы представили два метода создания синтетических образцов: первый использует вспомогательный классификатор GAN (ACGAN) для генерации данных, а второй работает непосредственно во входном пространстве.

Оптимизация количества запросов с помощью увеличения данных на основе GAN приводится в работе [6]. Сначала авторы запросили целевую модель с небольшим количеством выборок и использовали полученный таким образом набор данных для обучения GAN, который использовался при получении обучающих данных для обучения замещающей модели.

Атака кражи модели с использованием оценки градиента нулевого порядка (MAZE) изложена в публикации [36]. Этот подход не требует никаких данных, а использует генеративную модель, которая работает аналогично GAN, но учится генерировать образцы, в которых модели злоумышленника и цели расходятся больше всего. Эта модель требует обратного распространения через прогнозы целевой модели, но, поскольку целевая модель доступна посредством взаимодействия с «черным ящиком», авторы используют оценку градиента нулевого порядка. Они также рассмотрели случай, когда нарушитель имеет доступ к небольшому подмножеству исходных тренировочных данных.

В этих условиях исследователи обучили GAN Вассерштейна генерировать синтетические образцы. Эта атака работала лучше и требовала значительно меньше запросов, чем первоначальный вариант.

Помимо оптимизации запросов, было предложено несколько других стратегий улучшения атак. Так, в частности, предложено использовать адаптивную скорость обучения, управляемую градиентом (GDLR), чтобы сделать процесс обучения замещающей модели более эффективным [7].

АТАКИ ОБУЧЕНИЯ ЗАМЕЩАЮЩЕЙ МОДЕЛИ ПРОТИВ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ТИПОВ МОДЕЛЕЙ И МОДЕЛЕЙ, СПЕЦИФИЧНЫХ ДЛЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Атаки с замещающими моделями могут широко использоваться для различных моделей и предметных областей.

Что касается рекуррентных нейронных сетей, в работе [3] исследованы атаки кражи моделей в отношении модели на основе двунаправленной презентации кодировщика для трансформеров (BERT) [47], обычно используемой при обработке естественного языка (NLP). В статье [39] исследованы атаки на LSTM как для задач классификации, так и для задач регрессии, авторы обучили как LSTM, так и RNN с меньшей сложностью в качестве замещающей модели и показали, что замещающая LSTM работает лучше, чем RNN.

Проблематика исследования применимости атаки извлечения модели в отношении глубокого обучения с подкреплением рассмотрена в публикации [42]. Исследователи использовали технику под названием *Deep Q-Learning from Demonstrations* для разработки двух атак, которые изучают сопоставительную стратегию – имитацию целевой стратегии. Они также изучили возможность переноса между исходной и имитированной стратегиями и обсудили потенциальные методы смягчения последствий.

В нескольких работах исследуются атаки кражи моделей на графовые нейронные сети (GNN). Поскольку графы представляют собой набор узлов и связей между ними, то обычно имеется больше степеней свободы и использование случайных данных в качестве данных злоумышленника менее эффективно.

ДеФацио (DeFazio) с соавторами впервые представил задачу извлечения модели GNN [44]. Была рассмотрена проблема классификации узлов и предложена атака, которая позво-

ляет украсть двухслойную GNN, зная подмножество исходных обучающих данных и имея доступ к подграфу с двумя переходами исходного графа. В рамках публикации [40] также рассмотрена кража GNN. Однако авторы исследовали разные варианты априорных знаний злоумышленника: нарушитель может знать атрибуты узла, структуру сети и/или иметь доступ к теневым (вспомогательным) данным.

В дальнейшем была предложена новая атака на модель «черный ящик». Авторы представили новую архитектуру под названием *Deep Neural Tree*, являющуюся комбинацией нейронной сети и дерева решений. Эта модель может научиться различать разные задачи модели «черный ящик» и обеспечивать определенный уровень объяснимости, благодаря древовидной архитектуре. Авторы показали, как эта атака может быть применена для кражи функциональности микрочипа [27].

АТАКИ ОБУЧЕНИЯ МЕТАМОДЕЛИ

Атака метамодели (ММА) – первая и единственная атака на основе запросов, которая может раскрыть информацию об архитектуре целевой модели. Авторы работы [19] обучили метамодель, которая для данной модели предсказывает подробности о структуре целевой модели, настройке обучения и количестве обучающих данных. В качестве набора данных для метамодели они использовали набор CNN-кандидатов, различающихся параметрами архитектуры (типом функций активации, количеством сверточных и полносвязных слоев и т. д.), параметры оптимизации (тип алгоритма, размер пакета) и параметры данных (разделение данных, размер данных). Затем метамодель была обучена для представления корреляции между гиперпараметрами модели и ее производительностью на конкретных тестовых образцах. Эти образцы впоследствии используются для выявления гиперпараметров целевой модели. Одной из особенностей атаки является то, что для успешной кражи гиперпараметра он должен быть значимым для целевой модели, а его значение должно присутствовать в обучающей выборке. Например, чтобы украсть количество сверточных слоев, нарушитель должен быть уверен, что целевая модель действительно является сверточной нейронной сетью и что в обучающей выборке метамодели есть модель с таким же количеством сверточных слоев.

Атака требует значительных вычислительных мощностей и временных ресурсов. Например, для кражи гиперпараметров в классификаторах MNIST авторы создают 10 000 CNN-кандидатов, что заняло 40 дней обучения на графическом процессоре. В среднем атака предсказала правильное значение гиперпараметра в 80,1% случаев, тогда как средний шанс угадать составляет 34,9%.

Поскольку атака метамодели крадет гиперпараметры модели, нарушителю требуется провести дополнительную атаку кражи параметров, чтобы получить функционально эквивалентную модель. По той же причине эту атаку нельзя сравнивать с другими атаками на основе запросов по эффективности и результативности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог проведенному анализу атак, можно привести руководство [30], которое предлагает наилучшую атаку на основе целей и возможностей нарушителя. Схема последовательности действий изображена на рис. 3.

В зависимости от цели нарушителя выбирается подход к атаке: получить точную модель (для архитектуры, обучающего гиперпараметра или кражи изученного параметра) или приблизительные значения модели (для уровня эффективности или кражи согласованности предсказания).

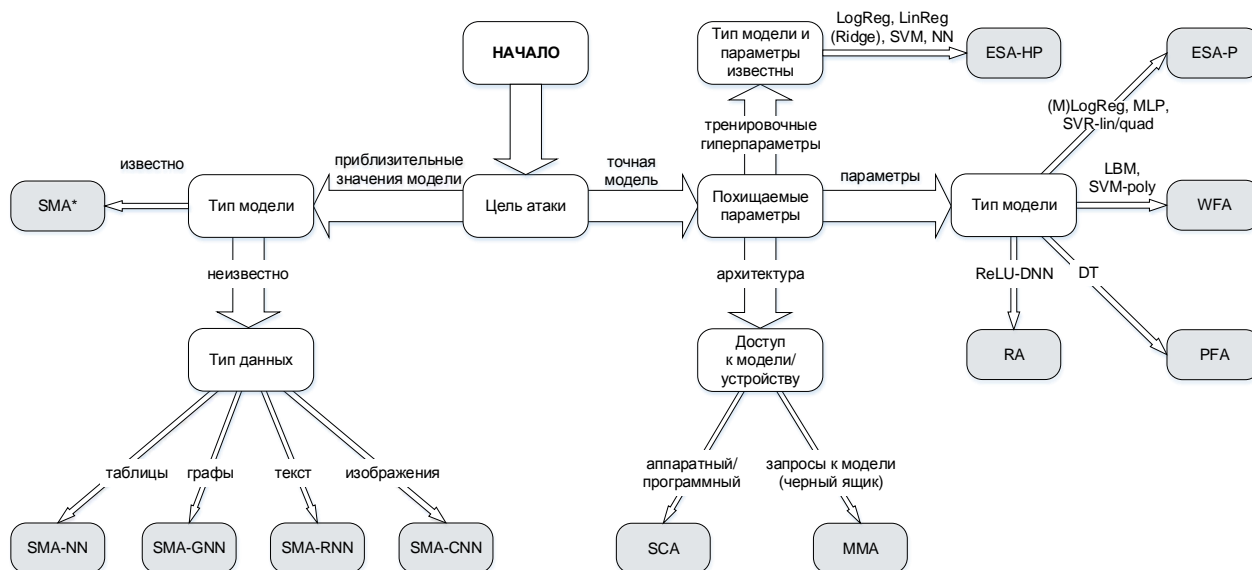


Рис. 3. Полная таксономия атак кражи моделей в виде «руководства для нарушителя»

Приблизительное извлечение не обязательно требует информации о типе целевой модели, поскольку общие подходы, не зависящие от модели, обозначенные на рис. 3 как SMA*, доступны. Наличие более подробной информации о предметной области или типе данных может дать представление о том, какой конкретный тип модели часто используется. Затем применяется метод, специально разработанный для кражи, например, рекуррентных нейронных сетей (SMA-RNN).

В группе атак с точным извлечением для кражи обучающих гиперпараметров требуется знание типа модели и изученных параметров. Имея эту информацию, можно проводить атаки на определенные типы моделей, такие как логистическая регрессия или SVM. Точно так же для кражи параметров модели были предложены атаки, специализирующиеся на определенных типах моделей, например, атаки с поиском свидетелей (WFA) нацелены на линейные бинарные типы моделей, а атаки с поиском пути могут использоваться для кражи деревьев решений или регрессии.

Кража архитектуры в основном применяется к нейронным сетям, где интерес представляют гиперпараметры, определяющие слои, нейроны, функции активации и т. д. Кража архитектуры нацелена на два семейства атак. Если злоумышленник может формировать и направлять запросы к модели («черный ящик»), то можно использовать атаку метамодели, которая строится на базе знаний существующих архитектур. Такая база знаний должна охватывать множество различных архитектур, поэтому ее получение представляет собой сложную и дорогостоящую задачу. Если такой подход неосуществим, то единственной альтернативой остается доступ по побочному каналу. Отметим, что остается возможность использования нескольких типов перечисленных атак (как аппаратных, так и программных).

Список используемых источников

1. Stealing Machine Learning Models via Prediction APIs / F. Tramir [et al.] // USENIX Security Symposium. – Austin: USENIX Association, 2016. – P. 601–618.
2. Lowd D., Meek C. Adversarial Learning // ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery in Data Mining, KDD. – Chicago [Illinois, USA] : ACM Press. event-place, 2005. – P. 641–647.

3. Practical Black-Box Attacks against Machine Learning / N. Papernot [et al.] // ACM Asia Conference on Computer and Communications Security. – Abu Dhabi [United Arab Emirates] : ACM, 2017. – P. 506–519.
4. Copycat CNN: Stealing Knowledge by Persuading Confession with Random Non-Labeled Data / J. R. Correia-Silva [et al.] // International Joint Conference on Neural Networks. – Rio de Janeiro: IEEE, 2018. – P. 1–8.
5. Shi Y., Sagduyu Y., Grushin A. How to steal a machine learning classifier with deep learning // IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security. – Waltham [MA, USA], 2017. – P. 1–5.
6. Generative Adversarial Networks for Black-Box API Attacks with Limited Training Data / Y. Shi [et al.] // IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. – Louisville [KY, USA], 2018. – P. 453–458.
7. Joshi N., Tammana R. GDALR: An Efficient Model Duplication Attack on Black Box Machine Learning Models // IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking, ICSCAN. – Pondicherry [India], 2019. – P. 1–6.
8. Mosafi I., David E.O., Netanyahu N.S. Stealing Knowledge from Protected Deep Neural Networks Using Composite Unlabeled Data // International Joint Conference on Neural Networks. – Budapest [Hungary], 2019. – P. 1–8.
9. Pengcheng L., Yi J., Zhang L. Query-Efficient Black-Box Attack by Active Learning // IEEE International Conference on Data Mining. – Singapore, 2018. – P. 1200–1205.
10. ActiveThief: Model Extraction Using Active Learning and Unannotated Public Data / S. Pal [et al.] // AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 34. – P. 865–872.
11. Orekondy T., Schiele B., Fritz M. Knockoff Nets: Stealing Functionality of Black-Box Models // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Long Beach [CA, USA], 2019. – P. 4949–4958.
12. Reith R. N., Schneider T., Tkachenko O. Efficiently Stealing Your Machine Learning Models // ACM Workshop on Privacy in the Electronic Society, WPES. – London [United Kingdom]: ACM Press, 2019. – P. 198–210.
13. Exploring Connections Between Active Learning and Model Extraction / V. Chandrasekaran [et al.] // 29th USENIX Security Symposium. – 2020. – P. 1309–1326.
14. Extraction of Complex DNN Models: Real Threat or Boogeyman? / B. Gul Atli [et al.] // Engineering Dependable and Secure Machine Learning Systems. – Cham : Springer International Publishing. – 2020. – Vol. 1272. – P. 42–57.
15. ES Attack: Model Stealing Against Deep Neural Networks Without Data Hurdles / X. Yuan [et al.] // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. – 2022. – P. 1–13.
16. PRADA: Protecting Against DNN Model Stealing Attacks / M. Juuti [et al.] // IEEE European Symposium on Security and Privacy. – Stockholm [Sweden], 2019. – P. 512–527.
17. High Accuracy and High Fidelity Extraction of Neural Networks / M. Jagielski [et al.] // USENIX Security Symposium. – USENIX Association, 2020. – P. 1345–1362.
18. Wang B., Gong N.Z. Stealing Hyperparameters in Machine Learning // IEEE Symposium on Security and Privacy. – San Francisco [CA], 2018. – P. 36–52.
19. Towards Reverse-Engineering Black-Box Neural Networks / S.E. Oh [et al.] // International Conference on Learning Representations. – Vancouver [B.C., Canada], 2018. – URL: <https://arxiv.org/abs/1711.01768> (дата обращения: 06.06.2023).
20. Hua W., Zhang Z., Suh G.E. Reverse engineering convolutional neural networks through side-channel information leaks // Annual Design Automation Conference. – San Francisco [California], 2018. – P. 1–6.
21. DeepSniffer: A DNN Model Extraction Framework Based on Learning Architectural Hints / X. Hu [et al.] // International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. – Lausanne [Switzerland], 2020. – P. 385–399.

22. Yan M., Fletcher C.W., Torrellas J. Cache Telepathy: Leveraging Shared Resource Attacks to Learn DNN Architectures // USENIX Security Symposium. – USENIX Association, 2020. – P. 2003–2020.
23. Security Analysis of Deep Neural Networks Operating in the Presence of Cache Side-Channel Attacks / S. Hong [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1810.03487> (дата обращения: 06.06.2023).
24. Open DNN Box by Power Side-Channel Attack / Y. Xiang [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2020. – Vol. 67(11). – P. 2717–2721.
25. Hermes Attack: Steal DNN Models with Lossless Inference Accuracy / Y. Zhu [et al.] // USENIX Security Symposium. – USENIX Association, 2021. – P. 1973–1988.
26. Active Deep Learning Attacks under Strict Rate Limitations for Online API Calls / Y. Shi [et al.] // IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security. – Woburn [MA], 2018. – P. 1–6.
27. Teitelman D., Naeh I., Mannor S. Stealing Black-Box Functionality Using The Deep Neural Tree Architecture. – URL: <https://arxiv.org/abs/2002.09864>. (дата обращения: 06.06.2023).
28. Intriguing properties of neural networks / C. Szegedy [et al.] // International Conference on Learning Representations. – Banff [AB, Canada], 2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1312.6199>. (дата обращения: 06.06.2023).
29. Papernot N., McDaniel P., Goodfellow I. Transferability in Machine Learning: from Phenomena to Black-Box Attacks using Adversarial Samples. – URL: <https://arxiv.org/abs/1605.07277> (дата обращения: 06.06.2023).
30. Oliynyk D., Mayer R., Rauber A. I Know What You Trained Last Summer: A Survey on Stealing Machine Learning Models and Defences. – URL: <https://arxiv.org/abs/2206.08451v1> (дата обращения: 16.06.2023).
31. Monitoring-based Differential Privacy Mechanism Against Query Flooding-based Model Extraction Attack / H. Yan [et al.] // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. – 2021. – P. 1–1.
32. Model Reconstruction from Model Explanations / S. Milli [et al.] // Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. – Atlanta [GA USA] : ACM, 2019. – P. 1–9.
33. Rolnick D., Kording K. Reverse-engineering deep ReLU networks // Hal Daumq III and Aarti Singh, editors, International Conference on Machine Learning. – 2020. – Vol. 119. – P. 8178–8187.
34. Carlini N., Jagielski M., Mironov I. Cryptanalytic Extraction of Neural Network Models // Advances in Cryptology – CRYPTO 2020. Springer International Publishing. Series Title: Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – Vol. 12172. – P. 189–218.
35. Thieves of Sesame Street: Model Extraction on BERT-based APIs / K. Krishna [et al.]. – <https://arxiv.org/abs/1910.12366v3> (дата обращения: 09.06.2023).
36. Kariyappa S., Prakash A., Qureshi M.K. MAZE: Data-Free Model Stealing Attack Using Zeroth-Order Gradient Estimation // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Nashville [TN, USA], 2021. – P. 13809–13818.
37. Roberts N., Prabhu V.U., McAteer M. Model Weight Theft With Just Noise Inputs: The Curious Case of the Petulant Attacker. – URL: <https://arxiv.org/abs/1912.08987> (дата обращения: 08.06.2023).
38. Anvodji U., Bolot A., Gambis S. Model extraction from counterfactual explanations. – URL: <https://arxiv.org/abs/2009.01884> (дата обращения: 09.06.2023).
39. Takemura T., Yanai N., Fujiwara T. Model Extraction Attacks against Recurrent Neural Networks. – URL: <https://arxiv.org/abs/2002.00123>. (дата обращения: 10.06.2023).
40. Model Extraction Attacks on Graph Neural Networks: Taxonomy and Realisation / B. Wu [et al.] // ACM Asia Conference on Computer and Communications Security. – Nagasaki [Japan], 2022. – P. 337–350.

41. Stealing Links from Graph Neural Networks / X. He [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2005.02131> (дата обращения: 09.06.2023).
42. Behzadan V., Hsu W. Adversarial Exploitation of Policy Imitation. – URL: <https://arxiv.org/abs/1906.01121> (дата обращения: 15.06.2023).
43. A framework for the extraction of Deep Neural Networks by leveraging public data / S. Pal [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1905.09165> (дата обращения: 16.06.2023).
44. DeFazio D., Ramesh A. Adversarial Model Extraction on Graph Neural Networks. – URL: <https://arxiv.org/abs/1912.07721> (дата обращения: 14.06.2023).
45. A Boundary Differentially Private Layer Against Machine Learning Model Extraction Attacks / H. Zheng [et al.] // European Symposium on Research in Computer Security. – Cham : Springer International Publishing, 2019. – P. 66–83.
46. Pan S.J., Yang Q. A Survey on Transfer Learning // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2010. – Vol. 22(10). – P. 1345–1359.
47. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1810.04805> (дата обращения: 05.06.2023).

Д. Р. Абсалямов,
доктор технических наук, доцент;
Р. А. Мосягин,
кандидат политических наук;
Р. Р. Хальметов;
А. Н. Шиян

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Рассмотрены особенности моделирования повторного использования теплоты выхлопных газов дизельных двигателей автономных источников электроснабжения. Проведен анализ ряда моделей подсистем дизеля, участвующих в повторном преобразовании и утилизации теплоты выхлопных газов. Результаты численного моделирования были использованы при проектировании системы внешней утилизации для отопления аппаратного отсека и служебных помещений командного пункта ОВИ с 12ЧН18/20. При этом конструкция утилизационного теплообменника была оптимизирована по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению, и проверена его работоспособность в лабораторных условиях на стационарном двигателе. Разработанные математическая модель и метод численного моделирования позволяют в описанном диапазоне параметров с достаточной степенью точности рассчитывать теплоотдачу и сопротивление охлаждаемого участка системы выпуска двигателя и определять требуемую утилизационную поверхность нагрева теплообменника

Ключевые слова: математическое моделирование, утилизация теплоты, выхлопные газы, дизельные двигатели, автономные источники электроснабжения, объекты военной инфраструктуры.

ВВЕДЕНИЕ

Применение на энергосиловых установках систем внешней утилизации теплоты выхлопных газов дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) сегодня рассматривается как один из основных путей снижения удельного расхода топлива и уменьшения загрязнения окружающей среды токсичными компонентами [1, 5]. Однако промышленное использование отбросной теплоты отработавших газов (ОГ), с которой, как известно, теряется от 30 до 40% энергии сжигаемого топлива, существенно сдерживается из-за отсутствия в стране готового к эксплуатации утилизационного оборудования, при этом научные основы, необходимые для проектирования высокоэффективных систем внешней утилизации проработаны не в полной мере [2, 3].

Выпуск ОГ из полостей камер сгорания сначала происходит при значительном перепаде давлений и скорости, равной 500–700 м/с [2, 3]. В дальнейшем давление ОГ падает, скорость их истечения становится ниже критической и составляет 200–250 м/с, при этом температура отработавших выхлопных газов в зоне, например выхлопного клапана, достигает 900–1100 К у карбюраторных двигателей и 700–900 К у дизелей [4]. Одновременно при работе поршневых ДВС выделяются токсичные вещества, основные из которых – это оксиды азота NO_x , окись углерода CO , углеводороды C_mH_n и др.

Процессы утилизации связаны прежде всего с местным интенсивным охлаждением газового потока и могут быть практически реализованы с помощью специального теплообменника, установленного в системе выпуска двигателя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ В ВЫПУСКНОМ ТРАКТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки с датчиками контрольно-измерительных приборов, установленных в модели утилизационного теплообменника, размещенного в системе выпуска ДВС 12 ЧН 18/20. Экспериментальные исследования проводились при следующих условиях:

$$\begin{aligned} 50 \leq d \leq 300 \text{ мм}; & 10 \leq v \leq 100 \text{ м/с}; \\ 0,6 \leq L \leq 0,8 \text{ м}; & 21,54 \leq v \cdot 10^6 \leq 76,3 \text{ м}^2/\text{с}; \\ 0,63 \leq Pr \leq 0,68; & 80 \leq t_w \leq 110 \text{ }^\circ\text{C}; \\ 100 \leq t_0 \leq 500 \text{ }^\circ\text{C}; & 110 \leq P \leq 150 \text{ кПа}; \\ 1000 \leq Re \leq 70000. & \end{aligned}$$

Здесь v – коэффициент вязкости газов;
 t_w – температура стенки охлаждаемой трубы;
 t_0 – температура газов на входе в охлаждаемый участок).

Приведенные параметры соответствуют режимам работы двигателей автономных источников, конструктивным размерам приемной трубы и системы глушения шума выхлопа.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При течении потока в трубе с высокой скоростью имеет место явление рассеивания энергии перемещения газа – процесс диссипации части энергии в трение и превращения ее в теплоту $q_{\text{тр}}$. Вторичное использование теплоты газов в глушителях шума характеризуется отводом теплоты $q_{\text{вн}}$ ($dq_{\text{вн}} < 0$) и теплотой $q_{\text{хим}}$, выделяемой при химических реакциях окисления NO в NO₂ и дальнейшей полимеризации NO₂ в N₂O₄ (при достижении температуры ниже 420 К), причем реакции превращения NO в высшие оксиды происходят при значительном выделении теплоты, т. е. $dq_{\text{хим}} > 0$.

Таким образом, общее тепловое воздействие q на поток ОГ складывается из теплоты трения $q_{\text{тр}}$, отводимой наружу, теплоты $q_{\text{вн}}$ и теплоты химических реакций $q_{\text{хим}}$.

Рассмотрим два случая, используя метод Вулиса [5].

Случай 1. ($dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}} < 0$).

Так как для газов в дозвуковом потоке число Маха $Ma < 1$, то их интенсивное охлаждение ($dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}} < 0$), что, согласно теории Вулиса, приводит к торможению потока, т. е. $du < 0$. Следовательно, газ в потоке сжимается и его скорость уменьшается, т. е. наблюдается так называемый «эффект теплового торможения», что крайне необходимо для снижения уровня шума выпуска.

Случай 2. ($dq_{\text{вн}} + dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}} > 0$).

В этом случае имеет место подвод теплоты, что приводит к ускорению потока $du > 0$, т. е. появляется отрицательное тепловое воздействие.

Значит, для достижения положительного эффекта теплового торможения газа и снижения при этом уровня шума должно соблюдаться условие $dq_{\text{вн}} > (dq_{\text{тр}} + dq_{\text{хим}})$ при $Ma < 1$.

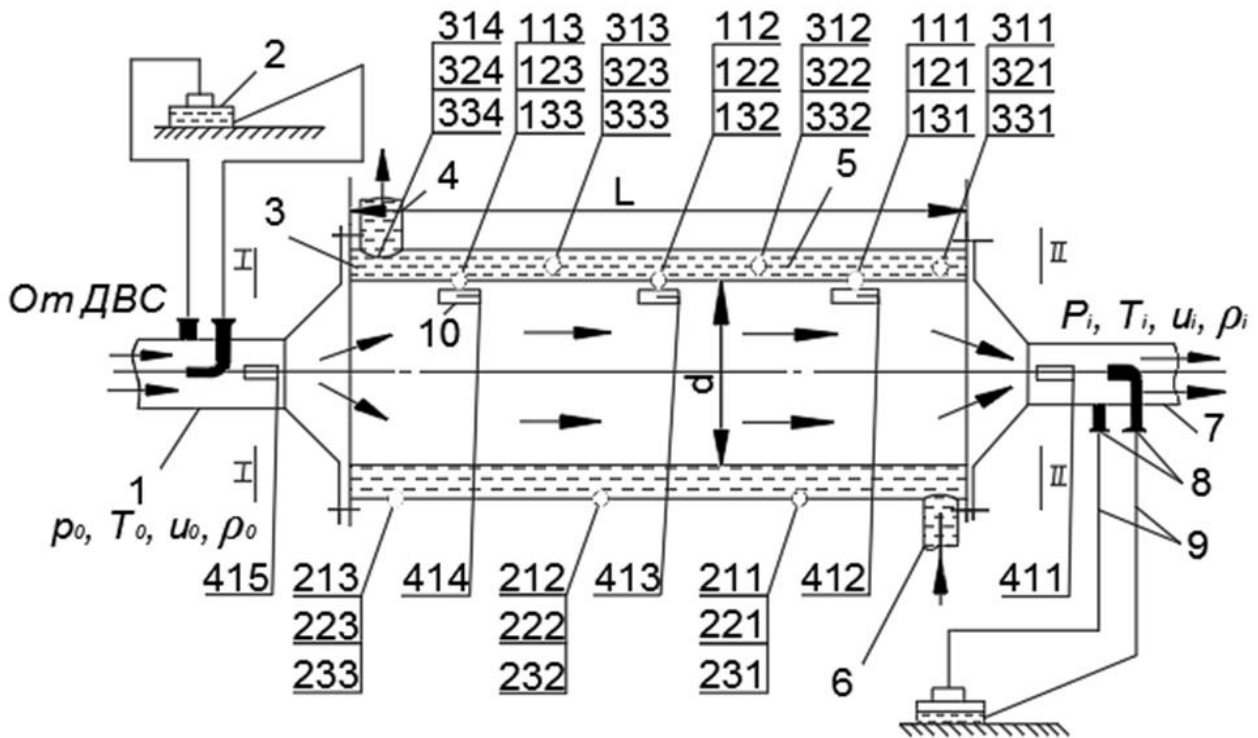


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с расположением датчиков контрольно-измерительных приборов в модели утилизирующего теплообменника [здесь p_0, T_0, u_0, ρ_0 и P_i, T_i, u_i, ρ_i – давления, температуры, скорости и плотности газа на входе в опытный участок и выходе из него; 111-133 – термопары для измерения температуры внутренней стенки утилизирующего теплообменника (по три в каждом сечении); 211-233 – термопары для измерения температуры наружной поверхности утилизирующего теплообменника (по три в каждом сечении); 311-334 – термопары для измерения температуры промежуточного теплоносителя (по три в каждом сечении); 411-415 – термопары для измерения температуры газа, где L – длина опытного участка; d – внутренний диаметр опытного участка (охлаждаемой трубы):
 1 – патрубок впускной; 2 – микроманометр ММН 20-го класса точности 1,0;
 3 – утилизирующий теплообменник; 4 – штуцер выходной;
 5 – промежуточный теплоноситель; 6 – штуцер входной;
 7 – патрубок выпускной; 8 – трубка для отбора статического и полного напоров; 9 – соединительные шланги; 10 – трубка-экран рабочего сняя термопары [7]

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Течение ОГ по трубе глушителя, снабженного утилизирующим теплообменником, рассматривалось как неизотермическое турбулентное течение вязкого газа с внешним теплообменником при учете диссипации и при переменных по длине и сечению свойствах хладагента.

Запишем математическую постановку задачи, т. е. уравнение баланса импульса в приближении пограничного слоя:

$$\frac{\partial}{\partial x} (r\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v u) = -r \frac{dp}{dx} + \frac{\partial}{\partial x} \left(r\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right). \quad (1)$$

Уравнение неразрывности и уравнение баланса энергии в приближении пограничного слоя с учетом вязкой диссипации примут вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} r\rho u + \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} r\rho u c_p T + \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v c_p T) = \frac{\partial}{\partial r} (r\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \mu r \left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)^2 + ru \frac{d\rho}{dx}. \quad (3)$$

Представленные уравнения приняты со следующими допущениями:

– с начальными условиями в сечении $x = 0$

$$x = 0: u = u_0; v = 0; T = T_0; \quad (4)$$

– с граничными условиями симметрии на оси $r = 0$

$$r = 0: \frac{\partial u}{\partial r} = 0; v = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (5)$$

– с граничными условиями на твердой стенке

$$r = r_w: u = 0; v = 0; T = T_w(x). \quad (6)$$

При этом наличие внешнего теплообменника моделируется заданием известного распределения температуры $T_w(x)$ на стенке трубы.

Решение системы уравнений пограничного слоя для течения в газовом тракте теплообменника при утилизации энергии ОГ (рис. 1) производилось методом Патанкара и Сполдинга [4].

Решение конечно-разностных уравнений осуществлялось методом прогонки. Приведенные соотношения положены в основу структурной схемы алгоритма. Причем вычисляли вначале молекулярную вязкость по формуле Сазерленда, затем – турбулентную вязкость и теплопроводность согласно модифицированной модели Ван-Дрифта [4].

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Интегральный баланс импульса для течения в канале сечения S и периметра образующей Π можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} \bar{u}^2 S + P_s) = \tau_w \Pi. \quad (7)$$

Проинтегрируем уравнение (7) от входного до выходного сечения и получим, учитывая постоянство по длине сечения S и периметра Π ,

$$\Delta(\bar{\rho} \bar{u}^2 S) + S \Delta p = \pi \int_0^{X_L} \tau_w dx. \quad (8)$$

Для трубы $\Pi = 2\pi r_w$; $S = \pi r^2$. Обозначая нормализованный (деленный на 2π) поток количества движения через $\Pi_i = \bar{\rho} \bar{u}^2 S / 2\pi$, получим из уравнения (8)

$$\Delta \Pi_i + r_w^2 \Delta p = r_w x_i \tau_w \text{ ср},$$

где $\tau_w \text{ ср}$ – среднее значение касательного напряжения, $\tau_w \text{ ср} = \frac{1}{x} \times \int_0^{X_L} \tau_w dx$.

Перепад потока количества движения $\Delta \Pi_i$ характеризует потерю скоростного напора за счет перестройки профиля скорости, вызванной локальным охлаждением и увеличением плотности газа у стенки, а также релаксацией входного профиля. Перепад давления в данном случае отражает при фиксированном расходе работу сил давления и, следовательно, потери мощности ДВС. При этом касательное напряжение τ_w характеризует работу сил трения.

На рис. 2,а показана зависимость перепада давления Δp по длине охлаждаемого участка длиной 0,6 м и диаметром 0,2 м при температуре стенки t_w , линейно изменяющейся от 80 до 110 °С, в зависимости от скорости газа на входе u_0 . Основным эффектом повышения скорости ОГ при увеличении частоты вращения коленчатого вала двигателя является возрастание требуемого перепада давления на прокачку, при этом перепад давления снижается с повы-

шением температуры при постоянном значении скорости газа на входе, несмотря на рост коэффициента динамической вязкости.

При внешнем интенсивном теплоотводе ($dq_{\text{вн}} < 0$) температура газов снижается, а плотность увеличивается, и, как следствие, перепад давления и скорость уменьшаются, т. е. имеет место эффект теплового торможения потока. Эта закономерность подтверждается и экспериментальными данными.

На рис. 2,а представлена также зависимость безразмерного числа трения c_f от температуры и скорости потока, а на рис. 2,б показано изменение безразмерного коэффициента теплообмена St в зависимости от скорости потока применительно к режимам работы ДВС. Данные, представленные на рис. 2, позволяют сделать вывод о значительной неавтономности течения, вызванной неизотермичностью. С ростом скорости и при снижении температуры коэффициенты трения и теплообмена уменьшаются, а с уменьшением скорости и повышением температуры – увеличиваются.

На рис. 2,б показана также зависимость максимальной по длине плотности теплового потока в стенку $q_{w_{\text{max}}}$ от скорости газов на входе u_0 при разных значениях температуры. Для расчета характерно 15–20%-ное изменение $q_{w_{\text{max}}}$ по длине канала. Данные, приведенные на рис. 2,б, свидетельствуют о том, что плотность теплового потока в стенку $q_{w_{\text{max}}}$ с ростом скорости и увеличением температуры значительно возрастает и может достигать при заданных граничных условиях 5,0 кВт/м² и более.

Зависимость перепада потока количества движения $\Delta\Pi_{\text{и}}$ от скорости и температуры газового потока в основном определяется эффектом охлаждения потока и уменьшением его средней скорости, величина $\Delta\Pi_{\text{и}} = \frac{1}{2\pi} (\bar{\rho}_0 u_0^2 - \bar{\rho}_i \bar{u}_i^2)$ принимает положительные значения. Этот перепад растет с повышением температуры – определяющее влияние здесь оказывает большая температурная разность между средней температурой потока и температурой стенки. Вместе с тем при больших скоростях потока на входе $\Delta\Pi_{\text{и}}$ принимает отрицательное значение, что объясняется охлаждением потока только в очень тонком пристенном слое, в котором наряду с изменением плотности весьма существенным становится и снижение вязкости, а следовательно, уменьшение касательного напряжения. Вследствие такого воздействия профиль скорости становится более вытянутым в центре потока и величина $\bar{\rho}\bar{u}^2$ возрастает.

Анализ значений перепада величины $\Pi_{\text{и}}$ важен, поскольку он напрямую связан с перепадом по длине участка и расходуемой мощности на прокачку. При увеличении $\Pi_{\text{и}}$ снижается Δp , т. е. имеет место восстановление давления при охлаждении потока. Здесь уместно говорить лишь о качественном характере, так как величина трения на стенке достаточно сложным образом зависит от формы профиля скорости, поля температуры и т. д.

С увеличением скорости коэффициент трения c_f уменьшается, поскольку размерная величина τ_w пропорциональна скорости \bar{u} в степени, приблизительно равной 1,75 (рис. 2,а). Сходная картина наблюдается и для зависимости числа Стантона St от скорости и температуры потока (рис. 2,б), что в полной мере отвечает известной концепции о сходстве этих величин (гидродинамическая аналогия Рейнольдса). Однако заметим, что величина St намного выше значения $c_f/2$. Это важно, так как отношение $St / c_f/2$ характеризует термодинамическое совершенство теплообменника и лишь для немногих процессов этот показатель превышает единицу.

Анализ значений перепада величины $\Pi_{\text{и}}$ важен, поскольку он напрямую связан с перепадом по длине участка и расходуемой мощностью двигателя на прокачку. При увеличении $\Pi_{\text{и}}$ снижается мощность на валу двигателя.

Запишем уравнение баланса тепловой энергии для трубы:

$$\frac{d}{dx} (\bar{\rho}\bar{u}\bar{h} S) = q_w \Pi + \text{diss},$$

где \bar{h} – энтальпия;

diss – линейная плотность тепловыделения за счет диссипации, Вт/м.

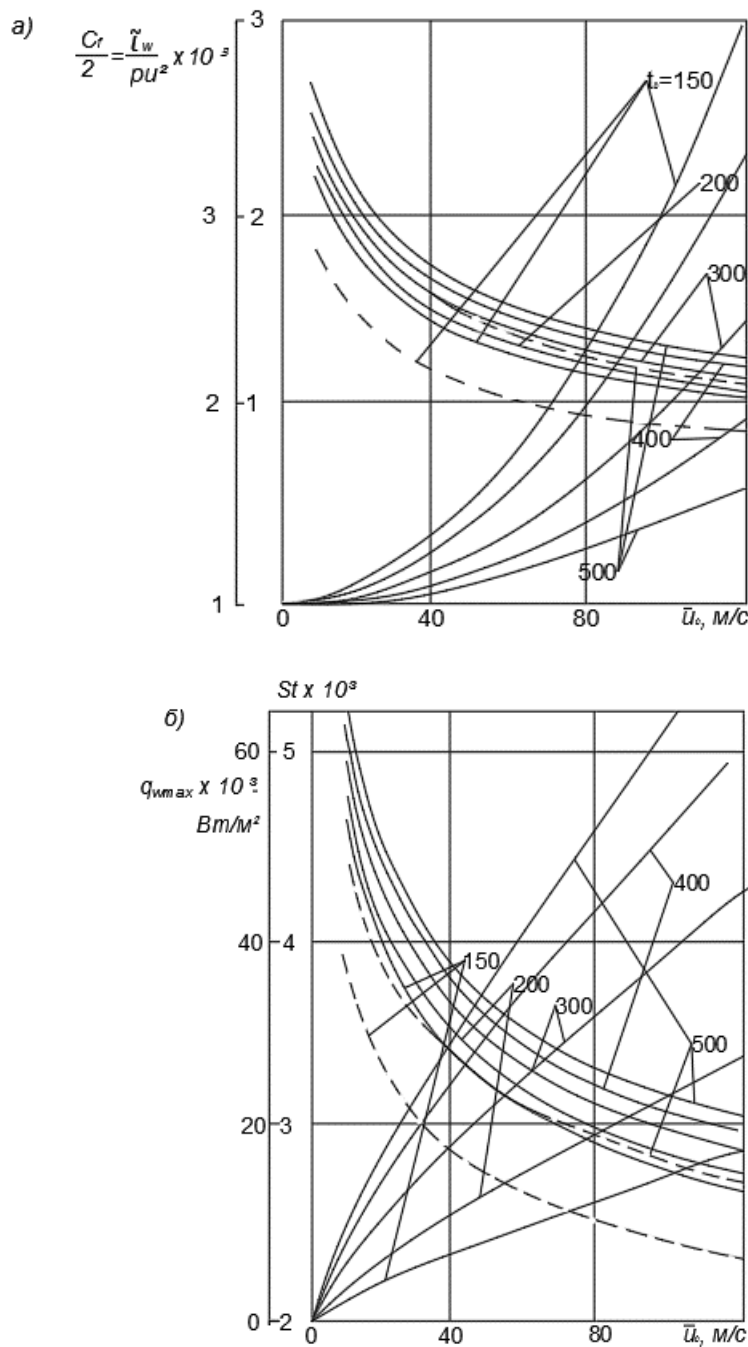


Рис. 2. Результаты численного моделирования процессов утилизации энергии ОГ:
 а – зависимость перепада давления Δp и значения безразмерного числа трения c_f от температуры газа на входе \bar{t}_0 и скорости потока \bar{u}_0 ;
 б – зависимость безразмерного коэффициента теплообмена St и максимальной по длине плотности теплового потока в стенку q_{wmax} от скорости газа на входе \bar{u}_0 и температуры потока t_0 для c_f и q_{wmax} :
 — — — — на входе $x = x_0$; — — — — на выходе $x = x_L$

Обозначив через Π_3 нормализованный поток энтальпии $[\Pi_3 = \frac{1}{2\pi} (\bar{\rho} \bar{u} \bar{h} S)]$, а через $Diss = \int_0^{x_L} diss dx$ – суммарное диссипативное тепловыделение, получим

$$\Delta P_3 = r_w x_L q_{w\phi} + \frac{1}{2\pi} \text{Diss.}$$

Из полученных зависимостей можно определить, какую тепловую мощность P ($P = 2\pi \Delta P_3$) можно утилизировать в системе выпуска ДВС при различных режимных факторах \bar{u}_0 и \bar{t}_0 .

Даже при столь простой конструкции теплообменника, имеющего вид греющей рубашки, мощность достаточно велика и может быть использована в технологических целях, например: для отопления, охлаждения и кондиционирования помещений транспортных средств, нагревания воды, получения пара и кипятка, сушки одежды и пищевых продуктов и т. д. Затраты энергии на прокачку теплоносителя при этом невелики и определяются по данным на рис. 2,а.

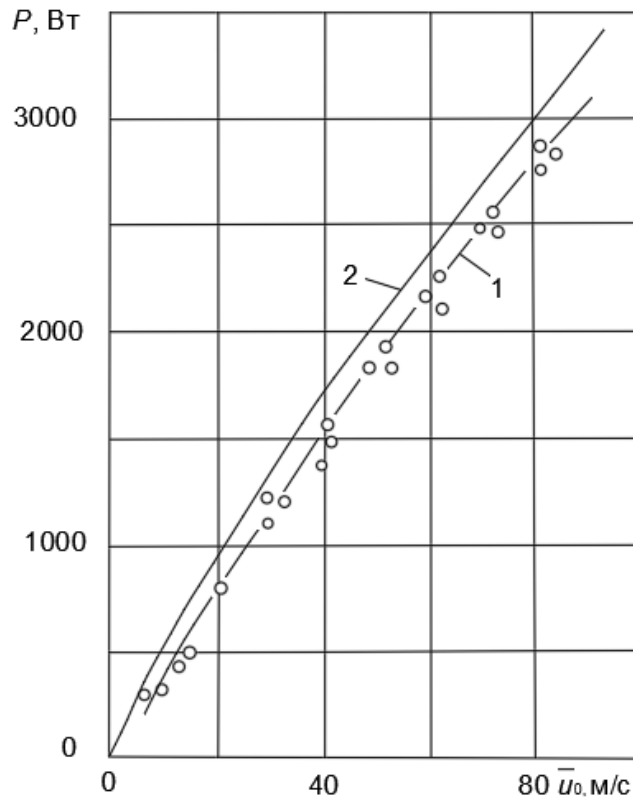


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по тепловой мощности P в зависимости от скорости газов \bar{u}_0 ($L = 0,7$ м; $d = 140$ мм; $t_w = 80 \div 100$ °С):

- 1 – экспериментальное определение утилизированной тепловой мощности в зависимости от скорости движения ОГ на модели утилизационного теплообменника ($10 < \bar{u}_0 < 100$ м/с);
2 – изменение утилизированной тепловой мощности в зависимости от скорости движения ОГ по результатам численного расчета варианта ($10 < \bar{u}_0 < 120$ м/с)

На рис. 3 дано сопоставление экспериментальных (кривая 1) и расчетных (кривая 2) значений утилизированной тепловой мощности P в зависимости от скорости газов на входе в утилизационный теплообменник. С ростом скорости разница между теоретической и экспериментальной кривыми увеличивается от 10 до 15%. Такое расхождение объясняется рядом факторов: влиянием входного и выходного местных сопротивлений, наличием шероховатостей на внутренней поверхности стенки теплообменника, загрязнением поверхности

нагрева и др. Однако в целом влияние этих факторов находится в пределах допустимых погрешностей, не превышающих 20%.

Результаты численного моделирования были использованы при проектировании системы внешней утилизации для отопления аппаратного отсека и служебных помещений командного пункта ОВИ с 12ЧН18/20. При этом конструкция утилизационного теплообменника была оптимизирована по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению, и была проверена его работоспособность в лабораторных условиях на стационарном двигателе.

Вывод. Разработанные математическая модель и метод численного моделирования позволяют в описанном диапазоне параметров с достаточной степенью точности рассчитывать теплоотдачу и сопротивление охлаждаемого участка системы выпуска двигателя и определять требуемую утилизационную поверхность нагрева теплообменника.

Список используемых источников

1. *Панфилов С. А., Кабанов О. В.* Алгоритм энергосбережения для автономных систем теплоснабжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. : Строительство и архитектура. – 2017. – № 1. – С. 67–74.
2. *Груданов В. Я., Рубанов А. Н., Тупальский К. Н.* Утилизаторы тепла отработавших газов // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 7. – С. 44–52.
3. Исследование и разработка методов технической диагностики судовых высокооборотных дизелей в стендовых и эксплуатационных условиях : отчет о НИР № ГР 80067338 / ПАО «ЗВЕЗДА». – СПб., 2001. – 61 с.
4. *Груданов В. Я., Цап В. Н., Ткачева Л. Т.* Глушители с утилизацией теплоты отработавших газов // Автомобильная промышленность. – 2011. – № 5. – С. 32–39.
5. *Колчин А. И., Демидов В. П.* Расчет автомобильных и тракторных двигателей. – М. : Высш. шк., 2008. – 498 с.
6. ГОСТ Р 51387-99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 16 с.
7. *Чертыковцева Н. В.* Повышение эффективности прогрева маневрового тепловоза в зимнее время за счет использования вторичных энергоносителей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2009. – 24 с.

Д. Р. Абсалямов,
доктор технических наук, доцент;
Р. А. Мосягин,
кандидат политических наук;
Р. Р. Хальметов;
А. Н. Шиян

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЕЙ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Приведены результаты исследований по влиянию температуры окружающей среды на тепловое состояние цилиндропоршневой группы (ЦПГ) дизелей, выполненные экспериментально-расчетным методом на дизелях 12ЧН 18/20 (М787Б) и 8ЧН 13/14 (ЯМЗ-7511.10) автономных источников на заводских испытательных стендах. При проведении экспериментального исследования, наряду с термометрированием деталей ЦПГ, производились индицирование рабочего процесса двигателя, снятие теплового баланса и др.

Результаты выполненного исследования позволили установить величину снижения номинальной мощности дизеля 12ЧН 18/20 (М787Б) автономного источника объектов военной инфраструктуры в процессе его работы при повышенных температурах $T_a = 313$ К при условии, что уровень температур днища крышки цилиндра не будет превышать уровня температур на режиме $P_e = 883$ кВт ($n = 750$ мин⁻¹) при $T_a = 293$ К. Результаты выполненных исследований могут быть использованы для расчетной оценки уровня температур в стенках деталей ЦПГ широкого класса как стационарных, так и транспортных дизелей, обеспечивая при этом удовлетворительную сходимость результатов расчета с опытными данными.

Ключевые слова: тепловое состояние, цилиндропоршневая группа, автономные источники электроснабжения, дизель-генераторная установка, температура.

ВВЕДЕНИЕ

Дизельные двигатели дизель-генераторных установок (ДГУ), применяемые в автономных источниках электроснабжения (АИЭ) объектов военной инфраструктуры (ОВИ), эксплуатируются в широких диапазонах изменений температуры, барометрического давления и влажности окружающего воздуха. Анализ результатов экспериментальных исследований, приведенных в работах [1–4], показывает, что наибольшее влияние на параметры работы двигателей оказывает изменение температуры окружающего воздуха t_a . При постоянной цикловой подаче топлива $b_{ц}$, что характерно в условиях эксплуатации ДГУ, с повышением температуры t_a ухудшаются мощностные и экономические показатели работы двигателей. При повышении температуры t_a падает мощность двигателя P_e и увеличивается удельный эффективный расход топлива b_e , обусловленные уменьшением индикаторного КПД η_i вследствие понижения коэффициента избытка воздуха при сгорании α_1 .

В работах [3, 4] показано, что повышение температуры существенно влияет на тепловое состояние дизеля и что в первую очередь его цилиндропоршневая группа (ЦПГ) при работе на одном и том же скоростном режиме ($n = \text{const}$), при постоянной величине $b_{ц}$ и различных t_a определяется, главным образом, температурой газов в цилиндре, которая зависит от коэффициента α'_1 .

Повышение температуры t_a вызывает рост температуры газов, и, следовательно, баланс теплоты устанавливается при более высоких уровнях температуры стенок деталей, образующих камеру сгорания (КС), температурных градиентов и тепловых потоков через эти стенки. Приведенные выше показатели характеризуют тепловую напряженность ЦПГ.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВЫХ ГРУПП ДИЗЕЛЕЙ

Исследование по влиянию температуры t_a на тепловое состояние ЦПГ дизелей выполнено экспериментально-расчетным методом на дизелях 12ЧН 18/20 (М787Б) и 8ЧН 13/14 (ЯМЗ-7511.10) автономных источников на заводских испытательных стендах. При проведении экспериментального исследования, наряду с термометрированием деталей ЦПГ, производились индицирование рабочего процесса двигателя, снятие теплового баланса и др. Кроме того, анализировались опытные данные других исследователей [1, 3, 4].

При исследовании влияния изменения температуры t_a на тепловое состояние ЦПГ дизели оборудовались специальным водовоздушным теплообменником для подогрева воздуха на всасывании в компрессор. Температура всасываемого воздуха регулировалась изменением расхода горячей воды через водовоздушный теплообменник. При этом температуры воды t_{cool} и масла t_a на входе в дизель поддерживались на уровне соответственно 75–80 °С и 78–80 °С, а температура воздуха в наддувочном коллекторе $t_{int} = 52 \div 55$ °С, т. е. коэффициент охлаждающей эффективности E_p охладителя наддувочного воздуха практически был постоянным.

На рис. 1 представлены графики изменения температуры огневого днища крышки цилиндра дизеля 12ЧН 18/20 и температуры алюминиевого неохлаждаемого поршня дизеля 8ЧН 13/14. Из графиков видно, что температура днища крышки цилиндра в зоне между впускными клапанами возрастает на 10–12 °С, а в зоне между впускными клапанами на 3–4 °С на каждые 10 °С повышения температуры t_a . При этом перепад температур между перемычками впускных и выпускных клапанов увеличивается на 6–7 °С.

С повышением t_a температура в различных точках поверхности поршня имеет разную интенсивность роста, и на каждые 10 °С повышения t_a температура поршня возрастает: на периферии – на 12–14 °С, в центре поршня – на 5–6 °С, в районе верхнего поршневого кольца со стороны выпуска – на 8–10 °С и со стороны впуска – на 5–7 °С.

Результаты данного экспериментального исследования, а также анализ результатов ранее выполненных работ по влиянию температуры t_a при постоянных $b_{ц}$ и n позволили получить эмпирические зависимости локальных температур стенок деталей ЦПГ. Особенность этих зависимостей в том, что в качестве переменных рассматриваются их относительные (безразмерные) величины, что повышает степень опытных данных. Ниже приведены зависимости для определения локальных температур днища крышки цилиндра, поршня и втулки цилиндра:

$$T'_{кр} = T_{кр} \left[0,15\bar{r} \left(1 - \frac{T_a}{T_a} \right) + 0,4 \frac{T_a}{T_a} + 0,6 \right], \quad (1)$$

$$T'_п = T_п \left[0,5\bar{r} \left(\frac{T_a}{T_a} - 1 \right) + 0,2 \frac{T_a}{T_a} + 0,8 \right], \quad (2)$$

$$T'_{п.к} = T_{п.к} \left[1,4\bar{h} \left(1 - \frac{T_a}{T_a} \right) + 0,7 \frac{T_a}{T_a} + 0,3 \right], \quad (3)$$

$$T'_{вт} = T_{вт} \left[0,7\bar{l} \left(1 - \frac{T_a}{T_a} \right) + 0,8 \frac{T_a}{T_a} + 0,2 \right]. \quad (4)$$

Здесь $T_{кр}$, $T_п$, $T_{п.к}$ и $T_{вт}$ – температуры в огневом днище крышки цилиндра, в днище головки поршня, поршня в зоне колец и втулки цилиндра соответственно при стандартной температуре окружающего воздуха $T_a = 300$ К;

- T_a – текущее значение температуры окружающего воздуха;
- \bar{r} – относительный радиус цилиндра, равный r/R (где r – текущее значение радиуса; R – радиус цилиндра);
- \bar{h} – относительное расстояние по образующей поршня от наружной поверхности днища поршня до точки, в которой необхо-

димом определить температуру, при этом $\bar{h} = h/h_{\text{п}}$ (где h – текущее значение; $h_{\text{п}}$ – высота поршня),;
 \bar{l} – относительное расстояние от плоскости стыка втулки и крышки цилиндра до точки, в которой необходимо определить температуру зеркала втулки цилиндра, равное l/s (где l – текущее значение; s – ход поршня).

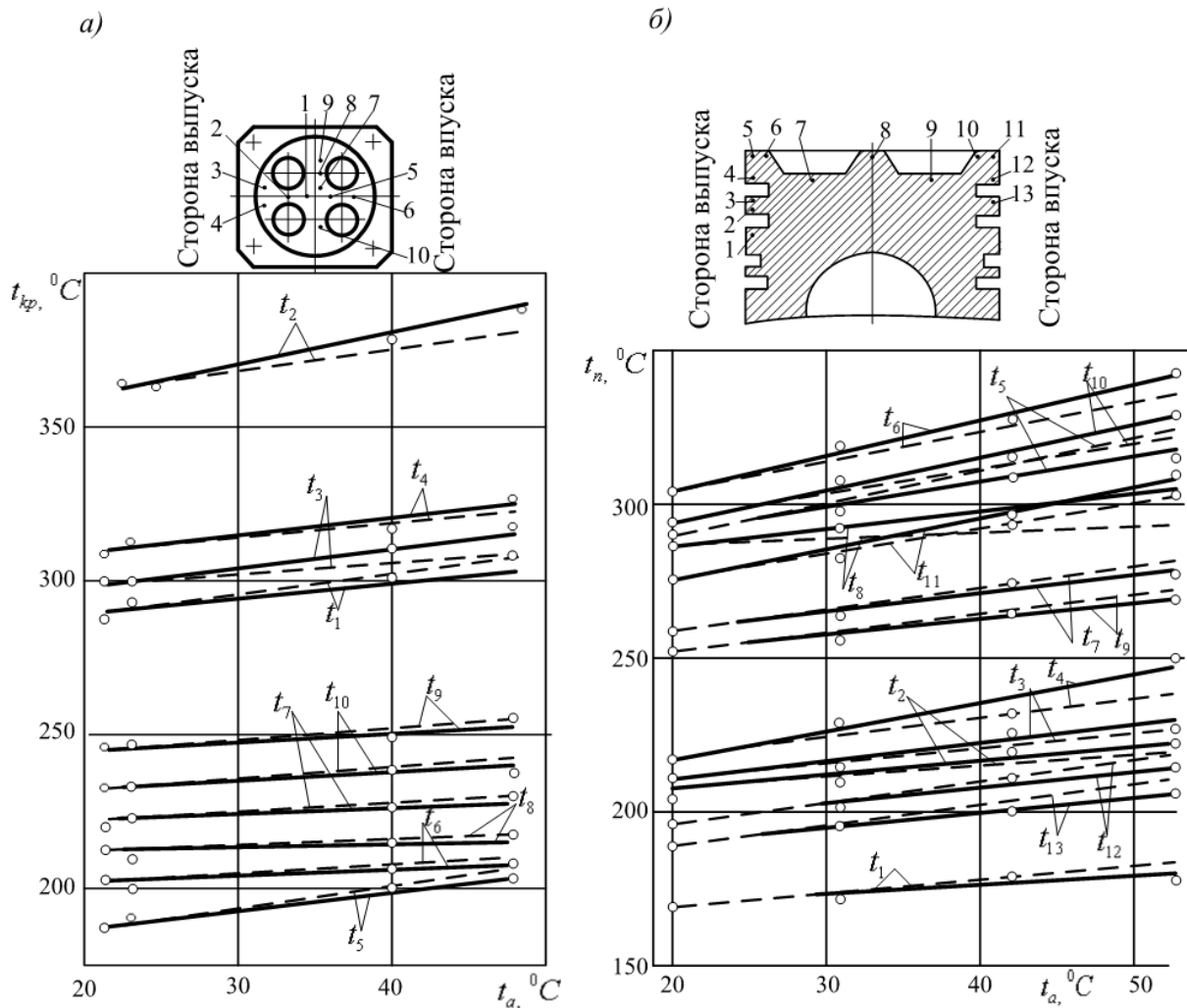


Рис. 1. Изменение температуры огневого днища крышки цилиндра дизеля 12ЧН 18/20 (а) и температуры поршня дизеля 8ЧН 13/14 (б) в зависимости от температуры t_a при постоянных $b_{\text{ц}}$ и n , где 1–13 – номера точек замера температур;
 — — — — — опыт; — — — — — расчет

Из рис. 1 видно, что расчетные и опытные значения температур имеют вполне удовлетворительное совпадение аналогично опытным и рассчитанным по зависимостям (1)–(4) значениям температур деталей ЦПГ для других двигателей. Расхождение расчетных и опытных значений температур для крышки цилиндра дизеля 8ЧН 13/14 в характерных точках составляет до 1,6%. Для охлаждаемого составного поршня дизеля 8ЧН 13/14 расхождение расчетных и опытных значений температур несколько больше – 2,5–4,5%. Также удовлетворительное совпадение имеют опытные и расчетные значения температур для втулок цилиндра дру-

гих марок дизелей 6ЧН 21/21 и 10ДН 20,7/(2 X 25,4), где расхождение составляет до 2,5%. Таким образом, приведенные зависимости позволяют с достаточной степенью точности определять изменение локальных температур стенок деталей ЦПГ при изменении температуры t_a и постоянных $b_{ц}$ и n .

Более подробно расчетное исследование теплового состояния деталей ЦПГ при изменении температуры t_a может быть выполнено путем моделирования температурных полей в стенках с использованием граничных условий третьего рода. Локальные коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{ср}$ и результирующие по газу температуры $t_{г. рез}$ при изменении температуры t_a можно рассчитать, используя методику, изложенную в работе [5]. Для этого необходимо располагать исходными данными (в первую очередь индикаторными диаграммами). Для расчета индикаторных диаграмм необходимо определить величину давления p_{int} и температуры T_{int} воздуха в наддувочном ресивере.

Анализ полученных и приведенных в литературе экспериментальных данных по влиянию температуры t_a на основные параметры работы дизелей при постоянных $b_{ц}$ и n показывает, что частота вращения ротора турбокомпрессора $n_{тк}$ остается практически постоянной. Это позволило считать адиабатическую работу сжатия воздуха в компрессоре $L_{с ад}$ постоянной при изменении температуры t_a . Приняв $L_{с ад} = const$ и пренебрегая сопротивлением охладителя наддувочного воздуха, из известного уравнения для определения адиабатической работы сжатия 1 килограмма воздуха в компрессоре после несложных преобразований можно получить зависимость для расчета давления p_{int} при изменении температуры t_a , т. е.

$$p_{int} = \left[\frac{T_a}{T_a} \left(\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + 1 \right]^{3,5} p_a, \quad (5)$$

где π_c — степень повышения давления в компрессоре при исходных T_a и p_a .

Расхождение значений величины давления p_{int} , рассчитанных по зависимости (5), с опытными, полученными на разных дизелях, составляет порядка 1%, что показано на рис. 2.

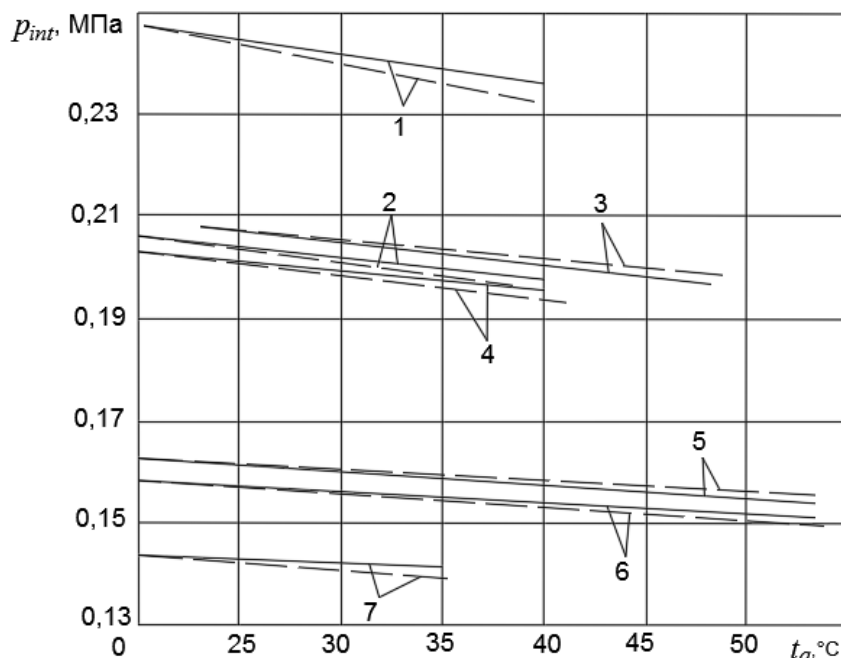


Рис. 2. Изменение давления p_{int} в зависимости от температуры t_a при постоянных $b_{ц}$ и n дизелей (значения кривых см. на рис. 1):
 1 — 16ЧН 25/27 ($P_e = 2070$ кВт); 2 — 10ДН 20,7/(2x25,4) ($P_e = 2210$ кВт);
 3 — 12ЧН 18/20 ($P_e = 883$ кВт); 4 — 7Д100 ($P_e = 1100$ кВт);
 5 — 64Н 13/11,5 ($P_e = 125$ кВт); 6 — 6ЧН 31,8/33 ($P_e = 993$ кВт);
 7 — 8ЧН 13/14 ($P_e = 200$ кВт)

Температуру T_{int} можно определить с учетом степени эффективности охладителя наддувочного воздуха.

На рис. 3 показаны индикаторные диаграммы дизелей 12ЧН 18/20 и 8ЧН 13/14 при постоянных $b_{ц}$ и n коленчатого вала дизеля и изменении температуры t_a , которые послужили исходными данными для расчета граничных условий третьего рода при моделировании температурных полей в стенках огневого днища крышки цилиндра и днища головки поршня. Расчеты индикаторных диаграмм выполнялись по методике, изложенной в работе [6]. Из графиков на рис. 3 видно, что расчетные и опытные индикаторные диаграммы имеют удовлетворительное совпадение, что создает предпосылки получения, в определенной степени, достоверных значений локальных коэффициентов теплоотдачи и результирующей по теплоотдаче температуры газов.

Изображенные на рис. 4 графики показывают, что величины средних за цикл локальных коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{ср}$ практически не зависят от температуры t_a . Это обусловлено следующим. Изменение температуры t_a (например, ее рост) приводит к увеличению температуры газов в цилиндре и стенки КС, а также к некоторому понижению давления газов. При этом теплопроводность и теплоемкость газа несколько возрастают, а плотность газа снижается. Совместное влияние этих параметров вызывает незначительное изменение коэффициента проникновения теплоты

$\sqrt{\lambda_m C_{pm} \rho_m}$.

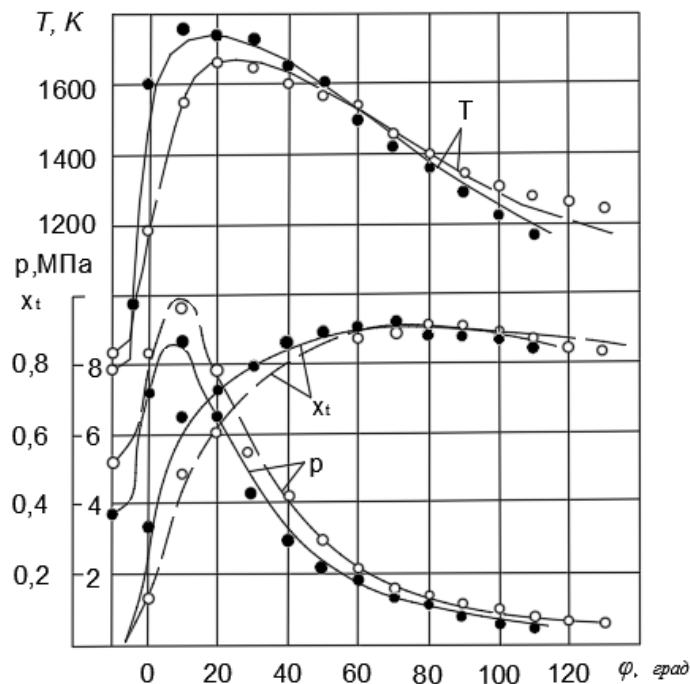


Рис. 3. Индикаторные диаграммы для постоянных значений $b_{ц}$ и n дизелей, где — — — 8ЧН 13/14, $t_a = 48^\circ\text{C}$;
— — — 12ЧН 18/20, $t_a = 50^\circ\text{C}$.
Экспериментальные точки – опыт;
кривые – расчет

Примерно аналогичные изменения происходят и с другими параметрами, определяющими коэффициенты конвективной и радиационной теплоотдачи. Таким образом, интенсивность локальной теплоотдачи с ростом температуры от 20–23 до 48–50 °С снижается на 4–6 %, т. е. практически можно считать ее неизменной в указанном диапазоне изменения температуры окружающего воздуха.

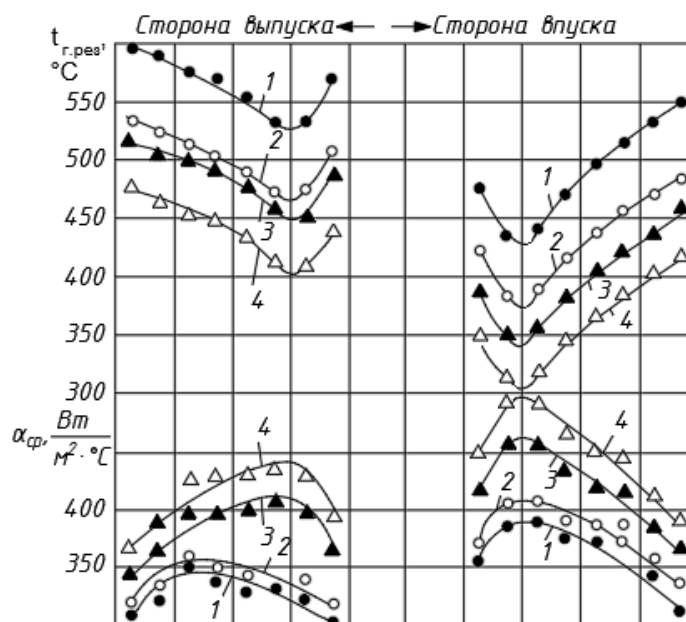


Рис. 4. Изменение коэффициента α_{cp} и $t_{г.рез}$ в зависимости от температуры t_a :

1 и 2 – $t_a = 48$ и 20 °С, дизель 8ЧН 13/14;

3 и 4 – $t_a = 50$ и 23 °С, дизель 12ЧН 18/20

Результирующая по теплоотдаче температура газов $t_{г.рез}$, как видно из графиков на рис. 4, зависит в большой степени от температуры t_a . Это обусловлено изменением температуры газов в цилиндре, в значительной степени зависящей от коэффициента α_1 , изменение которого при постоянном значении обусловлено изменением температуры t_a .

Результаты выполненного исследования позволили по требованию заказчика установить величину снижения номинальной мощности дизеля 12ЧН 18/20 (М787Б) автономного источника ОВИ в ходе его работы при повышенных температурах $T_a = 313$ К и при условии, что уровень температур днища крышки цилиндра не будет превышать уровня температур на режиме $P_e = 883$ кВт ($n = 750$ мин⁻¹) при $T_a = 293$ К.

Было установлено, что для ограничения температуры огневого днища крышки цилиндра при температуре $t_a = 40$ °С необходимо при $t_a = 20$ °С устанавливать номинальную мощность $P_e = 630$ кВт. При этом значения температуры крышки цилиндра не будут превышать значения температуры в наиболее нагретых местах (на перемычке между окнами выпускных клапанов, $t_{кр 2} = 368$ °С) на режиме номинальной мощности при температуре $t_a = 20$ °С.

Вывод. Результаты выполненных исследований могут быть использованы для расчетной оценки уровня температур в стенках деталей ЦПГ широкого класса как стационарных, так и транспортных дизелей, обеспечивая при этом удовлетворительную сходимость результатов расчета с опытными данными.

Список используемых источников

1. Абсалямов Д. Р. Математический метод формализации поиска отказов энергосистем специальных технических комплексов // Вестник Ярославского государственного университета имени П. Г. Демидова. Сер. : Естественные и технические науки. – 2014. – № 2. – С. 4–11.

2. Оценка тепловой заметности вооружения, военной техники и объектов военной инфраструктуры как компонента общей проблемы заметности / П. В. Дружинин [и др.] // Военная мысль. – 2016. – № 1. – С. 53–65.
3. Исследование и разработка методов технической диагностики судовых высокооборотных дизелей в стендовых и эксплуатационных условиях : отчет о НИР № ГР 80067338 / ПАО «ЗВЕЗДА». – СПб., 2001. – 61 с.
4. Исследование дизелей ЧН 18/20 и ЧН 16/17 на режимах перераспределенных цилиндрических нагрузок по основным диагностическим параметрам : отчет о НИР (промежуточный) № ГР 80053526 / ПАО «ЗВЕЗДА». – СПб., 2003. – 62 с.
5. Исследование судовых быстроходных дизелей как объектов технической диагностики : отчет о НИР (заключительный) № ГР 18846088 / ПАО «ЗВЕЗДА». – СПб., 2004. – 69 с.
6. Компактные водогрейные котлы-утилизаторы для дизельных и газотурбинных энергоустановок / М. В. Ковалев [и др.] // Двигателестроение. – 2011. – № 1. – С. 19–23.

В. Ф. Алексеев,
доктор технических наук, профессор;
 Е. Б. Морозов

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПОЛИГОНА ДЛЯ ЭТАЛОНИРОВАНИЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

В статье предлагается методика создания гравиметрического полигона для эталонирования приборов, обеспечения измерений силы тяжести, в том числе на подвижном основании. Методика содержит оценку спектральной структуры гравитационного поля в районе эталонного полигона и определения требуемой дискретности пунктов опорной гравиметрической сети, порядок выполнения измерений на пунктах специального полигона, а также методику математической обработки результатов измерений с применением параметрического способа уравнивания.

Ключевые слова: гравиметрический полигон, гравитационное поле, гравиметрические измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Объективные оценки качества выполнения гравиметрических съемок приборами, установленными на подвижном основании (авиационном носителе), могут быть получены при сопоставлении их результатов с детальными гравиметрическими данными, определенными с высокой точностью на специальном (тестовом) гравиметрическом полигоне. Протяженность и структура эталонной гравиметрической информации в пределах тестового полигона должны обеспечивать репрезентативный набор данных для оценки точности исследуемых приборов.

Построение тестового гравиметрического полигона должно включать в себя решение следующих основных задач:

- определения дискретности получения эталонной гравиметрической информации в пределах полигона с целью корректного отображения информации о короткопериодических составляющих гравитационного поля Земли (ГПЗ);
- обоснования методики выполнения гравиметрических измерений для достижения требуемой точности эталонных гравиметрических данных;
- обоснования методики математической обработки полевых материалов с целью определения вероятнейших значений гравиметрических данных на пунктах полигона.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭТАЛОННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для создания тестового гравиметрического полигона необходимо применять высокоточную гравиметрическую съемку с использованием абсолютных и относительных гравиметров. Абсолютные гравиметры могут использоваться для определения значений ускорения силы тяжести только на опорных гравиметрических пунктах. Для оценки значений ускорения силы тяжести на других пунктах полигона должны применяться относительные гравиметры. В этом случае допустимую детальность гравиметрических пунктов можно вычислить по формуле [2]

$$m_{\Delta g}^2 = 4 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} |1 - \Pi^{\text{стп}}(\omega_x, \omega_y)|^2 |S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y, \quad (1)$$

где $m_{\Delta g}$ – средняя квадратическая ошибка аномалий ускорения силы тяжести (АУСТ);

$|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2$ – функция спектральной плотности мощности поля АУСТ,
 $|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 = S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y) \cdot S_{\Delta g}^*(\omega_x, \omega_y),$

где * – символ комплексного сопряжения;

$\Pi^{стг}(\omega_x, \omega_y)$ – частотная характеристика оператора сглаживания [4],

$$\Pi^{стг}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin \frac{\Delta x \cdot \omega_x}{2}}{\frac{\Delta x \cdot \omega_x}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{\Delta y \cdot \omega_y}{2}}{\frac{\Delta y \cdot \omega_y}{2}}; \quad (2)$$

(ω_x, ω_y) – круговые частоты.

Для решения задачи с использованием уравнения (1) необходимо определить функцию спектральной плотности мощности поля АУСТ. Выполненные исследования [2] позволяют заключить, что эта функция может быть задана с помощью модели Джордана [3], т. е.

$$|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 = \frac{15D_{\Delta g}(\omega_x^2 + \omega_y^2)}{4\pi\gamma^3[\gamma^{-2} + (\omega_x^2 + \omega_y^2)]^{7/2}}, \quad (3)$$

где $D_{\Delta g}$ – дисперсия функции аномалий ускорения силы тяжести;

$$\gamma = \frac{R_{\Delta g}}{1,361};$$

$R_{\Delta g}$ – радиус корреляции функции $\Delta g(x, y)$.

Оценку допустимого значения шага дискретизации гравиметрических данных на эталонном полигоне по формуле (1) можно выполнить методом итераций. Для этого следует задать допустимое значение $m_{\Delta g}$ и с использованием имеющейся гравиметрической информации получить статистические характеристики ГПЗ в районе эталонного полигона.

Результаты вычислений для $m_{\Delta g}$, не превышающей 0,1 мГал, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Значение шага дискретизации аномалий ускорения силы тяжести (в км)
при допустимом значении $m_{\Delta g} = 0,1$ мГал**

Радиус корреляции $R_{\Delta g}$, м	Дисперсия $D_{\Delta g}$, мГал ²							
	100	200	400	600	800	1000	2500	5000
10	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2
14	1.1	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3
18	1.5	1.2	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
22	1.8	1.4	1.1	1.0	0.9	0.8	0.6	0.4
26	2.2	1.7	1.3	1.2	1.0	1.0	0.7	0.5
30	2.5	2.0	1.5	1.3	1.2	1.1	0.8	0.6
34	2.8	2.2	1.8	1.5	1.4	1.3	0.9	0.7
38	3.2	2.5	2.0	1.7	1.5	1.4	1.0	0.8
42	3.5	2.8	2.2	1.9	1.7	1.6	1.1	0.9
46	3.9	3.0	2.4	2.1	1.9	1.7	1.3	1.0
50	4.2	3.3	2.6	2.3	2.0	1.9	1.4	1.1

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что шаг дискретизации АУСТ может составлять 2–3 км, если ГПЗ характеризуется $D_{\Delta g} \leq 200$ мГал², и $R_{\Delta g}$ от 20 до 40 км.

В районах с более сложной структурой гравитационного поля ($D_{\Delta g}$ от 400 до 800 мГал², $R_{\Delta g}$ от 20 до 40 км) АУСТ достаточно определять с шагом 1–2 км. В сложных, в гравиметрическом отношении, районах ($D_{\Delta g} \geq 1000$ мГал², $R_{\Delta g}$ от 10 до 45 км) шаг дискретизации АУСТ необходимо уменьшить до 0,5–1,5 км.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ЭТАЛОННЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для определения значений ускорений силы тяжести на пунктах эталонного полигона необходимо:

- иметь не менее двух опорных гравиметрических пунктов, в каждом из которых известно абсолютное значение ускорения силы тяжести, полученное со средней квадратической ошибкой, как минимум в 3 раза меньшей заданной точности гравиметрической съемки;
- сформировать комплект не менее чем из трех однотипных относительных гравиметров, для каждого из которых на этапе исследований доказан линейный характер изменения нуля-пункта прибора в течение 10–12 ч рейса;
- оборудовать транспортное средство (автомобиль) для перемещения расчета и измерительного комплекта в районе полевых работ.

Комплект относительных гравиметров можно сформировать, например, из трех приборов типа ГНУ-КВ. В этом случае дополнительно к определению закона смещения нуля-пункта следует установить (проконтролировать) значение цены оборота винта отсчетного устройства.

Полевые измерения с гравиметрами должны проводиться рейсами, под которыми понимается совокупность последовательных измерений всеми гравиметрами измерительного комплекта на опорных и получаемых пунктах, объединенных единым отсчетом времени и ходом нуля-пункта.

При выполнении полевых измерений каждый рейс должен выполняться по схеме кольцевого, т. е. должен начинаться и заканчиваться на одном и том же опорном гравиметрическом пункте (рис. 1).

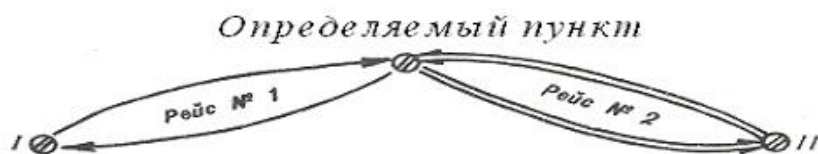


Рис. 1. Общая схема проложения гравиметрического рейса

Окончательное значение ускорения силы тяжести на всех определяемых пунктах должно вычисляться как среднее из результатов, полученных из двух независимых рейсов, каждый из которых начинается и завершается на своем опорном пункте (рис.1).

Второй гравиметрический рейс должен начинаться не ранее чем через два часа после завершения первого.

Продолжительность гравиметрического рейса следует ограничить четырьмя часами, что должно гарантировать соблюдение закона линейности изменения нуля-пункта приборами комплекта в ходе измерений. Такая продолжительность рейса позволяет также в результатах измерений не учитывать поправку за лунно-солнечное притяжение.

На каждом пункте (опорном и определяемых) измерения следует выполнять всеми тремя гравиметрами рабочего комплекта. Допустимые расхождения между значениями приращений УСТ на каждом гравиметрическом пункте, полученные из трех приборов рабочего ком-

плекта, а также расхождения между значениями УСТ на одноименных пунктах, полученные после математической обработки измерений в двух гравиметрических рейсах, определяются заданной точностью гравиметрической съемки.

Пространственное положение гравиметрических пунктов необходимо определять со средней квадратической погрешностью 1–5 м. Для геодезической привязки пунктов можно использовать приемную аппаратуру спутниковых навигационных систем, которая позволяет определять координаты пунктов в реальном масштабе времени. Наиболее оптимальным способом получения координат точек с помощью спутниковой аппаратуры геодезического класса является кинематический режим реального времени (RTK). Такой режим позволяет получать данные с требуемой точностью непосредственно в поле в режиме *online* без выполнения камеральной обработки. При реализации данной технологии необходимо обеспечить связь между приемниками по GSM-GPRS-радиоканалу для получения полевым приемником данных дифференциальной коррекции.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНЕЙШИХ ЗНАЧЕНИЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПУНКТАХ ПОЛИГОНА

В результате выполнения гравиметрической съемки на каждом пункте эталонного полигона будут получены значения ускорений силы тяжести. Далее эти данные подлежат совместной математической обработке с использованием метода наименьших квадратов.

Применение параметрического способа уравнивания позволяет вычислить поправки $G^T = [\delta g_1 \ \delta g_2 \ \dots \ \delta g_k]$ к предварительным значениям УСТ на пунктах эталонного гравиметрического полигона по формуле

$$G = -(A^T P A)^{-1} A^T P L. \quad (4)$$

Здесь A – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta g_1}{\partial g_1} & \frac{\partial \Delta g_1}{\partial g_2} & \dots & \frac{\partial \Delta g_1}{\partial g_k} \\ \frac{\partial \Delta g_2}{\partial g_1} & \frac{\partial \Delta g_2}{\partial g_2} & \dots & \frac{\partial \Delta g_2}{\partial g_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta g_n}{\partial g_1} & \frac{\partial \Delta g_n}{\partial g_2} & \dots & \frac{\partial \Delta g_n}{\partial g_k} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

В формуле (5) введены следующие обозначения: n – число измерений приращений ускорения силы тяжести между гравиметрическими пунктами полигона; k – число определяемых гравиметрических пунктов полигона;

P – матрица весов измеренных приращений силы тяжести,

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & & & \\ & P_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & P_n \end{bmatrix};$$

L – вектор свободных членов параметрических уравнений поправок,

$$L^T = [l_1 \quad l_2 \quad \dots \quad l_n].$$

Приращения УСТ Δg_m вычисляются по формуле

$$\Delta g_m = g_i^0 - g_j^0 \quad (6)$$

где g_i^0, g_j^0 – предварительные значений УСТ на i -том и j -том гравиметрических пунктах полигона, при этом

$$l_m = g_i^0 - g_j^0 - \Delta g_m. \quad (7)$$

где $m = 1, 2, \dots, n$; $i, j = 1, 2, \dots, k$.

Значения весов измеренных приращений силы тяжести могут вычисляться по формуле

$$P_m = \frac{C}{m_{\Delta g_m}^2}, \quad (8)$$

где C – коэффициент пропорциональности, значение которого подбирается таким образом, чтобы величины P_m были близкими к 1;

$m_{\Delta g_m}$ – средняя квадратическая ошибка измеренного приращения силы тяжести.

Для вычисления средних квадратических ошибок уравненных значений УСТ \tilde{g}_i ($i = 1, 2, \dots, k$) на пунктах эталонного гравиметрического полигона должно применяться уравнение [1]

$$m_{\tilde{g}} = \mu \sqrt{Q_{\tilde{g}}}, \quad (9)$$

где μ – средняя квадратическая ошибка единицы веса, значение которой вычисляется по формуле [1]

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T P V}{n - k}}, \quad (10)$$

где V – вектор поправок к измеренным приращениям ускорений силы тяжести между пунктами гравиметрического полигона;

$Q_{\tilde{g}}$ – корреляционная матрица окончательных значений УСТ на гравиметрических пунктах полигона, элементы которой вычисляются по формуле

$$Q_{\tilde{g}} = (A^T P A)^{-1}. \quad (11)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход позволит создать детальную модель гравитационного поля Земли, обеспечивающую эталонирование как наземных гравиметров, так и приборов, устанавливаемых на авиационном носителе.

Разработанная методика позволяет оценивать необходимое пространственное разрешение модели в зависимости от требуемой точности определения ускорений силы тяжести, определяет порядок выполнения полевых измерений и предлагает вариант совместной математической обработки результатов измерений.

Список используемых источников

1. Астапович А. В. Теория математической обработки геодезических измерений. – СПб. : Изд-во СПбВВТКУ, 1997. – 199 с.

2. *Алексеев В. Ф.* Оперативный мониторинг гравитационного поля Земли в сейсмически опасных и тектонически активных регионах. – СПб. : Изд-во БГТУ, 2009. – 105 с.
3. *Левицкая З. Н.* Статистические модели аномальных характеристик гравитационного поля Земли // Гравиметрические исследования на море. – М. : Изд-во МГУ, 1988. – С. 26–46.
4. Точностные вопросы вычисления уклонений отвеса по сглаженным аномалиям силы тяжести / Л. П. Пеллинен [и др.] // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1980. – № 5. – С. 38–44.

А. В. Антропова;
В. В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
А. В. Лагун,
кандидат технических наук, доцент;
В. А. Харченко

ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА МЕТОДОМ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Представлены основные положения формирования системы оценивания свойства эффективности процессов функционирования космического ракетного комплекса и его показателя эффективности методом иерархической декомпозиции на основе теории фракталов, семантики, морфологического анализа и анализа размерностей. Предложенная система оценивания в своей основе содержит вектор свойства эффективности, имеющий в качестве аргументов четыре вектора: вектор показателей целей комплекса, вектор показателей ресурсопотребления, вектор временных показателей и вектор показателей информационно-интеллектуального обеспечения комплекса.

В статье также предложена еще одна альтернатива в решении проблемы агрегирования векторного показателя. В основу этой альтернативы положены результаты научно обоснованных решений в области дифференцируемого многообразия векторных пространств, позволяющих получить единственную дифференциальную структуру системы оценивания для многомерного векторного пространства.

Ключевые слова: концептуальная модель, система оценивания, фрактальная иерархия, семантика, свертка показателей, вектор показателей, агрегирование, облик комплекса, космический ракетный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт отечественной и мировой инженерно-конструкторской мысли свидетельствует о том, что космические ракетные комплексы (КРК), чаще всего, создаются на основе принимаемых концепций в виде ведущего замысла и (или) конструктивного принципа. Вместе с тем концепции (описания, построения, оценивания) КРК принимаются на основе логичных, но вербальных рассуждений.

Несмотря на то, что сегодня созданы теоретические основы внешнего проектирования КРК, теоретические положения системного анализа (системотехники) используются не в полной мере при их формировании. Как известно, облик создаваемого объекта формируется с позиции системного подхода, который является базой системного анализа и системотехники. При этом под обликом КРК принято понимать концептуальную модель, определяющую назначение комплекса, состав и структуру его целевых элементов, а также физические принципы реализации их функций, множество показателей основных свойств КРК.

Основными элементами, характерными для системного анализа КРК, являются цели создаваемой системы, которые она должна достигать в результате своего функционирования, а также потребляемые при этом ресурсы. Процесс внешнего проектирования КРК должен содержать процедуры поиска возможных альтернатив ее облика с последующими процедурами определения оптимальных решений. Актуальность рассмотренной в статье задачи подтверждается рядом работ, опубликованных в последнее время.

Так, в работе [1] рассматривается вопрос разработки математической модели для оценивания сложно формализуемых системных свойств КРК, таких как устойчивость и управляемость.

В статье [2] предложен подход к оценке КРК на ранней стадии разработки, а в информационно-аналитической системе реализована процедура многокритериальной оценки КРК, основанная на методах экспертных оценок.

В работе [3] предложен хорошо формализуемый подход, позволяющий оценить эффективность процесса функционирования сложной технической системы. Примечательно, что данный подход сводит к минимуму субъективность оценки процесса функционирования системы, в отличие от указанных выше.

В представленной здесь статье сделана попытка найти решение при построении концептуальной модели для оценивания эффективности процессов функционирования КРК.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ КРК

Как уже отмечалось, практика создания современных КРК не в полной мере использует положения системного анализа (системотехники), что является одной из причин, по которым создаваемые КРК не обладают желаемыми для практики свойствами. В основе такого подхода чаще всего лежит стремление создать систему на основе интуитивных представлений о ней или использования принципа «улучшение от достигнутого». Интуитивное формирование облика КРК, как правило, используется при создании относительно новых систем, а принцип «от достигнутого» чаще всего применяют при модернизации и модификации создаваемых объектов. Подход, фундаментом которого является интуиция, основан на имеющемся знании и полученном ранее опыте. Это приводило к таким концепциям создания КРК, как переоборудование уже созданных систем под другое назначение; унификация оборудования КРК; безопасность процессов функционирования систем; универсальность оборудования КРК. Практически для всех перечисленных выше концепций в качестве критерия их сравнения служил один показатель – стоимость функционирования системы. Как показала практика использования различных КРК, планы на снижение стоимостных показателей ее функционирования не всегда сбывались, а стоимость конечного целевого эффекта неуклонно росла. Разработанные научные положения системного анализа при формировании облика КРК включают этапы создания ряда основных моделей объекта, к которым можно отнести концептуальную модель. Данная модель предназначена для формирования следующих положений:

- концепций описания, построения и оценивания свойств системы;
- описания специальных принципов, на базе которых система будет функционировать.

Такие принципы призваны обеспечить конфигурацию следующих сочетаний:

- учета специфики объекта с критериями оценивания свойств объекта;
- учета показателей оценивания свойств объекта, алгоритмов их вычисления, а также формулировки понятий качества и свойств, с системой предпочтений, позволяющей перейти к моделям операций и структурам агрегатов, а также к системам создаваемого объекта.

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ФРАКТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КРК

Для КРК, как целеустремленной системы, на этапе внешнего проектирования характерно формирование целенаправленных процессов. Оценивание результатов формирования облика КРК целесообразно проводить с использованием свойства эффективности процессов функционирования (ПФ) системы и показателя ее свойства. Математическое выражение для показателя эффективности ПФ КРК связано с необходимостью решения определенных проблем.

Первая из таких проблем связана с тем, что показатель эффективности ПФ КРК представляет собой векторный показатель $Ef_{(n)}$, содержащий несколько векторных компонент. В ста-

ть в качестве таких компонент выбраны следующие компоненты: $\langle A_{\langle n_1 \rangle}, R_{\langle n_2 \rangle}, T_{\langle n_3 \rangle}, I_{\langle n_4 \rangle} \rangle$. Здесь $A_{\langle n_1 \rangle}$ – вектор показателей целей комплекса, $R_{\langle n_2 \rangle}$ – вектор показателей ресурсопотребления, $T_{\langle n_3 \rangle}$ – вектор временных показателей, $I_{\langle n_4 \rangle}$ – вектор показателей информационно-интеллектуального обеспечения проектируемой системы.

Вторая проблема сводится к определению вида показателя эффективности ПФ КРК. Она связана с тем, что множество каждого из перечисленных векторных компонент неизвестно.

Третья проблема связана с агрегированием векторного показателя в итоговую оценку, необходимую для принятия окончательного решения по формированию облика КРК.

Одной из задач, рассматриваемых в статье, является поиск структуры для системы оценивания функционирования КРК. Наиболее общей платформой для формирования структуры системы оценивания является топологическое пространство, для которого следует ввести метрику.

Поиск структуры при оценивании КРК может быть осуществлен посредством следующих рассуждений, в которых используются обозначения и понятия: знакосочетание теории T и терм теории T .

Схема конструкции ступени, где последовательность c_1, c_2, \dots, c_m пар натуральных чисел $c_i = (a_i, b_i)$ удовлетворяет следующим условиям:

- если $b_i = 0$, то $1 \leq a_i \leq i - 1$;
- если $a_i \neq 0$ и $b_i \neq 0$, то $1 \leq a_i \leq i - 1$ и $1 \leq b_i \leq i - 1$;
- если $c_i = (a_i, b_i)$, причем $a_i \neq 0$ и $b_i \neq 0$, то A_i есть терм $A_{a_i} \times A_{b_i}$.

Род структуры в теории T в виде текста Σ образован следующими выражениями:

– некоторое число букв x_1, \dots, x_n, s , различных между собой и отличающихся от констант теории T , при этом x_1, \dots, x_n являются основными базисными множествами рода структуры Σ ;

– некоторое число термов A_1, \dots, A_m теории T , в которых не встречается ни одна из букв x_i, s ; эти термы являются вспомогательными базисными множествами рода структуры Σ .

Типизация $T \langle x_1, \dots, x_n, s \rangle$: $s \in S(x_1, \dots, x_n, A_1, \dots, A_m)$, где S – схема конструкции ступени над $n + m$ термами, тогда $T \langle x_1, \dots, x_n, s \rangle$ есть типовая характеристика рода структуры Σ .

Соотношение $R \langle x_1, \dots, x_n, s \rangle$, переносимое в T при типизации T , в которой буквы x_i рассматриваются как основные базисные множества, а терм A_n – как вспомогательные базисные множества R , является аксиомой рода структуры Σ .

Полагая, что Σ – род структуры в теории T на n основных базисных множествах x_1, \dots, x_n с m вспомогательными базисными множествами A_1, \dots, A_m , а s – общая структура рода Σ , тогда T – некая схема конструкции ступени над $n + m$ термами. Если типовая характеристика Θ – другой род структуры в теории T на r основных базисных множествах u_1, \dots, u_r с p вспомогательными базисными множествами B_1, \dots, B_p , а $t \in T(u_1, \dots, u_r, B_1, \dots, B_p)$, тогда система из $r + 1$ термов P, U_1, \dots, U_p , внутренних для s , такая, что P является структурой рода Θ на U_1, \dots, U_p в теории T_Σ , называется способом вывода структуры рода Θ из структуры рода Σ .

Если T' является структурой более сильной, чем T и если в T' объект G является структурой рода Σ на E_1, \dots, E_n , то $P \langle E_1, \dots, E_n, G \rangle$ является структурой рода Θ на r множествах $F_j = U_j \langle E_1, \dots, E_n, G \rangle$ ($1 \leq j \leq r$), выведенной из G способом P , или структурой, подчиненной структуре G .

Предположим, что в Θ и Σ типовая характеристика, а также основные и вспомогательные множества базы одинаковы. Также допустим, что в T аксиома рода Σ влечет за собой аксиому рода Θ , при этом терм s есть способ вывода структуры Θ . Из этого можно сделать вывод, что образ Θ беднее, чем Σ . Таким образом, род топологической структуры беднее, чем компактное пространство, выраженное фрактальной структурой.

Последнее утверждение позволяет назначить направление поиска структуры системы оценивания КРК с использованием теории фракталов, которые нашли широкое применение в различных областях науки и технике [5, 6]. Результаты исследований (Пуанкаре, Смейл, Фридман, Перельман и др.) доказывают, что интересующее нас векторное пространство \mathbf{R}^4 может быть свернуто к сфере произвольно малого радиуса с численно значимой точкой в нем.

Целью данной статьи является исследование не столько КРК и его поведения в пространстве состояний, сколько система оценивания его свойств. Формирование единственной дифференциальной структуры векторного пространства \mathbf{R}^4 свойств КРК происходит на основе теории фракталов и в результате использования процедур отображения многомерного пространства вектора $Ef_{(n)}$

Для оценки свойств КРК можно получить устойчивую структуру пространств состояния для параметров свойств системы. Для этого предложено вводить фрактальные структуры, связывающие показатели свойств ПФ системы. В результате процедур сворачивания векторного пространства \mathbf{R}^4 для компонентов $\langle A_{(n_1)}, R_{(n_2)}, T_{(n_3)}, I_{(n_4)} \rangle$ к неподвижной точке (фрактальному аттрактору) удастся развернуть эту точку во фрактальную иерархическую структуру для компонентов показателя $Ef_{(n)}$. Для четырех векторных компонентов $\langle A_{(n_1)}, R_{(n_2)}, T_{(n_3)}, I_{(n_4)} \rangle$ после задания системы итерированных функций аффинных преобразований пространство \mathbf{R}^4 преобразуется к разным фрактальным структурам. При этом в качестве базовой фрактальной структуры в статье принят равносторонний шестиугольник, поскольку при названных преобразованиях устойчивыми структурами обладают пространства \mathbf{R}^n со значениями $n = 1, 2, 3, 5, 6, 12$. Также сделано допущение, что показатели свойств КРК, находящиеся на верхнем уровне иерархии системы оценивания, равнозначны по своему влиянию на показатель $Ef_{(n)}$ или что они равноудалены от аттрактора – показателя $Ef_{(n)}$ системы.

Элементы фрактальной структуры системы оценивания определяются количеством комбинаций, которые может дать исходный вектор частных свойств для свойства эффективности ПФ КРК. С этой целью использована процедура размещения для базовой четверки векторов $\langle A_{(n_1)}, R_{(n_2)}, T_{(n_3)}, I_{(n_4)} \rangle$

$$A_r^k = A(a_r^k) = \frac{k!}{(k-r)!}.$$

В результате получается следующее количество комбинаций компонентов вектора эффективности ПФ КРК. Так, комбинации по «три» компонента исходного множества

$$\langle A_{(n_1)}, R_{(n_2)}, T_{(n_3)} \rangle; \langle R_{(n_2)}, T_{(n_3)}, I_{(n_4)} \rangle; \langle A_{(n_1)}, T_{(n_3)}, I_{(n_4)} \rangle \dots \text{дают } \frac{4!}{(4-3)!} = 24 \text{ варианта.}$$

Для составления фрактальной системы оценивания эти компоненты распределены таким образом, что в центральной части этой системы находятся компоненты, начинающиеся с векторов показателей цели операции КРК:

$$ATI, ARI, ART, ARI, AIT, ATR,$$

что сделано на основании целевого подхода к целеустремленным системам.

Для периферийной части структуры использованы следующие компоненты:

$$RTA, RIA, RIT, RAT, RAI, RTI;$$

$$TAI, TRI, TIR, TRA, TAR, TIA;$$

$$IAT, ITA, IRA, IAR, ITR, IRT.$$

Часть периферийных компонентов, не содержащих вектор показателей цели операции КРК: $TRI, TIR, RIT, RTI, IRT, ITR$, расположена дальше от центра фрактальной структуры.

Комбинации по «два» компонента исходного множества

$$\langle A_{\langle n_1 \rangle}, R_{\langle n_2 \rangle} \rangle; \langle R_{\langle n_2 \rangle}, T_{\langle n_3 \rangle} \rangle; \langle T_{\langle n_3 \rangle}, I_{\langle n_4 \rangle} \rangle; \langle R_{\langle n_2 \rangle}, I_{\langle n_4 \rangle} \rangle \dots \text{дают } \frac{4!}{(4-2)!} = 12 \text{ вариантов.}$$

Однако, рассматривая комбинации по два компонента из трех для всех комбинаций можно видеть, что у 12 элементов по 2 компонента есть 12 «клонов».

Таким образом, общее количество парных комбинаций компонентов вектора эффективности составляет 144 элемента. Каждый из 144 парных элементов порождает два единичных элемента. В результате количество единичных свойств составляет 288 вариантов.

Начальный этап синтеза фрактальной структуры системы оценивания КРК дает 456 свойств (24+144+288), объединенных единой структурой.

Полученная центральная часть структуры системы оценивания показана на рис. 1–3.

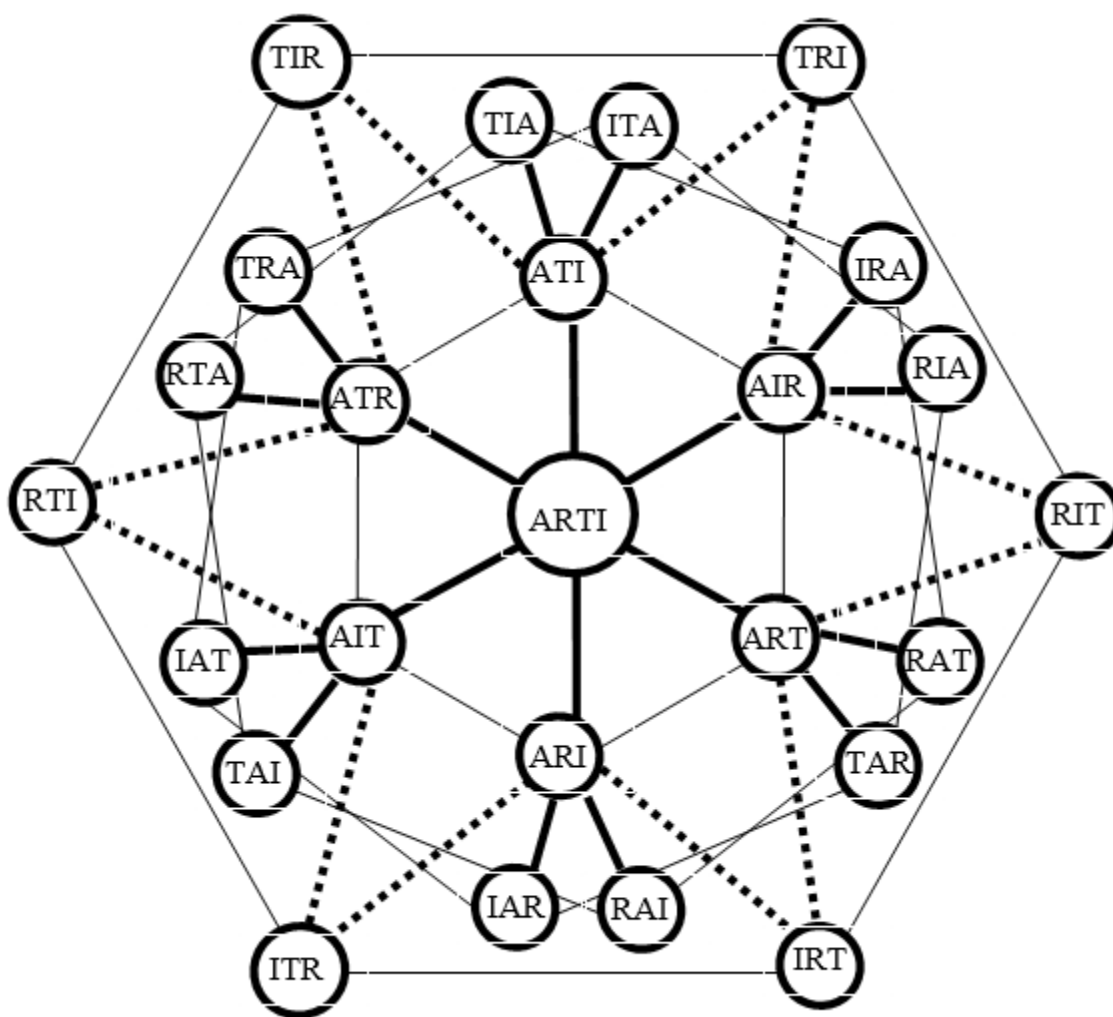


Рис. 1. Центральная часть фрактальной системы оценивания, содержащая трехкомпонентные составляющие. Шесть главных свойств – внутренний шестиугольник. Восемнадцать свойств – внешние шестиугольники, в которых контуры окружностей различают основные и «дочерние» свойства

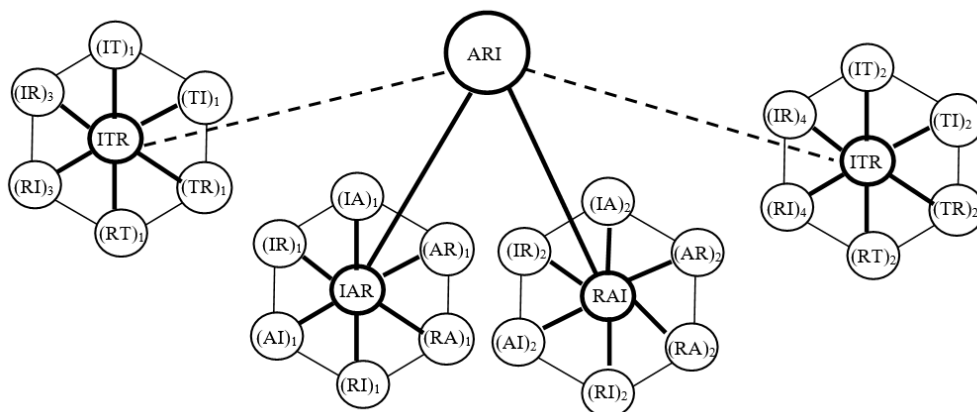


Рис. 2. Фрагмент первой периферийной части фрактальной системы оценивания, содержащей повторяющиеся двухкомпонентные составляющие

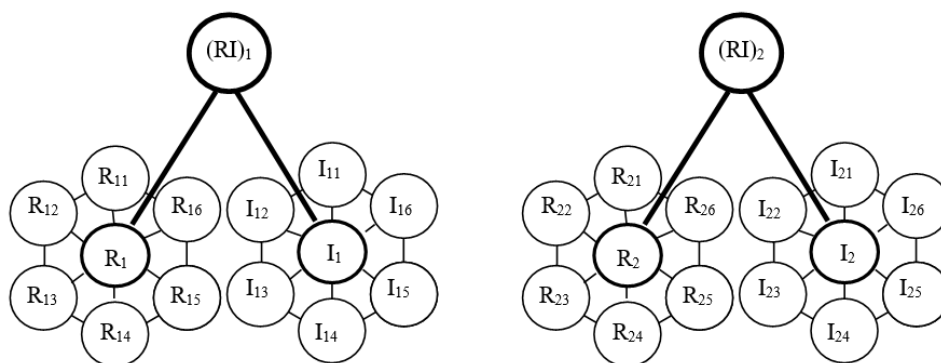


Рис. 3. Фрагмент второй периферийной части фрактальной системы оценивания, содержащей однокомпонентные составляющие, имеющие индивидуальную нумерацию

Надо обратить внимание на то, что существующая практика оценивания ПФ КРК ограничивается конечным числом вербально назначенных показателей. Вместе с тем следует отметить, что число показателей может быть ограничено уровнями предложенной иерархии тогда, когда иерархическая система оценивания будет содержать достоверные показатели свойств, не нуждающиеся в дальнейшей детализации.

Следующей проблемой формирования системы оценивания является задача идентификации полученных во фрактальной системе формальных показателей в их словесные описания. В этой статье мы делаем попытку остаться на абстрактном, обобщенном для КРК уровне, и с этой целью для начала попытаемся описывать «базовые» показатели (A, R, T, I) на понятийном уровне. Для этого мы будем использовать семантику понятий для показателей «базовых» векторов.

Семантика свойств КРК может служить путем для формализованного описания алгоритмов при создании комплексов. Этот путь отличает наличие определенных сложностей. К таким объективным сложностям следует отнести разногласия между эксплуатирующими организациями и предприятиями-изготовителями образцов технического оборудования КРК. Эти организации подчас по-разному понимают основополагающие понятия, на которых формируются технические задания и технические характеристики КРК.

В частности, в таких организациях до сих пор нет единого понимания для свойства эффективности. Одни из них свойство эффективности применяют к объекту, а другие – к ПФ этого

объекта. Преодоление разночтений между эксплуатирующими и конструкторскими организациями может быть основано на положениях семантической теории информации. Семантическая теория информации является тем инструментом, который позволяет определить значимость того или иного понятия, используемого в конструкторской и эксплуатационной документации.

Общепризнанными уровнями понимания должны стать известные, в первую очередь новые, фундаментальные научные положения, пока не нашедшие применения в практике написания руководящих нормативно-технических документов.

В предлагаемом здесь подходе формирования облика КРК следующим после информационно-семантического анализа свойств комплекса следует морфологический анализ понятий, цель которого заключается в выявлении определяющих физических параметров этих свойств. Выявленные таким образом определяющие физические параметры – это аргументы функций, описывающих поведение значимых свойств комплекса. В дальнейшем анализ размерностей, определяющих параметры свойств, позволяет перейти от абстрактных функций к уравнениям, на основании которых удастся получать численные значения для показателей соответствующих свойств.

При определении связей между свойствами и их показателями появляется возможность их агрегирования как в интегральное свойство, так и в интегральное значение этого свойства, т. е. значение показателя эффективности. Вместе с тем множество агрегируемых свойств может быть значительным, однако для этого множества целесообразно вначале выделить свойства, наиболее близкие по иерархии системы оценивания к свойству эффективности.

Таким образом, полученные комбинации основных компонентов вектора эффективности позволяют дать определение свойству устойчивости КРК (ARI). Оно включает в себя: свойство устойчивости пространств состояний и процессов перехода между дискретными состояниями при функционировании системы, проявляющееся в устойчивости как к внешним деструктивным воздействиям, так и к внутренним деградиационным процессам и свойство структурной устойчивости, проявляющееся в структурном совершенстве (аналог совершенного паросочетания в теории графов), способности к динамизму структурной архитектуры системы и структурной автономности.

Обсуждая свойство помехоустойчивости, следует отметить, что семантика этого свойства не ограничена информационными помехами. Для этого свойства характерны и помехи в функционировании системы, связанные с его повреждениями, как с внутренними (эксплуатационными), так и с внешними – деструктивными.

Таким образом, свойство помехоустойчивости следует рассматривать более широко и заменить его на свойство безопасности. Такое рассуждение основано на том, что для всех КРК характерно свойство безопасности процессов их функционирования.

Свойство безопасности используется во всех направлениях целенаправленной деятельности начиная с государства, включая военную безопасность, информационную безопасность, производственную безопасность, продовольственную безопасность, пожарную безопасность и т. д. Сегодня в различных технических системах понятие безопасности является важнейшим и используется для оценивания полетов летательных аппаратов, плавания морских и речных судов, а также в компьютерных программах и т. д.

В отношении КРК безопасность – единственное свойство, для которого принят даже федеральный закон о промышленной безопасности. Высокая общность свойства безопасности позволяет включить его в верхний уровень свойств при оценивании эффективности ПФ.

Исходя из вышеизложенного в статье предлагается следующее определение свойства безопасности КРК.

Безопасность КРК (AIR) – комплексное свойство, характеризующее способность достигать назначенные цели операции в различных условиях эксплуатации и содержащее такие свойства, как успешность и рискованность операции. В частности, в рамках трактовки свойства безопасности свойство рискованности трактуется нами следующим образом.

Рискованность КПК (IRA) – свойство системы, оценивающее информационные, ресурсные и временные затраты на восстановление качества функционирования системы при возможных неблагоприятных внешних и внутренних воздействиях на нее.

Рассматривая с тех же позиций свойство управляемости, в статье принято следующее определение для этого свойства.

Управляемость КПК (АП) – комплексное свойство, характеризующее способность по выработке решений для формирования управляющих воздействий, выполняемых оперативно и без искажения, содержащее такие свойства, как успешность и оперативность.

Следующим свойством из верхнего уровня представленной иерархической системы оценивания нами назначено свойство достижимости. Для этого свойства в статье принято определение, приведенное ниже.

Достижимость КПК (АТР) – комплексное свойство, характеризующее способность приобретать минимально необходимые, но достаточные значения показателей цели операции без ограничений на ресурсные и временные затраты, содержащее такие свойства, как обеспеченность и возможность.

Для комбинации векторов (ART) принято свойство совершенности. *Совершенство КПК (ART)* – комплексное свойство, характеризующее возможность достигать эталонные значения показателей цели операции при минимальных ресурсных, временных затратах, содержащее такие свойства, как достижимость и уверенность.

Шестым свойством верхнего уровня в статье принято свойство самоорганизованности. Для этого свойства сформулировано следующее определение.

Самоорганизованность КПК (АП) – комплексное свойство, содержащее такие свойства, как интеллектуальность и адаптивность.

Таким образом, выполненный семантический анализ для свойства эффективности позволяет идентифицировать полученные ранее шесть наиболее важных «троек» компонентов свойства эффективности, которые показаны на рис. 4.

Переход от словесного описания свойств эффективности ПФ КПК к формированию математических зависимостей показателей этих свойств может быть успешно выполнен на основе морфологического анализа, который формирует центральную информацию этих свойств, записанную в виде измеряемых параметров.

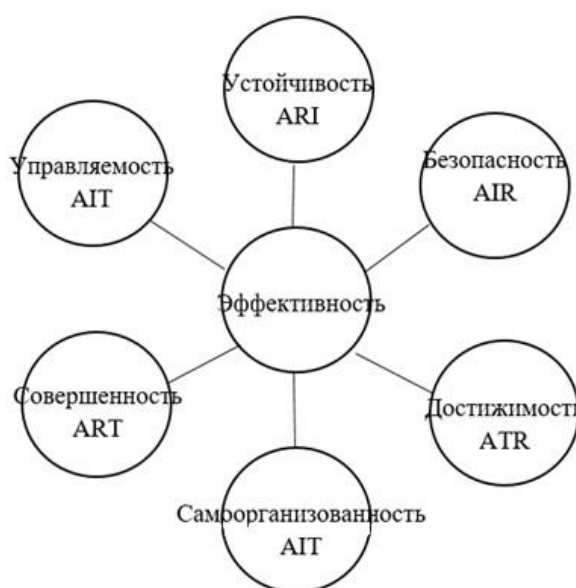


Рис. 4. Результаты семантического анализа свойства эффективности

Центральная информация каждого из рассматриваемых свойств представляет собой набор определяющих это свойство измеряемых параметров. Например, таких как работа, энергия, масса, длина, сила тока, напряжение и т. д.

С помощью методов анализа размерности, включающих л-теорему удается сформировать выражение для расчета соответствующего показателя. Так, например, можно проследить цепочку свойств, представленных на рис. 5.

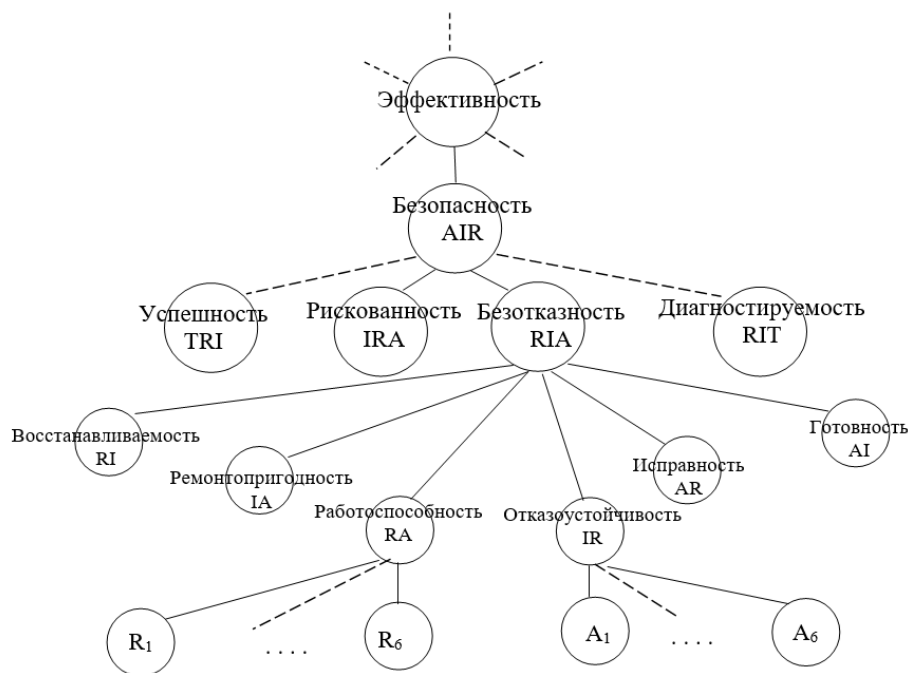


Рис. 5. Фрагмент иерархии свойств показателя эффективности

В соответствии с полученной иерархией для показателя эффективности (Ef) можно записать выражение $Ef = f_1(\dots, \dots, S_a, \dots, \dots)$, где, в частности, S_a — это показатель безопасности.

Для показателя безопасности S_a его значение рассчитывается по соотношению $S_a = f_2(\dots, Nf, \dots)$, где Nf — показатель безотказности, который формируется в виде зависимости, содержащей, в частности, показатели работоспособности Jo и показатели свойств восстанавливаемости (RI), ремонтпригодности (IA), отказоустойчивости (IR), исправности (AR), готовности (AI) в виде функции

$$Nf = f_3(Jo, \dots, \dots, \dots, \dots).$$

В свою очередь, показатели парных свойств RA, RI, IA, IR, AR, AI формируются из одних свойств. Например, для показателя работоспособности Jo (RA) формируется из показателей потребных ресурсов R_i и показателей цели A_i .

В качестве потребных ресурсов R_i могут выступать потребные ресурсы для производства изделия, показатели стоимости, параметры конструкционных материалов, параметры энергопотребления и т. д., а в качестве показателей цели могут стать назначенные вероятностные показатели достижения цели и назначенные показатели ресурса и т. д.

В результате показатель работоспособности рассчитывается по соотношению

$$Jo = f_2(R_i, A_i) \quad i = 1 \dots 6.$$

Таким образом, фрактальная иерархическая система оценивания эффективности ПФ КРК, первоначально наполненная компонентами вектора эффективности, в дальнейшем получает словесное описание его компонентов.

Если на верхние уровни иерархии записать формальные соотношения для показателей свойств – достаточно сложная задача, то начиная со следующего уровня иерархии такая задача представляется возможной. Для этого и низлежащих уровней иерархии показатели свойств КРК обретают математическую оболочку, позволяющую получить численные значения как отдельных компонентов, так и само значение показателя эффективности. С этой целью используется алгоритм агрегирования показателей, описанный в работе [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика формирования системных показателей фрактальной системы оценивания КРК доказывает, что множество свойств, определяющих свойство эффективности, является открытым. Однако это множество может быть ограничено в том случае, когда удастся для периферийных свойств получить показатели с достоверными оценками.

Кроме того, опираясь на численные значения показателя эффективности ПФ КРК и значения частных показателей его свойств, представляется возможным использовать словесные описания этих свойств для обоснованного назначения концепции создания КРК. Такое назначение концепции выбирается исходя из значения показателя, который обеспечивает наиболее значительный прирост эффективности ПФ КРК.

Список используемых источников

1. Орлов А. С., Андреев Е. А., Шевченко Е. В. Методика оценивания качества функционирования сложных технических систем // Наука, техника и образование. – 2020. – № 9(73). – С. 30–36.
2. Полтавский А. В., Семенов С. С. Подход к оценке сложных технических систем на ранней стадии разработки // Онтология проектирования. – 2021. – Т. 11, № 1(39). – С. 104–116.
3. Лисицкий В. В., Дяченко С. И., Железняков Ю. В. Подход к оценке эффективности сложных технических систем с помощью обобщенных рядов Грама – Шарлье // Фундаментальные исследования. – Саратов, 2017. – № 3. – С. 48–52.
4. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. Оценка эффективности информационно-телекоммуникационных систем / под ред. д-ра техн. наук А. А. Зацаринного. – М. : НИПКЦ «Восход-А», 2020. – С. 297–301.
5. Анарова Ш. А., Иброхимова З. Э., Саидкулов Э. А. Метод R-функция и построение уравнений фракталов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – Ташкент, 2021. – № 4(34) – С. 36–46.
6. Анарова Ш. А., Садуллаева Ш. А., Иброхимова З. Э. Построение уравнения сложных фрактальных структур на основе метода R-функций (RFM) // Автоматика и программная инженерия. – Новосибирск, 2020. – № 3. – С. 24–36.
7. Агрегирование показателей свойств сложных технических систем на основе информационной свертки / В. В. Козлов [и др.] // Информация и Космос / под общ. ред. С. П. Присяжнюка. – СПб., 2018. – Т. 3. – С. 44–48
8. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – М. : Машиностроение, 1988. – Т. 3 : Эффективность технических систем. – 328 с.

К. Б. Болдырев,
кандидат технических наук, доцент;
А. Ю. Карчин;
А. И. Петухов

ОБОСНОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ЭНЕРГОМАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ СВЕРХЛЕГКОГО КЛАССА

В статье представлены результаты исследования проблемных вопросов совершенствования энергомассовых характеристик ракет-носителей сверхлегкого класса (РН СЛК). По результатам проведенного анализа систематизирован перечень технических и экономических признаков, формирующих облик перспективной ракеты-носителя сверхлегкого класса. Рассмотрены основные признаки: спасение элементов РН, использование альтернативных систем подачи топлива, применение современных материалов и аддитивных технологий.

Проведен анализ возможных технических решений по каждому признаку, выделены ключевые проектные параметры, определяющие эффективность принимаемых технических решений.

Ключевые слова: ракета-носитель, система спасения элементов ракетных блоков, полезный груз, электронасосный агрегат, вытеснительная система подачи топлива, аддитивные технологии, углепластик.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность создания ракет космического назначения (РКН) сверхлегкого класса подтверждается динамичным ростом производства и запуска малых космических аппаратов. Во многих странах мира наблюдается развитие мини- (массой 100–500 кг), микро- (10–100 кг) и нано- (1–10 кг) космических аппаратов.

Малые космические аппараты (МКА) класса «нано» в основном могут использоваться для решения образовательных задач и для отработки новых технологий. Активное их использование тормозится из-за ограниченного функционала, малого срока службы (недели и месяцы) и низкой стоимости. Перспективными с точки зрения максимальной востребованности в настоящее время представляются космические аппараты класса «микро», которые позволяют решать серьезные научные и прикладные задачи и имеют срок службы от 1 до 5 лет и выше, а также сравнительно небольшую удельную стоимость. Рост потребности в таком классе космических аппаратов обусловлен актуальностью видовой информации в интересах обороны, сельского хозяйства, градостроительства, мониторинга чрезвычайных ситуаций. Уже в ближайшем будущем, сохраняя массогабаритные характеристики, МКА класса «микро» обеспечат пространственное разрешение 2,5 м, а для специализированных спутников массой порядка 100 кг оно достигнет 1 м. Так, Израилем была представлена информация по проекту недорогого «тактического» микроспутника *LiteSat* (разработчик – компания *RAFAEL*) массой 85 кг, сроком существования семь лет, с новой оптико-электронной системой, способной делать снимки с разрешением лучше 1 м. США рассматривают программу разведывательного спутника *Kestrel Eye* (разработчик – *IntelliTech Microsystems Inc*) массой 8 кг, способного получать изображения с пространственным разрешением 1,5 м.

Таким образом, сейчас на первый план выходят задачи проектирования и совершенствования средства выведения космических аппаратов массой до 200 кг. На этапе проектирования РКН, а также на других этапах и стадиях жизненного цикла необходимо проводить работы по совершенствованию характеристик средства выведения. Одной из определяющих характеристик РКН является ее массовое уравнение, связывающее активную и пассивную массы РКН с массой полезного груза. Взаимосвязь энергетических характеристик РКН и распределения масс возможно установить, сформировав ее энергомассовую модель.

Основными направлениями совершенствования энергомассовых характеристик ракет-носителей сверхлегкого класса представляются пути, направленные на применение систем спасения ракетных блоков; замену традиционных материалов, используемых уже 50 лет в составе элементов корпуса ракетных блоков, на более легкие; выбор силового набора, соответствующего современным возможностям производства.

Указанные направления формируют массив альтернативных технических решений. Облик РКН в целом представляет собой совокупность i -х признаков $\Pi\{P_i\}$, которые определяют качественные особенности средства выведения. Каждый признак облика определяется альтернативными j -ми техническими решениями $\{P_{ij}\}$ и их проектными параметрами $\{p_k\}$, которые характеризуют РКН со стороны определенного качества. Формирование матрицы всех альтернативных решений $\Pi\{P_{ij}\}$ представляет собой актуальную научную задачу [1]. В данной статье сформирован облик матрицы альтернативных проектных решений

$$\Pi \left\{ \begin{array}{l} P_{СП} \{P_{СПk}\} \\ P_{СПГ} \{P_{СПГn}\} \\ P_{МТ} \{P_{МТm}\} \end{array} \right\},$$

определяющих в качестве признаков: спасение элементов РН, использование альтернативных систем подачи топлива, применение современных материалов и аддитивных технологий.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ЧАСТИЧНОГО ИЛИ ПОЛНОГО СПАСЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ СВЕРХЛЕГКОГО КЛАССА

На сегодняшний день известно несколько способов спасения элементов ракетных блоков (рис. 1.).

Обеспечение спасения первой ступени РН позволят не только сократить районы падения отделившихся частей, но и, как следствие, позволят пускать ракеты с другим наклоном, а значит, появятся дополнительные энергетические возможности для вывода на орбиту КА и восполнения орбитальной группировки для различных целей.

Вместе с тем спасаемость первой ступени дает возможность создать площадку для запуска КА ближе к заводам-изготовителям и заводам по производству компонентов ракетного топлива, чем существующие космодромы, так как первая ступень не будет представлять опасности для близлежащих населенных пунктов. В результате сократится полный цикл – от создания РН до ее пуска.

Ракетодинамический способ. Это способ посадки первой ступени за счет ее торможения маршевыми двигателями ракетного блока. Данный способ уже успешно отработан и неоднократно испытан американской компанией *SpaceX*. Основной особенностью такого способа является затрата топлива на посадку ступени, которое могло бы быть использовано для увеличения массы полезного груза, выводимого на орбиту. Активная масса, входящая в энерго-массовую модель, перераспределяется в пассивную, что приводит к уменьшению относительной массы полезного груза $\bar{m}_{пг}$ до 40% по сравнению с неспасаемой ступенью.

Парашютный способ. Использование парашютов для спасения ступени РН – самый простой способ и, как следствие, самый надежный, однако для осуществления мягкой посадки ступени необходимо использовать множество парашютов, соответственно, их вес будет значительным. Кроме того, данный способ не решает проблему отказа от аренды районов падения отделившихся частей.

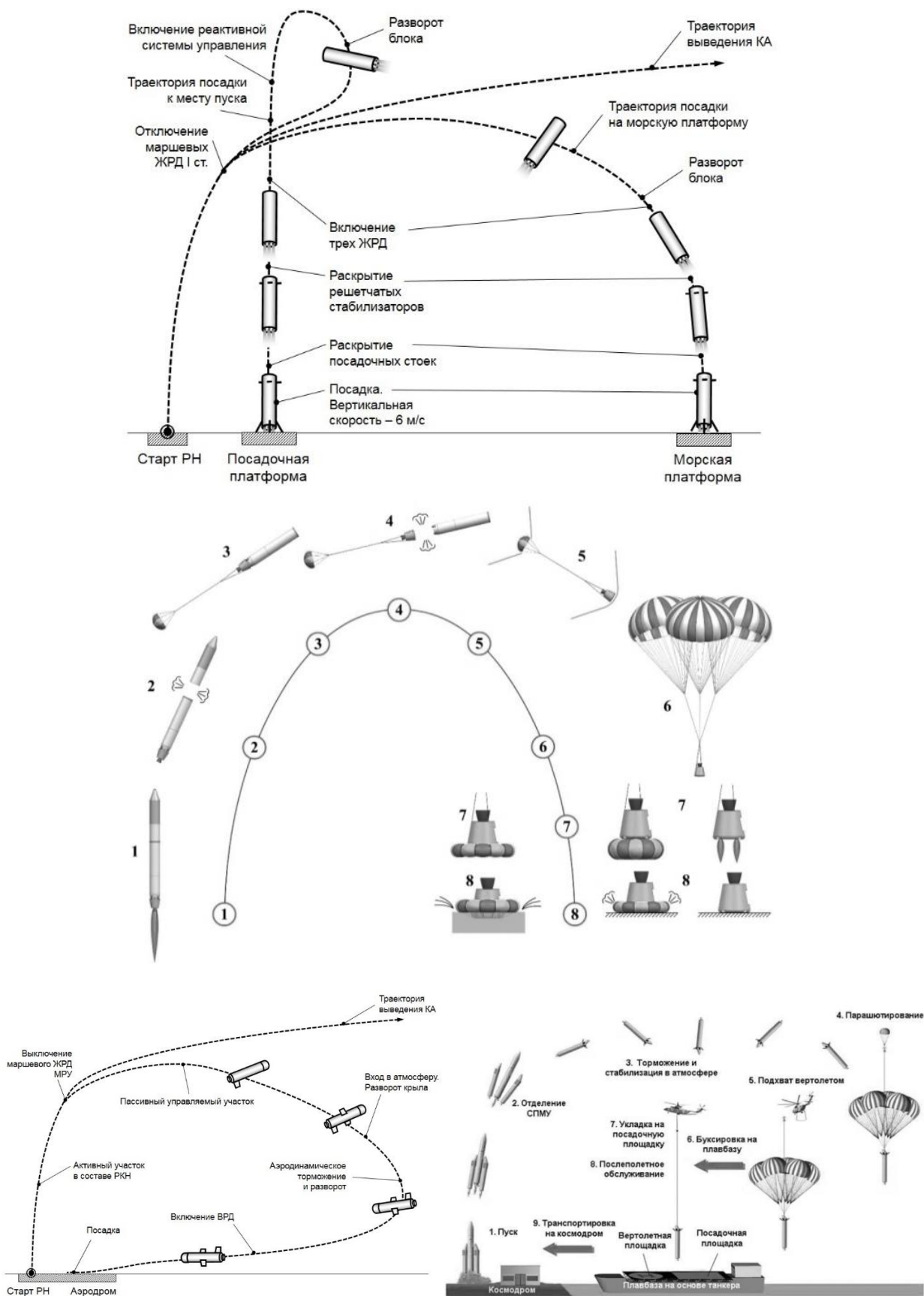


Рис. 1. Способы спасения элементов ракетных блоков РН

Способ вертолетного подхвата. Данный способ позволяет спасти ступень РН при помощи вертолета, который подцепляет спускающуюся на парашюте ступень. Указанный способ уже успешно отработан советскими летчиками при подхвате спускающихся капсул с информацией, сброшенных с орбиты. Кроме того, этот способ был успешно отработан компанией *RocketLab*. Вертолетный подхват позволяет тратить топливо лишь на разворот ступени в нужном направлении и на гашение скорости для безопасного раскрытия парашютов. Сами же парашюты не настолько тяжелые, как при использовании простого парашютного способа, а также исключают финансовые затраты на аренду зон отчуждения для падения отделившихся частей. Применение парашютного и вертолетного способов приводит к уменьшению относительной массы полезного груза $\bar{m}_{\text{пг}}$ до 15% по сравнению с неспасаемой ступенью.

Использование жестких крыльев для спасения ступени. Применение такого способа позволяет использовать все топливо для выведения полезного груза, однако, как показывает конструкторский опыт, масса данного крыла занимает порядка 20% от массы ступени, иными словами, сильно возрастает сухая масса ступени, что ограничивает относительную массу полезного груза, выводимого на орбиту, до 35%.

Указанные способы спасения ракетных блоков и элементов корпуса ракет-носителей могут быть направлены только на снижение удельной стоимости выведения полезного груза, что возможно реализовать при выполнении условий увеличения частоты запусков и суммарной массы полезного груза, сокращения объема и повышения эффективности проведения межполетного диагностирования и обслуживания. В качестве совокупности технических решений $P_{\text{ПГСП}}$ может быть рассмотрена совокупность технических решений, оцениваемых стоимостью одного полета средства выведения, которая складывается из проектных параметров: стоимости пуска $p_{\text{ПУ}}^C$ (себестоимость РН, расходные материалы, стоимость работы расчета пуска и управления), стоимости КА $p_{\text{КА}}^C$, стоимости межполетного обслуживания $p_{\text{МПО}}^C$. Условия, приводящие к приемлемому снижению удельной стоимости полезного груза, могут быть достигнуты только для ракет-носителей тяжелого и среднего класса. Применительно к средствам выведения СЛК использование спасаемых элементов может не дать положительного результата, так как относительная масса полезного груза этого класса ракет ниже и относительные потери будут выше, также возможен рост стоимости межполетного обслуживания.

Таким образом, признак облика РН СЛК по спасению элементов ракет-носителей может быть представлен в виде

$$P_{\text{СП}} \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{СПРД}} < p_{\text{ПУ}}^C p_{\text{КА}}^C p_{\text{МПО}}^C > \\ P_{\text{СППарашют}} < p_{\text{ПУ}}^C p_{\text{КА}}^C p_{\text{МПО}}^C > \\ P_{\text{СПКрыло}} < p_{\text{ПУ}}^C p_{\text{КА}}^C p_{\text{МПО}}^C > \\ P_{\text{СПВертолет}} < p_{\text{ПУ}}^C p_{\text{КА}}^C p_{\text{МПО}}^C > \end{array} \right\}.$$

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА РН СЛК

Современные технологии позволяют производить различные детали и элементы конструкций из углепластика, который обладает прочностью, не уступающей прочности традиционных материалов, используемых в ракетостроении, таких как АМг6 и Д16, но при этом имеет меньшую массу, что позволяет повысить коэффициент конструктивного совершенства ракеты.

В табл. 1 представлены некоторые свойства углепластика, которые сравниваются с другими конструкционными материалами, применяемыми в РКТ.

Таблица 1

Свойства материалов, применяемых в РКТ

Материал	Предел прочности, σ_B , МПа	Плотность, ρ , кг/м ³	Удельная прочность, $\frac{\sigma_B}{\rho} \cdot 10^3$, м ² /с ²
1. Алюминиевый сплав (АМг6)	400	2640	0,152
2. Титановый сплав (BT23)	1600	4443	0,360
3. Нержавеющая сталь (12Х18Н10Т)	650	7920	0,082
4. Органопластик	1500	1200	1,250
5. Стеклопластик	1700	1600	1,063
6. Углепластик	1700	1300	1,308
7. Бороалюминий	800	750	1,067

Масса конструкции РН СЛК во многом определяется не величинами действующих нагрузок, а технологическими ограничениями по возможности изготовления. В таких условиях в приоритете выбора конструкционного материала на первое место выходят не прочностные свойства, а плотность. Угле- и органопластики с плотностью 1200–1700 кг/м³ сочетают в своих физических свойствах как высокую прочность, так и низкую плотность.

В России в настоящее время производством углеродного волокна занимаются ООО «Завод углеродных и композиционных материалов» (г. Челябинск), ООО «Балаково Карбон Продакшн» (г. Саратов), ООО «СНВ» (г. Саратов). Современное состояние отечественной промышленной базы на данный момент не позволяет в полной мере удовлетворить требования по прочности, легкости и герметичности конструкционных материалов.

С энергетической точки зрения производство углепластика в 5 раз эффективнее, чем производство того же алюминия, однако суммарная стоимость углепластика выше стоимости традиционных материалов, что объясняется высокой требовательностью углепластика к его производству, а именно высокой точностью производства и контролем качества, а также высокой стоимостью оборудования.

Перспективной альтернативой алюминий-магниевого сплавов становятся сплавы алюминий-литиевые (01460) или сплавы со скандием (01570С, Р-1580). По плотности, свариваемости и пластичности Р-1580 аналогичен АМг-6, но имеет более высокий предел прочности при стоимости значительно ниже, чем стоимость сплавов скандия 01570С.

Другим аспектом применения современных технологий является развитие аддитивных методик создания элементов конструкции ракетных блоков. Это направление позволяет изменить подход к построению силового набора топливных баков и других конструкционных элементов, подверженных интенсивным силовым нагрузкам. Раскрываются широкие возможности при проектировании равнопрочных элементов, в которых критичным является свойство неизменности свойств материала по длине. Применительно к ракетным блокам РН СЛК аддитивные технологии эффективны в камерах и турбонасосных агрегатах жидкостного ракетного двигателя (ЖРД).

В качестве признака совокупности технических решений P_{MT} , раскрывающих вклад современных материалов и технологий в формирование совокупности решений РН СЛК, может быть рассмотрена совокупность технических решений, определяемых проектными параметрами, с помощью которых можно определить предел прочности конструкционного материала p_σ , плотность конструкционного материала p_ρ . Таким образом, признак облика РН СЛК по применению новых материалов элементов ракет-носителей может быть представлен в виде

$$P_{\text{МТ}} \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{МТ Сплав}} < p_{\sigma} p_{\rho} > \\ P_{\text{МТ Углепластик}} < p_{\sigma} p_{\rho} > \end{array} \right\}.$$

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СИСТЕМ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Работа химических ракетных двигателей основана на преобразовании химической энергии в тепловую и в итоге – в кинетическую энергию реактивной струи продуктов сгорания. Этот процесс требует значительного повышения давления компонентов ракетного топлива на входе в камеру сгорания относительно давления в топливных баках. Величину перепада определяет давление в камере сгорания, которое в то же время определяет тягу ракетного двигателя и его удельные характеристики. Традиционно используются ракетные двигатели, устанавливаемые на носители всех классов – от легкого до сверхтяжелого, они имеют насосную систему подачи топлива с разными вариантами генерации рабочего тела для вращения турбины. Такой вид системы подачи топлива (СПТ) для указанного типа ракет является оптимальным, хотя имеет ряд недостатков, основными из которых являются: необходимость использования дополнительных огневых агрегатов, расходование части компонентов ракетного топлива на работу турбины, необходимость использования дополнительного рабочего тела [2].

Для носителей СЛК требования по величине тяги снижаются до уровня, когда становится возможным рассмотреть альтернативу насосной СПТ, повышающие надежность и снижающие стоимость выведения. К таким вариантам относятся электронасосные и вытеснительные СПТ.

Вытеснительная система подачи топлива (ВСПТ) является наиболее простой, но и наименее совершенной в весовом отношении: масса вытесняющего газа и стенок баков, нагруженных избыточным давлением, превышающим давление в камере сгорания двигателя, получается относительно большой. Недостатки ВСПТ нивелируются возможностью получения высоких удельных импульсов не за счет роста давления в камере сгорания ЖРД, а за счет увеличения степени расширения сопла. Простота ВСПТ служит основанием для рассмотрения ее в качестве главной такой системы при создании РН СЛК. Однако ее применение может иметь положительный эффект лишь при сочетании двух факторов:

- использования топливных пар, дающих повышенный удельный импульс (жидкий кислород – сжиженный природный газ (метан), жидкий кислород – жидкий водород, жидкий кислород – пропилен и т. п.);
- использования высокопрочных материалов, в том числе композитов, для изготовления баков [3].

Применение ВСПТ не только возможно, но и целесообразно в небольших верхних ступенях РН СЛК, где данное решение может обеспечить даже выигрыш в массе конструкции при более низкой стоимости, чем стоимость насосной СПТ [4].

В электронасосной СПТ (ЭСПТ) используются центробежные насосы, которые приводятся во вращение электродвигателем. Применение такого типа насосов требует подвод значительной энергии для их вращения. По причине отсутствия относительно легких и мощных электродвигателей развитие этого вида СПТ не происходило. Современные технические достижения позволяют вернуться к рассмотрению эффективности использования ЭСПТ на РН СЛК. Современные электродвигатели, не имеющие коллектор, отличаются высокими массогабаритными характеристиками. Небольшие двигатели российского производства мощностью 1–4 кВт имеют удельную массу порядка 0,33–0,35 кг/кВт, что втрое мощнее, чем у четырехтактных двигателей близкой размерности. У двигателей мощностью до 100 кВт удельные параметры могут быть еще выше. Главным недостатком электронасосного агрегата является обязательное наличие аккумуляторов для его привода, а это, в свою очередь, озна-

чает наличие дополнительной пассивной массы. Таким образом, применение АКБ, с одной стороны, увеличивает удельный импульс двигателя, что приводит к снижению относительной массы топлива и позволяет увеличить массу ПГ, с другой стороны, возрастание массы АКБ увеличивает пассивную массу, что повлечет за собой снижение массы ПГ [5].

В качестве признака совокупности технических решений $P_{СПТ}$, учитывающих влияние СПТ на энергомассовые характеристики РКН, может быть рассмотрена совокупность технических решений, определяемых проектными параметрами, благодаря которым возможно назначить относительную массу системы повышения давления на входе в камеру ракетного двигателя $p_{m СПТ}$. Таким образом, признак облика РН СЛК по применению альтернативных СПТ может быть представлен в виде

$$P_{СПТ} \left\{ \begin{array}{l} P_{СПТ \text{ Вытесн}} < p_{m СПТ} > \\ P_{СПТ \text{ ЭНА}} < p_{m СПТ} > \end{array} \right\}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного анализа был систематизирован перечень технических и экономических признаков, формирующих облик перспективной ракеты-носителя сверхлегкого класса. Проведен анализ возможных технических решений по каждому признаку, выделены ключевые проектные параметры, определяющие эффективность принимаемых технических решений.

Сформированная матрица альтернативных проектных решений может быть использована при формировании тактико-технического задания на разработку новых обликов ракетно-космических комплексов на основе РН СЛК в процессе проектирования и производства.

Список используемых источников

1. Гусейнов А. Б., Трусев В. Н. Модели формирования облика малозаметных летательных аппаратов. – М. : МАИ, 2017. – 404 с.
2. Болдырев К. Б., Карчин А. Ю. Совершенствование энергомассовых характеристик ракет-носителей со спасаемой первой ступенью путем применения системы перелива ракетного топлива // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 684. – С. 189–193.
3. Особенности анализа телеметрической информации о перегрузках, получаемой при летной эксплуатации изделий ракетно-космической техники / А. Ю. Бондаренко [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – № 4(109). – С. 48–53.
4. 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.
5. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 461 с.

К. Б. Болдырев,
кандидат технических наук, доцент;
А. Ю. Карчин;
А. И. Петухов

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ОРЕБРЕНИЯ ВАФЕЛЬНЫХ ОБЕЧАЕК НЕСУЩИХ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ РАКЕТНЫХ БЛОКОВ

В статье показан сравнительный анализ параметров несущей способности обечаек топливных баков ракетных блоков, представляющих собой цилиндрические подкрепленные тонкостенные оболочки. Работа посвящена определению оптимальных геометрических параметров оребрения обечаек вафельного типа топливных баков в целях минимизации пассивной массы ракетных блоков, входящих в состав ракет космического назначения.

Ключевые слова: ракетный блок, топливный бак, несущая способность, ребра жесткости, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Корпус ракетного блока включает в себя топливные баки, сухие отсеки и рамные вспомогательные конструкции. Топливные баки занимают до 80% объема корпуса ракетноносного блока. В современных ракетных блоках топливные баки являются несущими, воспринимающими все нагрузки, которые действуют на ракетный блок на всех этапах эксплуатации [1]. Для увеличения относительной массы полезной нагрузки ракеты-носителя (РН) необходимо снижение ее пассивной массы, в которую входит масса корпуса. Снижение массы корпуса является одной из приоритетных задач проектирования ракетно-космической техники.

Условием повышения несущей способности конструкции корпуса является увеличение площади поверхности действия силовых факторов. Снижение значений возникающих напряжений, действующих в гладкой обечайке (рис. 1,а), достигается увеличением ее толщины, однако при заданных прочности и жесткости конструкции это приводит к увеличению ее массы, а следовательно, ухудшению конструктивного совершенства РН в целом и снижению ее энергетических характеристик [2].

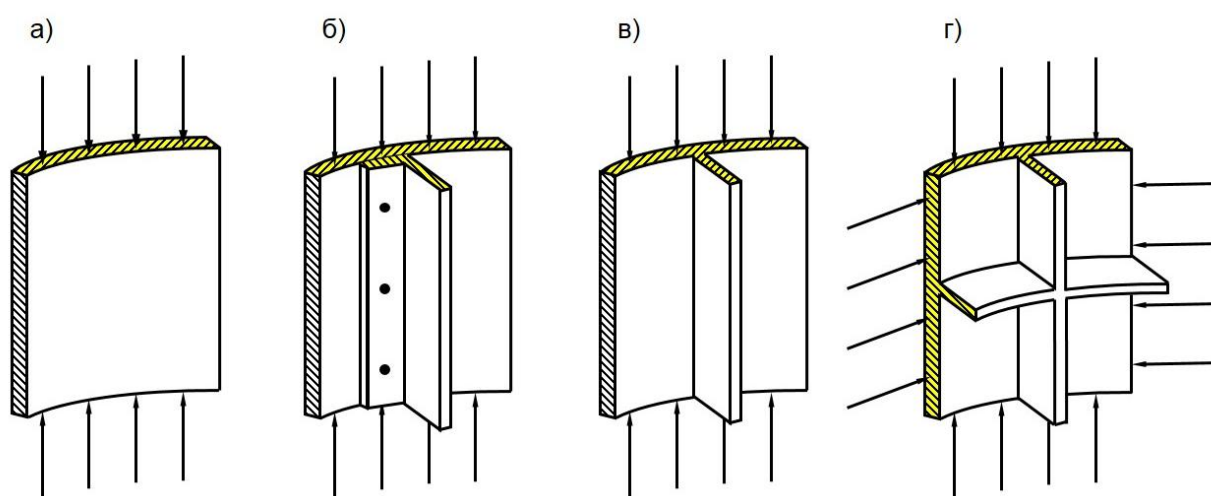


Рис. 1. Фрагменты нагружения обечаек с различными видами силового набора:
а – гладкая; б – стрингерная; в – оребренная; г – вафельная

В настоящее время в ракетостроении широко применяются силовые элементы, подкрепляющие обечайку топливных баков (см. рис. 1,б-г) с целью повышения их несущей способности. Еще в начале 60-х годов прошлого столетия в КБ «Салют», в процессе проектирования топливных баков МБР УР-200, впервые в СССР была предложена и реализована конструкция обечайки бака с частой сеткой подкрепляющих ребер жесткости, получившая впоследствии название «вафельной» (см. рис. 1,г) [6]. Так, например, для конструктивно-ортотропной цилиндрической оболочки расчетные нагрузки, при которых происходит потеря устойчивости вафельной обечайки, в 3 раза больше аналогичных нагрузок для гладкой обечайки той же массы [4]. Вафельные обечайки были применены на изделиях 8К82К, 8К84, 11К77, 11К25, 14А05. В топливных баках новейших отечественных РН модульного типа 14А125 и 14А127, кроме бака «Г» УРМ-2, также используются секционные обечайки вафельного типа [5].

Решение задачи массовой оптимизации, актуальной для конструкции ракетодинамических летательных аппаратов, сводится к определению геометрических параметров ребер жесткости при заданных показателях несущей способности конструкции в различных условиях нагружения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО ВИДА ОРЕБРЕНИЯ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ОБЕЧАЕК ВАФЕЛЬНОГО ТИПА

Под вафельной обечайкой понимают конструктивно-ортотропные оболочки с часто расположенными подкрепляющими силовыми элементами, изготовленными «зацело» с оболочкой.

В отечественном ракетостроении традиционно применяются вафельные обечайки с меридионально-окружным расположением ребер (рис. 2,а), у которых шаг и толщина меридиональных и окружных ребер одинаковы: $a = b$, $s = c$. В зарубежном ракетостроении применяются вафельные наклонные обечайки с расположением ребер под углом 45° к образующей (рис. 2,б) [3].

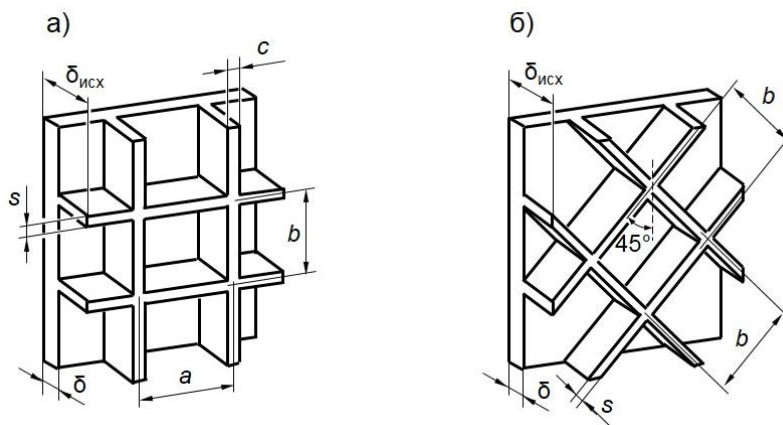


Рис. 2. Конструктивный вид вафельных обечаек с различным расположением ребер: а – меридионально-окружным; б – наклонным под углом 45° к образующей

Расчет вафельных обечаек в условиях деформации растяжения под действием внутреннего избыточного давления проводится так же, как и для условной гладкой обечайки с эквивалентной толщиной. В этом случае меридиональные и окружные напряжения определяются соответственно [1]:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\Delta p R_{\text{цил}}}{2\delta_{\text{экв}}}; \quad \sigma_{\theta} = \frac{\Delta p R_{\text{цил}}}{\delta_{\text{экв}}}. \quad (1)$$

Эмпирическое математическое выражение для определения эквивалентной толщины вафельной обечайки, изготавливаемой механическим фрезерованием, для меридионально-окружного и наклонного направления ребер под углом 45° к образующей [2, 3] (см. рис. 2) будет иметь вид

$$\delta_{\text{экв}} = \delta + \lambda \frac{ch + 0,43\delta^2}{a}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент, учитывающий совместимость деформаций, $\lambda \approx 0,8$;

δ – толщина полотна, мм;

h – высота ребра, $h = \delta_{\text{исх}} - \delta$.

Так, например, используя выражения (1) и (2), можно утверждать, что наличие ребер вафельной обечайки в баке «Г» УРМ-1 снижает значения наиболее опасных окружных напряжений на 15,5%. При этом на массу меридиональных ребер бака «Г» приходится 0,95% от сухой массы ракетного блока, а бака «О» – 2,02%. Вместе с меридиональными ребрами бака «О» эта цифра достигает 2,97%.

Следует отметить, что топливные баки ракетных блоков подвержены различным видам нагружения, в том числе осевым нагрузкам, приводящим к деформациям сжатия. В условиях деформации осевого сжатия потеря устойчивости конструктивно-ортотропных оболочек топливного бака происходит, если значение осевой нагрузки превышает значение критической осевой силы для вафельных обечаек

$$N_{\text{кр}} = 2\pi k E \delta^2 (1 + \beta \varphi (\psi - 1)^2), \quad (3)$$

где k – коэффициент устойчивости цилиндрической оболочки, определяется из соотношения r/δ , для топливных баков УРМ-1 $k = 0,14$ [3];

φ – безразмерный параметр, $\varphi = 2\pi c/b$;

ψ – коэффициент эффективности, $\psi = \delta_{\text{исх}}/\delta$;

β – безразмерный коэффициент, $\beta = f(\varphi, \psi)$ [3].

В рамках решения задачи массовой оптимизации элементов конструкции, с целью исследования влияния конструктивного вида ребер жесткости на показатели несущей способности обечаек вафельного типа, сформированы модели нагружения фрагментов вафельных обечаек, алюминиево-магниевого сплава с различным расположением ребер: меридионально-окружным (рис. 3,а) и с наклонным расположением ребер под углом 45° к образующей (рис. 3,б).

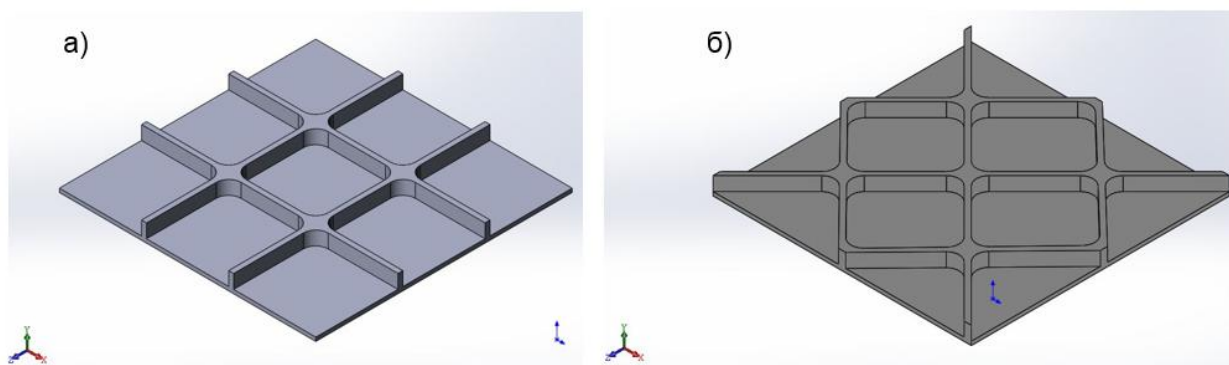


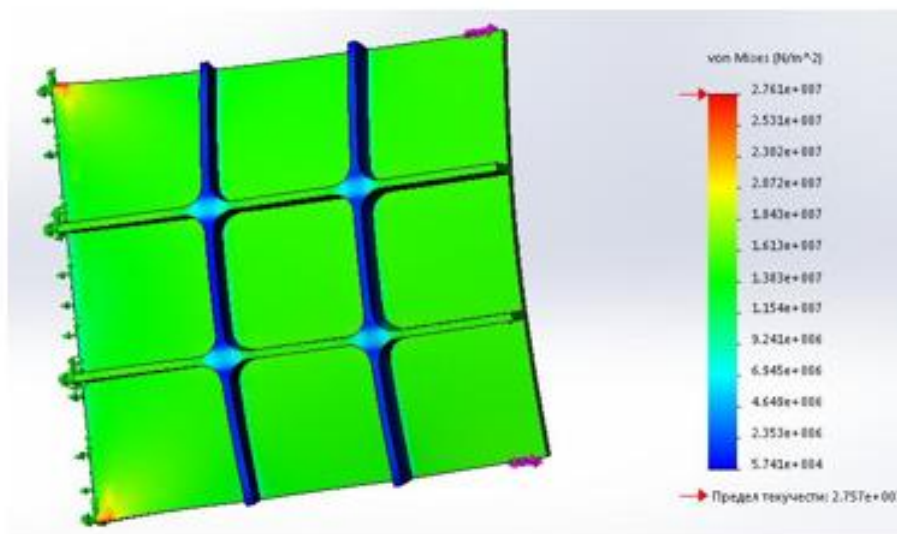
Рис. 3. Модели фрагментов вафельных обечаек с различным расположением ребер: а – меридионально-окружным; б – наклонным под углом 45°

Геометрические параметры полотен и силовых элементов фрагментов вафельных обечаек (рис. 3) смоделированы таким образом, чтобы фрагменты обечаек имели одинаковую массу. Вариационным параметром является значение b в выражении (3).

Ожидаемым результатом моделирования нагружения фрагментов обечаек вафельного типа с одинаковой массой является сравнительный анализ допустимых значений нагрузок в различных условиях нагружения.

При исследовании фрагментов обечаек на прочность в условиях растяжения значение допустимой нагрузки для фрагмента обечайки с меридионально-о́кружным направлением ребер (рис. 4,а) на 5,08% больше, чем указанное значение для фрагмента обечайки с расположением ребер под углом 45° к образующей (рис. 4,б). Это объясняется тем, что у обечаек с меридионально-о́кружным направлением ребер при деформациях растяжения, в условиях избыточного давления в топливных баках, эффективно участвуют только о́кружные ребра, следовательно, масса меридиональных ребер в основном и является разницей, на величину которой вафельная обечайка «проигрывает» гладкой. Однако эффективность участия меридиональных ребер в работе конструкции определяется их частым расположением.

а)



б)

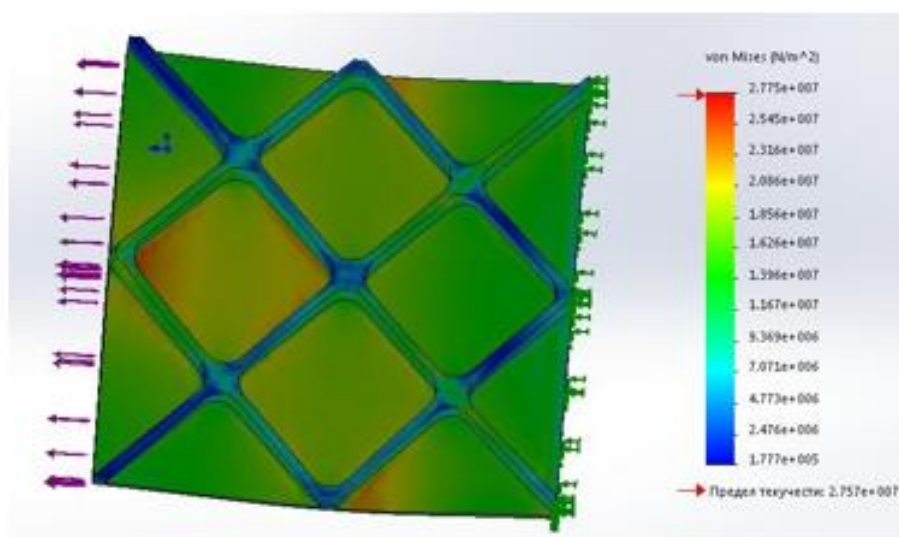
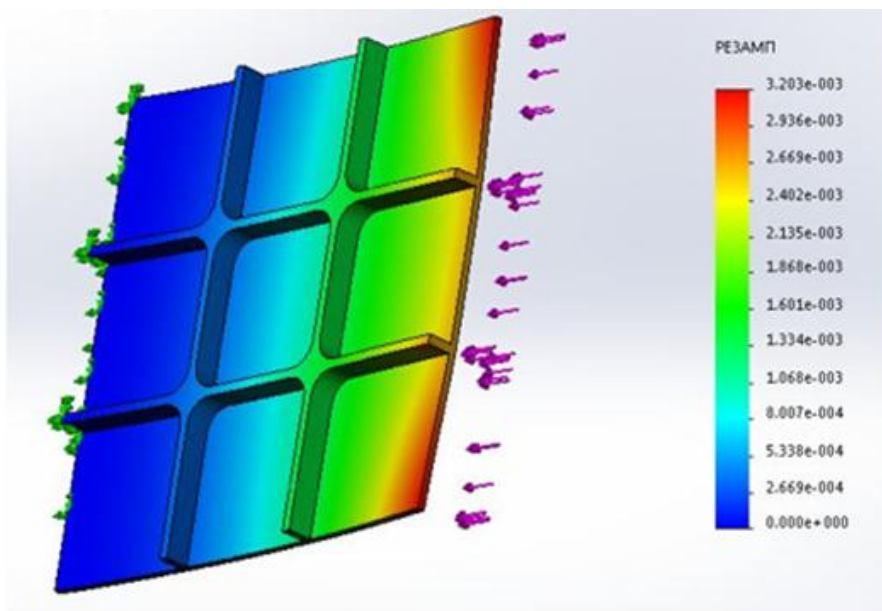


Рис. 4. Нагружение моделей фрагментов вафельных обечаек с различным расположением ребер в условиях деформации растяжения: а – с меридионально-о́кружным; б – с наклонным под углом 45°

При исследовании фрагментов обечаек на устойчивость, в условиях сжатия осевой силой, значение критической нагрузки для фрагмента обечайки с меридионально-окружным направлением ребер (рис. 5,а) на 19,79% меньше, чем указанное значение для фрагмента обечайки с расположением ребер под углом 45° к образующей (рис. 5,б).

а)



б)

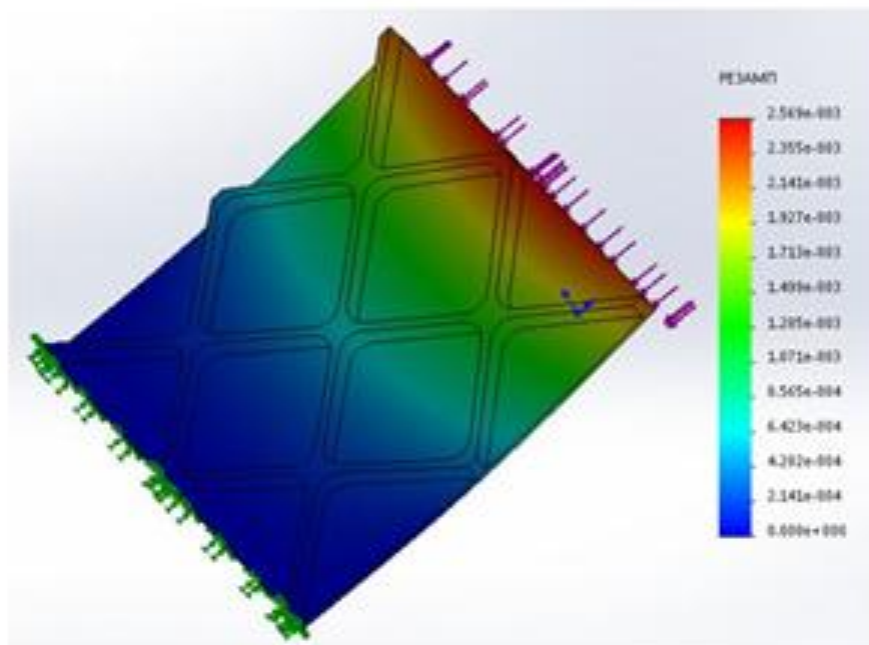


Рис. 5. Нагружение моделей фрагментов вафельных обечаек с различным расположением ребер в условиях деформации сжатия: а – с меридионально-окружным; б – с наклонным под углом 45°

Результаты моделирования нагружения фрагментов вполне сопоставимы с математическим выражением (3) и отличаются значением моментов инерции сечения фрагментов из-за условия равенства их масс. Результаты сравнительного анализа допустимых значений нагру-

зок фрагментов вафельных обечаек одинаковой массы с различным расположением ребер показаны на рис. 6.

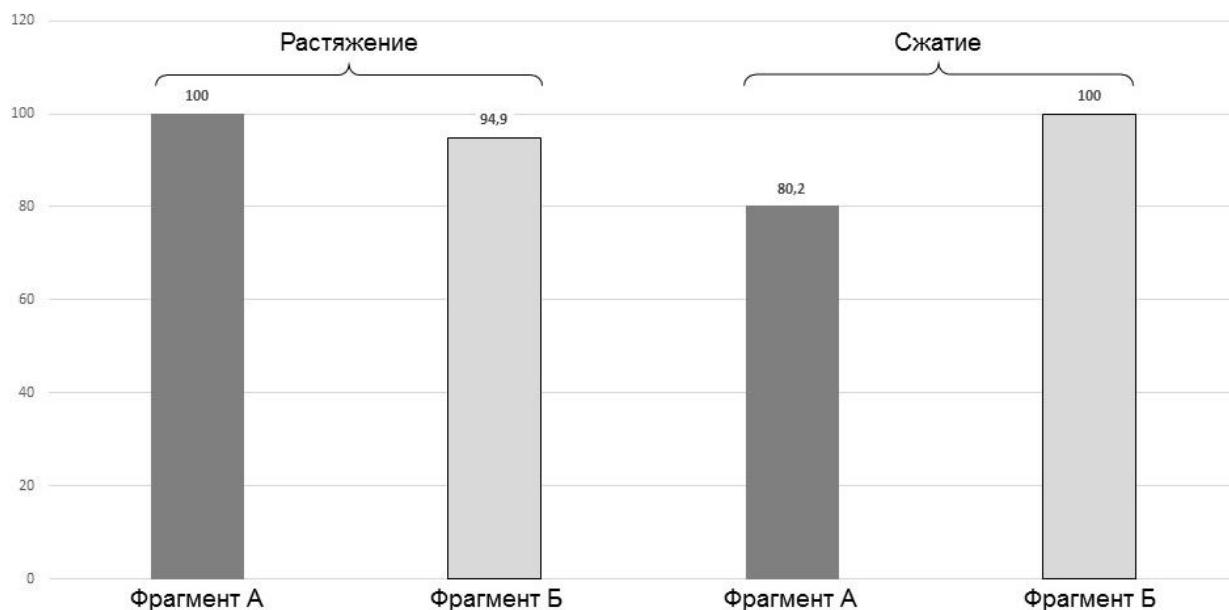


Рис. 6. Сравнительный анализ относительных значений допустимых нагрузок при различных видах деформации

Исследование параметров нагружения подкрепленных обечаек топливных баков показало, что расположение ребер влияет на допустимые нагрузки устойчивости в условиях действия осевой сжимающей силы. Процесс снижения массы конструкции в условиях комплексного нагружения может сводиться либо к изменению геометрических параметров силовых элементов, либо к изменению режимов нагружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обечайки с наклонным расположением ребер, применяемые в зарубежном ракетостроении, незначительно «проигрывают» отечественным при растяжении на прочность (рис. 6), однако более устойчивы к осевым сжимающим нагрузкам. Этот сравнительный недостаток вафельных обечаек, применяемых в отечественном ракетостроении, может быть минимизирован путем создания в топливном баке повышенного «компенсационного» избыточного давления, тем более что допустимые значения нагружения для обечайки с меридионально-окружным расположением ребер выше, чем эти же значения у обечаек с расположением ребер под углом 45° к образующей. Дальнейшее развитие решения задачи необходимо рассматривать на основе моделирования комплексного нагружения обечайки топливных баков ракет на жидком топливе.

Список используемых источников

1. Ракета-носители : учебник / К. Б. Болдырев [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 385 с.
2. Болдырев К. Б., Карчин А. Ю. Совершенствование энергомассовых характеристик ракет-носителей со спасаемой первой ступенью путем применения системы перелива ракетно-

го топлива // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 684. – С. 189–193.

3. *Лизин В. Т., Пяткин В. А.* Проектирование тонкостенных конструкций. – М. : Машиностроение, 1976. – 408 с.

4. *Партон В. З., Каламиаров А. Л., Кудрявцев Б. А.* Расчет напряженно-деформированного состояния подкрепленных оболочек и пластин регулярной структуры // Проблемы прочности : всесоюзный научно-техн. журн. Ин-та проблем прочности АН УССР. – 1989. – № 8 (242). – С. 63–79.

5. Изделие 14А127. Техническое описание. Ч. 2. Конструкция корпуса // Техническая библиотека. – URL: <https://techlibrary.ru> (дата обращения: 05.04.2023).

6. *Кац И. Л.* К истории создания конструкции, метода расчета и примеров реализации вафельных обечаек баков ракет. – URL: <https://listak.livejournal.com/2484.html> (дата обращения: 05.04.2023).

М. Ю. Булекбаева;
П. С. Гончаров,
кандидат технических наук, доцент;
М. В. Житный,
кандидат технических наук, доцент;
Л. П. Зозуля,
кандидат технических наук

МЕТОД РАСЧЕТА КООРДИНАТ ТОЧЕК ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ТЕХНОГЕННЫХ ФРАГМЕНТОВ С КАРТИННОЙ ПЛОСКОСТЬЮ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Представлен метод расчета координат точек пересечения техногенных фрагментов, образовавшихся в результате разрушения космического объекта, с картинной плоскостью космического аппарата, оказавшегося в окрестности движения этого фрагмента. Картинная плоскость расположена перпендикулярно плоскости орбиты фрагмента и проходит через центр масс космического аппарата, с которым возможно столкновение рассматриваемого фрагмента.

Ключевые слова: космический аппарат, сферический сегмент, матрица поворота, техногенный фрагмент, космический мусор.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время воздействие космического мусора (КМ) на космические аппараты (КА), функционирующие на околоземных орбитах, является актуальной проблемой. Ее появление обусловлено увеличением количества выводимых КА и, как следствие, наличием сопутствующего техногенного загрязнения околоземного пространства (ОКП). Кроме непосредственного воздействия на КА частиц и фрагментов КМ, образующегося в процессе выведения КА, возможно возникновение ситуаций, при которых в результате высокоскоростного столкновения с КА частицы КМ образуется поток вторичных техногенных фрагментов (ТФ) КМ, движущихся по собственной орбите. Этот процесс образования новых ТФ КМ в результате кинетического воздействия на КА фрагментов КМ часто носит название «эффект Кesslera». В данной работе предлагается метод расчета координат точек пересечения траекторий ТФ с картинной плоскостью КА, оказавшегося в окрестностях их движения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вводятся следующие понятия:

- 1) *исследуемый КА* (ИКА) – космический аппарат, для которого исследуется возможное воздействие на него потока вторичного КМ;
- 2) *первичный КА* (ПКА) – космический аппарат, в результате воздействия на который фрагмента КМ образуется поток вторичного КМ.

В основе предлагаемого метода лежит математическая модель определения координат точек встречи фрагментов КМ, образующих поток вторичного КМ, с ИКА. Следует отметить, что решение задачи определения координат этих точек на поверхности КА, представляющей собой в пространстве поверхность сложной конфигурации, является нетривиальной задачей. Поэтому в работе принято следующее упрощение: точки встречи с ИКА лежат на плоскости,

проходящей через центр масс ИКА и перпендикулярной плоскости орбиты фрагмента вторичного КМ. Данное упрощение несколько снижает точность используемой модели, однако не оказывает существенного влияния на качество прогнозирования результатов исследуемого воздействия КМ на КА.

Таким образом, в работе рассматривается случай, при котором в результате столкновения ПКА (его положение в пространстве задано радиусом-вектором \vec{r}_0) с частицей КМ образуется вторичный поток фрагментов КМ. Образовавшийся поток вторичных фрагментов КМ задается посредством множества El , определяющего набор эллиптических траекторий указанных фрагментов. Набор траекторий может быть получен вероятностными методами, посредством распределения начальной относительной скорости \vec{V}_{r_0} :

$$El = \{r_{i,j}(\varphi) / i \in [0; N], j \in [0; n]\},$$

где $r_{i,j}(\varphi)$ – радиус-вектор, определяющий эллиптическую орбиту фрагмента вторичного КМ;

N – число фрагментов с нормальным распределением;

n – число дискретных значений угла, расположенных равномерно по окружности;

φ – угол, ометаемый вектором в плоскости орбиты.

В работе приняты следующие допущения и ограничения:

– фрагменты разлетаются из одной точки мгновенно;

– траектории фрагментов эллиптические;

– расстояние между ПКА и ИКА должно быть минимально возможным при заданных орбитах;

– ИКА находится на пути движения фрагментов потока вторичного КМ;

– фрагменты относительно абсолютной геоцентрической системы координат (АГЭСК)

в момент отделения от ПКА имеют относительную скорость \vec{V}_{r_0} , одинаковую по модулю, концы векторов распределены по поверхности сферы, ограниченной коническим сегментом;

– раствор конуса конического сегмента, формируемого разлетающимися фрагментами КМ, определяется углом α .

Необходимо определить координаты точек пересечения орбит фрагментов, составляющих поток вторичного КМ, с плоскостью Pl (с картинной плоскостью), перпендикулярной плоскости орбиты фрагмента и проходящей через центр масс ИКА, задаваемый радиусом-вектором \vec{r}_c .

Для прогнозирования результатов воздействия рассматриваемого потока фрагментов КМ на ИКА из всего множества точек пересечения орбит фрагментов КА с плоскостью Pl выбираются только те, для которых обеспечивается выполнение условия, заданного следующим выражением:

$$l(p) < d,$$

где $l(p)$ – расстояние от центра масс ИКА до точки p пересечения траектории фрагмента с плоскостью Pl [1];

d – критериальное расстояние от центра масс ИКА до условной границы проекции ИКА на плоскость Pl .

Введем обозначение выбранного множество точек:

$$M_{El} = \{p / p \in (El \cap Pl), l(p) < d\}.$$

МЕТОД И ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Решение задачи прогнозирования результатов кинетического воздействия потока вторичных фрагментов КМ осуществляется путем последовательного выполнения следующих этапов:

- определение векторов скорости вторичных фрагментов КМ;
- определение координат точек пересечения орбит вторичных фрагментов КМ с проекционной плоскостью Pl относительно АГЭСК;
- определение координат точек пересечения вторичных фрагментов КМ с проекционной плоскостью Pl относительно связанной системы координат (ССК).

Рассмотрим указанные этапы подробнее.

Этап 1. Определение векторов скорости вторичных фрагментов КМ.

Задачей данного этапа является определение распределения векторов скоростей вторичных фрагментов КМ, образовавшихся в результате кинетического воздействия частицы КМ на ПКМ.

В качестве базового фрагмента КМ, относительно вектора скорости которого в дальнейшем осуществляется распределение векторов скоростей других фрагментов КМ, принимается фрагмент, координата которого при достижении орбиты ИКА совпадает с координатой центра масс ИКА. Распределение векторов скоростей вторичных фрагментов КМ относительно вектора скорости базового фрагмента реализуется следующим образом.

Угол α_{\max} задает конический сегмент, ограничивающий угол отклонения вектора начальной относительной скорости \vec{V}_{r0_i} от своего начального направления \vec{V}_{r0} .

Все векторы \vec{V}_{r0_i} распределены в одной плоскости. Плоскость определяется двумя перпендикулярными векторами \vec{i}_{K_1} и \vec{i}_{K_2} :

$$\begin{aligned}\vec{i}_{K_1} &= \frac{\vec{V}_{r0}}{V_{r0}}; \\ \vec{i}_{K_3} &= \frac{\vec{V}_{r0} \times \vec{V}_{\text{ПКА}_0}}{|\vec{V}_{r0} \times \vec{V}_{\text{ПКА}_0}|}; \\ \vec{i}_{K_2} &= \vec{i}_{K_3} \times \vec{i}_{K_1},\end{aligned}$$

где $\vec{V}_{\text{ПКА}_0}$ – скорость ПКА в момент отделения от него фрагментов.

Углы отклонения α_i векторов \vec{V}_{r0_i} от вектора \vec{V}_{r0} подчиняются нормальному закону распределения, которое описывается плотностью вероятности следующего вида:

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-(\alpha-m)^2 / (2\sigma)^2}.$$

Тогда для определения угла α_i каждого вторичного фрагмента КМ, кроме базового, воспользуемся датчиком нормального закона распределения со следующими параметрами [2]:

– математическим ожиданием $m = 0$;

– дисперсией $\sigma = \frac{\alpha_{\max}}{3}$;

– объемом выборки $N = f$.

Преобразование $\vec{V}_{r0ij} = \Lambda_j \circ \vec{V}_{r0i} \circ \Lambda_j^{-1}$ определяет вектор \vec{V}_{r0ij} , который получается вращением вектора \vec{V}_{r0i} по конусу вокруг оси \vec{i}_{K_1} на угол $2 \cdot \mathcal{G}_j$, где \mathcal{G}_j подчиняется равномерному закону распределения на интервале $(0, \pi)$.

Кватернион Λ_j будет иметь следующий вид:

$$\Lambda_j = \cos \mathcal{G}_j + \vec{i}_{K_1} \cdot \sin \mathcal{G}_j,$$

где j – элемент выборки.

Таким образом, начальная скорость разлета фрагментов \vec{V}_{ij} определяется по следующей формуле:

$$\vec{V}_{ij} = \vec{V}_{r0ij} + \vec{V}_{ПКА_0}.$$

Этап 2. Определение координат точек пересечения орбит вторичных фрагментов КМ с проекционной плоскостью Pl .

Координаты точек пересечения отделившихся фрагментов с проекционной плоскостью Pl определяются путем пересечения орбит этих фрагментов с Pl . Уравнения, описывающие движение фрагментов КМ, находятся методом, описанным в работе [4], и в общем виде могут быть представлены следующим образом:

$$r_{ij} = \frac{r_0^2 \cdot V_{ij}^2 \cdot \sin^2 \beta_{ij}}{r_0 \cdot V_{ij}^2 \cdot (\cos \varphi - \cos \beta_{ij} \cdot \cos(\beta_{ij} - \varphi)) + \mu \cdot (1 - \cos \varphi)},$$

$$\frac{\vec{r}_0}{r_0} = \vec{k}_0, \quad \frac{(\vec{r}_0 \times \vec{V}_{ij}) \times \vec{r}_0}{|\vec{r}_0 \times \vec{V}_{ij}| \cdot |\vec{r}_0|} = \vec{k}_1,$$

$$\vec{r}_{ij}(\varphi_{ij}) = r_{ij} \cdot (\cos \varphi \cdot \vec{k}_0 + \sin \varphi \cdot \vec{k}_1),$$

где φ – угол, ометаемый вектором в плоскости орбиты;

β_{ij} – угол между радиусом-вектором \vec{r}_0 и вектором скорости \vec{V}_{ij} .

Для определения координат точек пересечения орбит фрагментов КМ необходимо найти уравнение плоскости Pl . Данная плоскость проходит через центр масс ИКА и перпендикулярна орбите фрагмента, проходящей также через центр масс КА. Нормалью к плоскости Pl является вектор скорости фрагмента в точке, определяемой \vec{r}_c , в момент времени, когда фрагмент КМ пересечет центр масс целевого КА [4]:

$$\vec{V}_c = \vec{V}_0 + \frac{\mu \cdot (\vec{r}_0 \times \vec{V}_0) \times \left(\frac{\vec{r}_c}{r_c} - \frac{\vec{r}_0}{r_0} \right)}{\left| (\vec{r}_0 \times \vec{V}_0) \right|^2}.$$

Тогда искомое уравнение плоскости Pl можно записать в следующем виде:

$$V_{cx} \cdot X + V_{cy} \cdot Y + V_{cz} \cdot Z - \vec{V}_c \cdot \vec{r}_c = 0.$$

Угол φ_{ij} , ометаемый радиусом-вектором \vec{r}_{ij} , при котором эллиптическая траектория фрагмента пересечет плоскость Pl , находится из уравнения

$$\vec{V}_c \cdot \vec{r}_{ij}(\varphi_{ij}) - \vec{V}_c \cdot \vec{r}_c = 0.$$

При подстановке φ_{ij} в уравнение для каждого эллипса $\vec{r}_{ij}(\varphi_{ij})$ находятся координаты точек пересечения фрагментов с плоскостью Pl .

Этап 3. Прогнозирование поврежденных в результате воздействия вторичных фрагментов КМ элементов конструкции ИКА.

Для дальнейшего прогнозирования поврежденных в результате воздействия вторичных фрагментов КМ элементов конструкции ИКА требуется осуществить переход из АГЭСК в связанную СК.

Поскольку ИКА относительно АГЭСК ориентирован определенным образом, то прогнозирование повреждения ИКА в результате воздействия потока вторичных фрагментов КМ реализуется путем оценивания расположения координат точек пересечения орбит фрагментов КМ с проекционной плоскостью Pl относительно проекции ИКА на эту же плоскость. Для определения координат поврежденных элементов конструкции относительно ССК, лежащей в плоскости Pl , необходимо построить переходную матрицу [5]. Одна из координат в ССК должна равняться нулю.

Любая система координат может задаваться с помощью единичных векторов. Базис единичных векторов в СК – $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$. Единичный вектор \vec{e}_1 лежит в плоскости орбиты и

$$\vec{e}_1 = \frac{\vec{V}_c}{|\vec{V}_c|}.$$

Второй единичный вектор \vec{e}_2 направлен перпендикулярно плоскости орбиты и

$$\vec{e}_2 = \frac{\vec{r}_0 \times \vec{r}_c}{|\vec{r}_0 \times \vec{r}_c|}.$$

Вектор \vec{e}_3 находится как векторное произведение \vec{e}_1 на \vec{e}_2 :

$$\vec{e}_3 = \vec{e}_1 \times \vec{e}_2.$$

Тогда матрица поворота (M) строится из проекции единичных векторов в новой СК на оси АГЭСК:

$$M^T = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix}.$$

Координаты точек пересечения орбит фрагментов КМ (El) с проекционной плоскостью Pl в системе координат с единичными векторами $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ находятся через произведение матрицы перехода M^T на разность $\vec{r}_c - \vec{r}_{ij}(\varphi_{ij})$:

$$\vec{r}_{ij}(\varphi_{ij})_{\text{НСК}} = M^T \cdot (\vec{r}_c - \vec{r}_{ij}(\varphi_{ij})).$$

Так как ИКА определенным образом ориентирован в пространстве, то находятся все возможные ориентации ИКА в данный момент времени и проектируются на плоскость Pl . Далее на проекцию ИКА на плоскость Pl накладываются найденные ранее точки пересечения орбит фрагментов КМ с этой плоскостью. Определяется плотность распределения фрагментов КМ, на которые осуществляется воздействие со стороны фрагментов КМ (рис. 1; расчет выполнен в среде *Matlab*, рисунок – в среде *Ansys*).

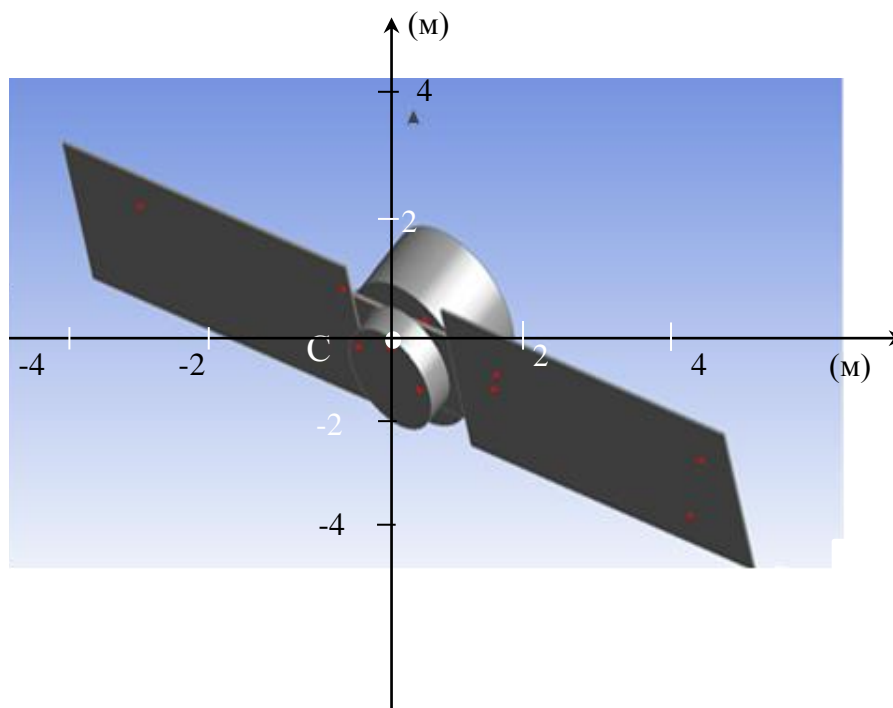


Рис. 1. Точки повреждения элементов конструкции КА

Путем анализа прочности элементов конструкции с учетом относительной скорости соударения делается вывод о степени повреждения ИКА.

В качестве примера использования разработанного метода представлены результаты моделирования разброса фрагментов (рис. 1) при исходных данных, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования разброса фрагментов

Наименование	Значение
Радиус r , м	$7,871 \times 10^6$
Радиус R , м	$7,921 \times 10^6$
Долгота восходящего узла Ω , град	70
Наклонение i_1 , град	62
Наклонение i_2 , град	57
Угол u_1 , град	-1,4
Угол u_2 , град	1,4
Критериальное расстояние от центра масс ИКА до условной границы проекции ИКА на плоскость $Pl - d$, м	6
Угол, задающий конический сегмент α_{\max} , град	1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемый в работе метод позволяет провести расчет координат точек пересечения техногенных фрагментов, образовавшихся в результате разрушения космического объекта, с картинной плоскостью космического аппарата, оказавшегося в окрестности движения этого фрагмента. Применение данного метода в составе комплексной модели имитационного моделирования позволит проводить прогнозирование результатов кинетического воздействия фрагментов КМ на элементы КА, что может быть использовано как при проектировании КА, так и при выработке рекомендаций по снижению негативного кинетического воздействия фрагментов КМ.

Список используемых источников

1. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – СПб. : Лань, 2003. – 832 с.
2. *Вентцель Е. С.* Теория вероятности : учебник для вузов. – 6-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 1999. – 576 с.
3. *Бранец В. Н., Шмыглевский И. П.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М. : Наука, 1973. – 320 с.
4. *Зозуля Л. П., Булекбаева М. Ю., Гончаров П. С.* Применение вектора Лапласа для оценивания параметров сближения частицы космического мусора с космическим аппаратом // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 676. – С. 179–185.
5. *Эскобал П.* Методы определения орбит. – М. : Мир, 1970. – 472 с.

Р. М. Вивчарь,
кандидат технических наук;
Е. Н. Есипов;
А. В. Пачин,
кандидат технических наук;
Д. В. Решетников,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РЕШЕНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ УСТОЙЧИВЫМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Выявлена проблема, которая заключается в необходимости нахождения решения, позволяющего повысить устойчивость системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры для сопротивляемости возмущающим факторам.

Представлена методика обоснования устойчивого решения по управлению функционированием системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры, а также ее описание. Рассмотрен подход для нахождения решения, обеспечивающего устойчивость функционирования системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры, заключающийся в нахождении центра области допустимых значений вероятности своевременно выполнить заданное количество пусков ракет космического назначения с определенными затратами.

Ключевые слова: система эксплуатации, объекты наземной космической инфраструктуры, устойчивое решение, центрост.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время внимание к космической деятельности, как к одной из ведущих отраслей науки, заметно возросло. Она обеспечивает информацией различные отрасли промышленности: нефтяную и газовую, самолетостроительную, атомную, пищевую, транспортную, научную и т. д. В процессе этой деятельности осуществляются запуски космических аппаратов (КА) различного назначения. Для выполнения запусков КА необходимо при управлении системой эксплуатации (СЭ) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) принимать решения, обеспечивающие максимальную вероятность своевременного выполнения заданного количества пусков ракет космического назначения (РКН) с определенными затратами (вероятность достижения комплекса целей). Решение, которое обеспечивает максимальную вероятность достижения комплекса целей P^{\max} , является оптимальным решением. На данный момент существует множество моделей [1–3] и методик [4–6], позволяющих обосновать оптимальное решение. Однако в реальных условиях на СЭ ОНКИ воздействуют различные возмущающие факторы, которые могут изменять ее параметры и тем самым негативно влиять на вероятности достижения комплекса целей. Как известно, воздействие возмущающих факторов имеет стохастическую природу, и предсказать, в какой момент они проявятся, невозможно.

Для примера рассмотрим рис. 1, на котором показано, как изменяется вероятность достижения комплекса целей P при воздействии возмущающего фактора $F^{\text{ВОЗ}}$. В данном случае под воздействием возмущающего фактора понимается изменение значения одного из параметров СЭ ОНКИ Π_i . Представим, что Π_i – это время доставки запасной части (ЗЧ). Для обеспечения P^{\max} доставку ЗЧ необходимо выполнить за 26 ч, однако, как показывает

практика, не всегда удается доставить ЗЧ в назначенное время, так как вследствие различных причин воздействия F^{BO3} (задержка при загрузке, поломка транспорта, осуществляющего доставку, и т. д.) Π_i может быть увеличено на несколько часов.

Из анализа рис. 1 видно, что оптимальное решение не во всех случаях является верным, так как в случае незначительного изменения Π_i вследствие воздействия на него F^{BO3} наблюдается резкое падение P – ниже значения допустимой вероятности $P^{доп}$.

Однако при выборе значения параметра Π_i , как показано на рис. 2, видно, что при воздействии на него такого же F^{BO3} , как и на рис. 1, вероятность достижения комплекса целей P_2 не падает ниже $P^{доп}$.

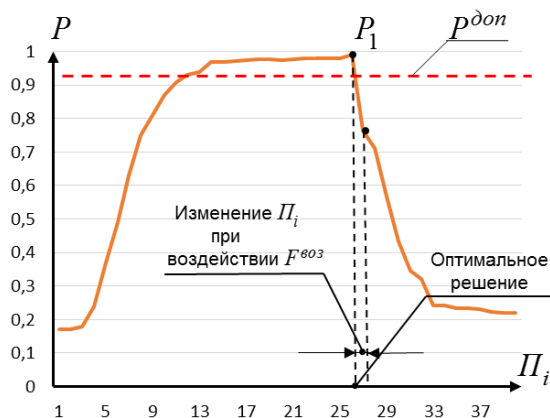


Рис. 1. Изменение вероятности достижения комплекса целей при воздействии F^{BO3} в случае выбора решения, характеризующегося вероятностью $P^{max} = P_1$

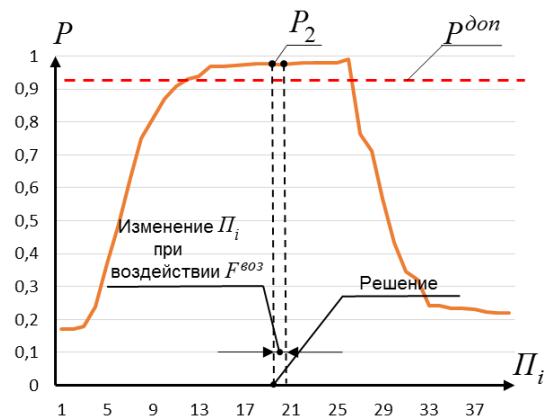


Рис. 2. Изменение вероятности достижения комплекса целей при воздействии F^{BO3} в случае выбора решения, характеризующегося вероятностью P_2 , где $P^{доп} \leq P_2 < P_1$

В связи с приведенными примерами появляется необходимость найти такое решение, которое позволяет значениям параметров СЭ ОНКИ находиться в области допустимых значений при воздействии на них возмущающих факторов, иначе говоря, обладать свойством устойчивости. Под устойчивым решением понимается решение, при котором в условиях воздействия возмущающих факторов показатели эффективности функционирования находятся в области допустимых значений, другими словами, при котором гарантируется достижение комплекса целей. Данное определение основано на принципе гарантированного результата, описанном в работе [7], который гласит, что он предусматривает такой выбор альтернативы, при котором выполняются ограничения при воздействии любого возмущения и достигается наилучший результат в случае воздействия наименее благоприятного возмущения.

Представленные выше обстоятельства свидетельствуют, что необходимое нахождение устойчивого решения актуально. Для нахождения устойчивого решения требуется соответствующий научно-методический аппарат, который представляет собой методику обоснования устойчивого решения по управлению СЭ ОНКИ.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ОБОСНОВАНИЯ УСТОЙЧИВОГО РЕШЕНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При анализе научно-методического аппарата выяснилось, что данной проблемой занимались многие ученые в различных сферах деятельности, кроме того, этой проблеме посвящено

множество научных трудов [8–14], а также по ней разработано большое количество методик [15–20].

В статье [15] представлены различные модели принятия решения для предприятий российского промышленного комплекса. Здесь устойчивость решения рассматривается как распределенная во времени конкурентоспособность. Однако публикация носит обзорный характер, отсутствует формализация и не представлен инструментарий для практического применения к конкретному предприятию.

В статье [16] представлена методика оценки устойчивости экономических систем. Методика позволяет анализировать устойчивость системы в целом, прогнозировать влияние одного фактора на другие и на общую устойчивость экономической системы разного уровня сложности. Приведен подход к расчету интегрированной оценки устойчивости. В качестве параметров системы выбраны экономическая, экологическая, социальная устойчивости. К недостаткам методики можно отнести: рассмотрение малого количества параметров (трех), отсутствие, в случае необходимости, достижения комплекса целей, инструмента для решения, а также отсутствие в методике инструментария в случае неустойчивости экономической системы.

В работе [17], по аналогии со статьей [15], методика принятия решения в адаптивном управлении устойчивым развитием сельскохозяйственного предприятия носит описательный характер. Отсутствует формализация при выработке решения для устойчивого функционирования предприятия.

Методика оценки устойчивости технических систем [18, 19] позволяет определить, в каком состоянии (устойчивое, в пределах своей устойчивости, неустойчивое) будет находиться система в течение определенного периода времени, однако в работе не раскрывается порядок действий в случае определения неустойчивого состояния технической системы.

Проанализировав научно-методический аппарат в области управления устойчивостью сложных технических систем, можно сделать вывод, что имеющиеся недостатки не позволяют применить его при обосновании устойчивого решения для функционирования СЭ ОНКИ.

Таким образом, в данной статье предлагается рассмотрение методики обоснования устойчивого решения по управлению функционированием системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры, в которой отсутствуют недостатки, имеющиеся в проанализированных выше трудах.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ УСТОЙЧИВОГО РЕШЕНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Так как под воздействием возмущающих факторов неуправляемые параметры СЭ ОНКИ могут изменяться, как в левую, так и в правую сторону, то оптимальным (с точки зрения устойчивости) будет решение $\vec{u}^{уст*}$, характеризующееся тем, что отклонения неуправляемых параметров СЭ ОНКИ, вследствие воздействия возмущающих факторов, при которых вероятность достижения комплекса целей будет находиться в области заданных требований, принимают максимальные значения.

Формально задача нахождения такого решения выглядит следующим образом:

$$\vec{u}^{уст*} = \arg \max_{\vec{u} \in \Psi} \Delta(\vec{u}), \quad (1)$$

где \vec{u} – вектор параметров решения по управлению СЭ ОНКИ;

Δ – это коэффициент, который характеризует максимальное значение неуправляемого параметра под воздействием наиболее негативного возмущающего фактора, при котором гарантируется достижение целей решения, при этом

$$\Delta = \min \begin{cases} \min(\Delta_{y_1}^B(\vec{r}), \Delta_{y_1}^H(\vec{r})) \\ \dots \\ \min(\Delta_{y_I}^B(\vec{r}), \Delta_{y_I}^H(\vec{r})) \end{cases},$$

где $\Delta_{y_1}^B, \Delta_{y_1}^H, \dots, \Delta_{y_I}^B, \Delta_{y_I}^H$ – верхняя и нижняя границы отклонения y_i неуправляемого параметра СЭ ОНКИ от выбранного решения, при которых вероятность достижения комплекса целей лежит в области допустимых требований;

\vec{r} – вектор параметров СЭ ОНКИ, $\vec{r} = [\vec{u}, \vec{y}]$.
Здесь

$$\vec{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_I\}$$

– вектор неуправляемых параметров СЭ ОНКИ.

Кроме того, в формуле (1) $\psi = \{P(\vec{r}) \geq P^{\text{доп}}\}$, где $P(\vec{r})$ – вероятность достижения комплекса целей.

Решив такую задачу, выяснили, что оптимальным решением по управлению функционированием СЭ ОНКИ будет то решение, которое находится в центре области допустимых значений. Поэтому фундаментом методики обоснования устойчивого решения по управлению функционированием СЭ ОНКИ является метод определения центроида. Оптимальное решение по управлению СЭ ОНКИ должно представлять вектор параметров СЭ ОНКИ, который лежит в центре множества решений, удовлетворяющих заданным ограничениям. С точки зрения геометрии центром фигуры является центроид, представляющий собой точку, координатами которой являются средние (близкие к среднему) значения каждого параметра СЭ ОНКИ. В формализованном виде, для двух параметров, данное утверждение может быть проиллюстрировано рис. 3.

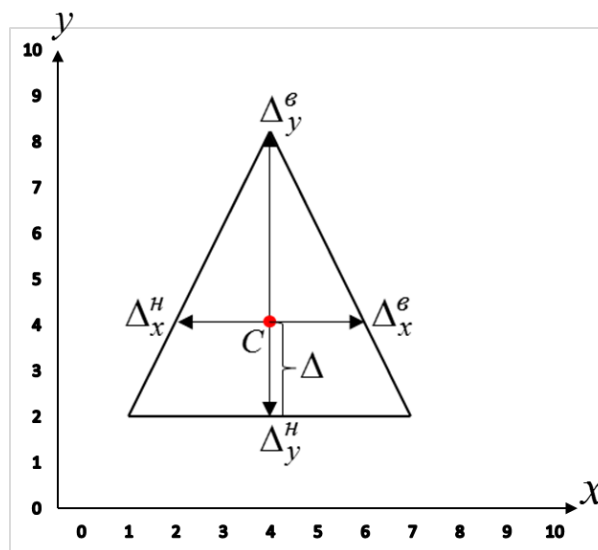


Рис. 3. Положение центроида относительно области допустимых значений вероятности достижения комплекса целей, где ● – центроид области допустимых значений;

↔ – допустимое значение параметра СЭ ОНКИ

Задача методики заключается в том, чтобы при заданной области допустимых значений параметров решения и неуправляемых параметров СЭ ОНКИ найти такие значения параметров решения, которые при воздействии наиболее неблагоприятного возмущающего фактора обеспечат вероятность достижения комплекса целей не ниже $P^{доп}$.

На рис. 4 представлена методика обоснования устойчивого решения по управлению СЭ ОНКИ.

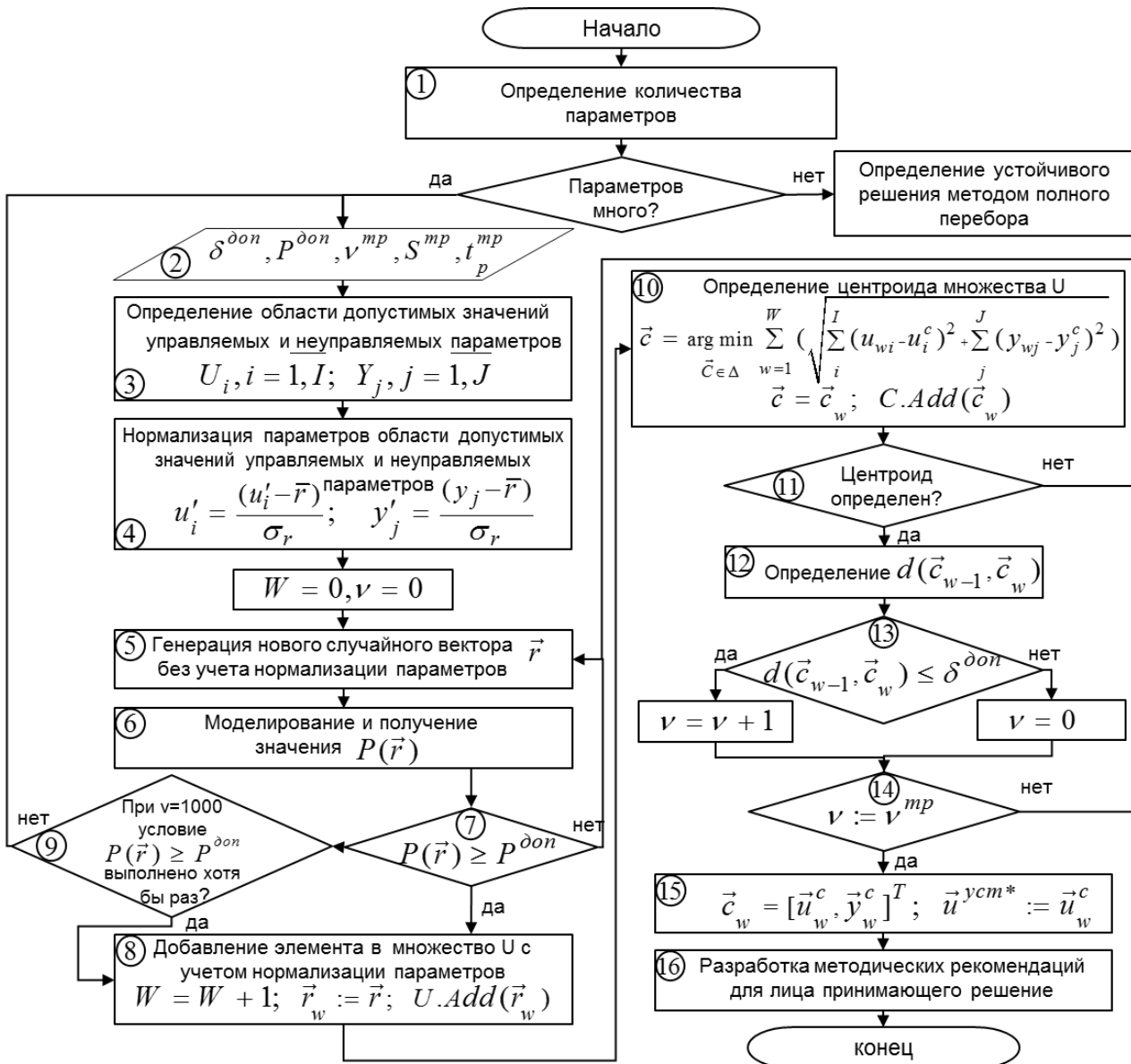


Рис. 4. Схема методики обоснования устойчивого решения по управлению функционированием СЭ ОНКИ

1. В начале использования методики определяется количество параметров СЭ ОНКИ. Данное действие выполняется для того, чтобы определить, каким из предложенных способов необходимо воспользоваться для нахождения устойчивого решения. Так, при небольшом количестве параметров для нахождения устойчивого решения можно воспользоваться, например, методом полного перебора. Рассмотрим случай, когда параметров СЭ ОНКИ большое количество.

2. Следующим шагом необходимо задать: $\delta^{\text{доп}}$ – допустимую разницу между евклидовыми расстояниями центров, $P^{\text{доп}}$ – допустимую вероятность достижения комплекса целей и $\nu^{\text{ТР}}$ – требуемое количество итераций, при которых положение центроида изменяется меньше чем на $\delta^{\text{доп}}$, $S^{\text{ТР}}$ – требуемые затраты на функционирование СЭ ОНКИ, $t_p^{\text{ТР}}$ – требуемую продолжительность выполнения работы.

$\delta^{\text{доп}}$ определяется опытным путем, в зависимости от области допустимых значений всех управляемых и неуправляемых параметров СЭ ОНКИ.

$P^{\text{доп}}$ зависит от количества пусков РКН за определенный период функционирования СЭ ОНКИ, от степени важности каждого пуска и определяется экспертным методом.

$\nu^{\text{ТР}}$ определяется опытным путем или экспертами. Для примера, в качестве одного из подходов определения $\nu^{\text{ТР}}$ опытным путем может быть использован следующий подход:

- выбор фигуры с известным расположением центроида;
- присвоение $\nu^{\text{ТР}}$ некоторого значения;
- генерация случайных точек в области фигуры;
- определение центроида между сгенерированными точками;
- определение расстояния между последним и предпоследним центроидами d ;
- сравнение $d \leq \delta^{\text{доп}}$;
- выполнение вышеназванных итераций до момента, пока $\nu = \nu^{\text{ТР}}$;
- определение расстояния между центроидом выбранной фигуры и центроидом сгенерированных точек f ;
- сравнение $f \leq \delta^{\text{доп}}$.

Если выражение $f \leq \delta^{\text{доп}}$ выполняется, то $\nu^{\text{ТР}}$ определено верно, если не выполняется – необходимо $\nu^{\text{ТР}}$ присвоить новое значение.

Данный подход применяется к другим фигурам, у которых известно расположение центроида, для проверки правильного определения $\nu^{\text{ТР}}$.

$S^{\text{ТР}}$ задается вышестоящим органом управления, в зависимости от количества работ, запланированных на период функционирования СЭ ОНКИ.

$t_p^{\text{ТР}}$ задается в эксплуатационной документации.

3. Для корректной работы методики необходимо задать область допустимых значений параметров решения U_i и неуправляемых параметров СЭ ОНКИ Y_j , из которых в последующем генерируется случайный вектор параметров СЭ ОНКИ $\vec{r} = [\vec{u}, \vec{y}]^T$.

К параметрам решения \vec{u} относятся: z_{ij} – количество ЗЧ j -го типа i -й системы, $\tau_{\text{поп } i}^{\text{ЗИП}}$ – периодичность пополнения комплекта ЗИП i -й системы, $\vec{\tau}^{\text{ТО}}$ – вектор, характеризующий периодичность ТО ТлОб (технологического оборудования), $\vec{V}^{\text{ТО}}$ – вектор, характеризующий объем ТО ТлОб.

К неуправляемым параметрам СЭ ОНКИ \vec{y} относятся: $\tau_{\text{эксп}}^{\text{СЭ}}$ – период функционирования СЭ ОНКИ, λ_{ij} – интенсивность отказов элемента одного типа наименования (ЭОТН) j -го типа i -й системы, $S_{\text{пров } ij}^{\text{ЭОТН}}$ – стоимость проведения ТО одного ЭОТН j -го типа i -й системы, $S_{\text{зак } ij}^{\text{ЭОТН}}$ – стоимость закупки одной ЗЧ j -го типа i -й системы, $S_{\text{обсл } ij}^{\text{ЭОТН}}$ – стоимость обслуживания одного ЭОТН j -го типа i -й системы, $S_{\text{хран } ij}^{\text{ЭОТН}}$ – стоимость хранения одной ЗЧ j -го

типа i -й системы, $S_{\text{пл.дос } ij}^{\text{ЭОТН}}$ – стоимость плановой доставки одной ЗЧ j -го типа i -й системы, $S_{\text{экс.дос } ij}^{\text{ЭОТН}}$ – стоимость экстренной доставки одной ЗЧ j -го типа i -й системы, $S^{\text{ТР}}$ – требуемая стоимость функционирования СЭ ОНКИ, x_{5m} – продолжительность от начала функционирования СЭ ОНКИ до начала m -й работы, M – количество работ.

4. В связи с тем, что область допустимых значений параметров СЭ ОНКИ представлена в разных масштабах и изменяется в разных диапазонах, целесообразно ее представить в нормализованном виде. Для нормализации параметров воспользуемся формулами [20]:

$$u'_i = \frac{(u_i - \bar{r})}{\sigma_r}, \quad (2)$$

$$y'_j = \frac{(y_j - \bar{r})}{\sigma_r}, \quad (3)$$

где u'_i – нормализованное значение i -го параметра решения из множества допустимых значений;
 y'_j – нормализованное значение j -го неуправляемого параметра СЭ ОНКИ из множества допустимых значений;
 u_i – значение i -го параметра решения из множества допустимых значений;
 y_j – значение j -го неуправляемого параметра СЭ ОНКИ из множества допустимых значений;
 \bar{r} – среднее значение параметров решения и неуправляемых параметров СЭ ОНКИ;
 σ_r – среднеквадратическое отклонение.

Нормализация параметров области допустимых значений позволит повысить чувствительность методики для более точного определения центра между точками.

5. Из заданной области допустимых значений, без учета нормализации, генерируется случайный вектор параметров СЭ ОНКИ \vec{r} .

6. Далее выполняется моделирование при помощи агентной модели функционирования СЭ ОНКИ. По окончании моделирования на выходе получаем фактические продолжительности каждой работы \vec{t}_p и фактические затраты на функционирование СЭ ОНКИ S .

На основе полученных выходных данных при помощи метода ядерной оценки плотности вероятности [21] находится вероятность достижения комплекса целей с помощью выражения

$$f(t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M, S) = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E \left(\prod_{m=1}^M \frac{1}{h_m} Y\left(\frac{t_p^m - t_{pe}^m}{h_m}\right) \cdot \frac{1}{h_c} Y\left(\frac{S - S_e}{h_c}\right) \right). \quad (4)$$

7. Полученная вероятность достижения комплекса целей $P(\vec{R})$ сравнивается с $P^{\text{доп}}$. Если условие

$$P(\vec{r}) \geq P^{\text{доп}} \quad (5)$$

не выполняется, то выполнение методики возвращается на генерацию случайного вектора \vec{r} , если выражение (5) выполняется, то сгенерированный вектор \vec{r} добавляется в множество решений U , удовлетворяющих заданным ограничениям $\vec{r}_w := \vec{r}$ (блок 8, см. рис. 4).

9. Также стоит отметить, что если при проведении 1000 итераций не удастся найти ни одного вектора \vec{r}_w , удовлетворяющего выражению (5), то считается, что решение отсутствует и необходимо корректировать исходные данные СЭ ОНКИ.

10. Каждый полученный вектор \vec{r}_w , удовлетворяющий заданным ограничениям, имеет свои координаты, и его можно представить, с учетом нормализации, в виде точки в n -мерном

пространстве, которое зависит от количества параметров в векторе \vec{r}_w . По мере заполнения пространства точками будет образовываться фигура. Для выбора параметров СЭ ОНКИ, которые характеризуют устойчивое решение, необходимо найти центроид образовывающейся фигуры. Определение центроида между точками осуществляется по формуле

$$\vec{c} = \arg \min_{\vec{C} \in \Delta} \sum_{w=1}^W \left(\sqrt{\sum_i^I (u_{wi} - u_i^c)^2 + \sum_j^J (y_{wj} - y_j^c)^2} \right) \quad (6)$$

где \vec{c} – вектор параметров СЭ ОНКИ, характеризующий центроид множества U ;
 \vec{C} – множество векторов параметров СЭ ОНКИ, характеризующих центроиды множества U , $\vec{C} = \{\vec{c}_1, \vec{c}_2, \dots, \vec{c}_w, \dots, \vec{c}_W\}$;

Δ – ограничения, при которых параметры СЭ ОНКИ могут принимать определенные значения,

$$\Delta = \left\{ \begin{array}{l} \{z_{ij}, \tau_{\text{поп } i}, \vec{\tau}^{\text{ТО}}, \vec{V}^{\text{ТО}}, \tau_{\text{экспл}}^{\text{СЭ}}, x_{5m}, S_{\text{пров } ij}^{\text{ЭОТН}}, S_{\text{зак } ij}^{\text{ЭОТН}}, S_{\text{обсл } ij}^{\text{ЭОТН}}\} \\ S_{\text{хран } ij}^{\text{ЭОТН}}, S_{\text{пл.дос. } ij}^{\text{ЭОТН}}, S_{\text{экс.дос. } ij}^{\text{ЭОТН}}, S^{\text{ТР}}, x_{5m}, M \in N \\ \lambda_{ij} \in (0; 1] \end{array} \right\};$$

W – мощность (число элементов) множества U ;

I – количество параметров решения;

J – количество неуправляемых параметров СЭ ОНКИ;

u_{wi} – i -й параметр решения;

y_{wj} – j -й неуправляемый параметр СЭ ОНКИ;

u_i^c – i -й параметр решения, характеризующий центроид множества U ;

y_j^c – j -й неуправляемый параметр СЭ ОНКИ, характеризующий центроид множества U .

11. В связи с тем, что существует ограничение на целочисленность параметров СЭ ОНКИ, может возникнуть ситуация, когда отсутствует возможность найти центроид между выпавшими точками. В такой ситуации выполнение методики возвращается на генерацию случайного вектора \vec{r} .

12. Между вычисленным последним c_w и предпоследним c_{w-1} центроидами определяется расстояние $d(c_{w-1}, c_w)$ и сравнивается с $\delta^{\text{доп}}$:

$$d(c_{w-1}, c_w) \leq \delta^{\text{доп}}. \quad (7)$$

13. Итерации ν , при которых положение центроида изменяется меньше чем на $\delta^{\text{доп}}$, выполняются до тех пор, пока не выполнится условие

$$\nu = \nu^{\text{ТР}}. \quad (8)$$

14. Если при выполнении итерации условие (7) не выполняется, то ν приравнивается к нулю и набор итераций начинается заново. После выполнения условия (8) вычисляется центроид образовавшейся фигуры. Ближайший \vec{r}_w к центроиду будет являться оптимальным решением $\vec{c}_w = [\vec{u}_w^c, \vec{y}_w^c]^T$ для функционирования СЭ ОНКИ, где \vec{u}_w^c – вектор параметров решения, характеризующий оптимальное решение; \vec{y}_w^c – вектор неуправляемых параметров СЭ ОНКИ, характеризующий оптимальное решение.

Вместе с тем стоит отметить, что в случае недостаточного количества векторов \vec{r}_w для описания образующейся фигуры и их удаленности от центра больше чем на $\delta^{\text{доп}}$ необходимо выбирать решение с наибольшей вероятностью достижения комплекса целей.

15. В результате применения методики удается получить оптимальное решение $\vec{y}^{\text{уст}^*}$, которое характеризуется управляемыми параметрами СЭ ОНКИ, позволяющими при воздействии возмущающих факторов обеспечить вероятность достижения комплекса целей не ниже $P^{\text{доп}}$. Для определения $\vec{y}^{\text{уст}^*}$ был применен метод нахождения центроида сложной фигуры.

16. Завершающим этапом методики обоснования максимально устойчивого решения по управлению функционированием СЭ ОНКИ является разработка методических рекомендаций лицу, принимающему решение.

Разработанная методика отличается от известных использованием в качестве критерия устойчивости решения коэффициента, характеризующего максимальное изменение значений неуправляемых параметров СЭ ОНКИ под воздействием возмущающих факторов, при которых гарантируется достижение цели функционирования СЭ ОНКИ. Это позволяет получить количественную оценку устойчивости решения и на ее основе выбрать оптимальное решение.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для демонстрации работы методики нахождения устойчивого решения по управлению функционированием СЭ ОНКИ представлен вычислительный эксперимент.

Пусть заданы:

$\tau_{\text{экс}}^{\text{СЭ}} = 8760$ ч, $t_p^{\text{ТР}} = 109$ ч, $S^{\text{ТР}} = 100000$ у. е., $\delta^{\text{доп}} = 0,0000003$, $P^{\text{доп}} = 0,98$, $\nu^{\text{ТР}} = 125$, $M = 2$, параметры СЭ ОНКИ, которые имеют определенную область допустимых значений: z_{ij} – количество ЗЧ j -го типа i -й системы зависит от количества элементов в системе и от интенсивности отказов данных элементов λ_{ij} (табл. 1), $\tau_{\text{поп } i}^{\text{ЗИП}}$ – периодичность пополнения комплекта ЗИП i -й системы устанавливается 1 раз в полгода (4380 ч) или 1 раз в год (8760 ч), $\vec{\tau}^{\text{ТО}}$ – вектор, характеризующий периодичность ТО ТлОб.

Таблица 1

Область допустимых значений z_{ij} и λ_{ij}

Система	Номер типа ЭОТН	Количество ЭОТН	Минимальное количество ЗЧ	Максимальное количество ЗЧ	Минимальная интенсивность отказов	Максимальная интенсивность отказов
№	j	k	z_{ijk}^{\min} , шт.	z_{ijk}^{\max} , шт.	λ_{ij}^{\min} , 1/ч	λ_{ij}^{\max} , 1/ч
Система 1	1	6	0	50	0,000002	0,000043
	2	3	0	44	0,000007	0,00006
	3	8	0	28	0,000023	0,0003
Система 2	1	17	0	64	0,000027	0,00041
	2	15	0	52	0,000009	0,00012
	3	20	0	70	0,000016	0,000093
	4	5	0	40	0,000004	0,00028
	5	12	0	40	0,000012	0,00074
	6	10	0	48	0,000051	0,000094
...
Система 20	1	2	0	4	0,0000019	0,000072

Периодичность технического обслуживания для каждой системы устанавливается индивидуально, в нее могут входить еженедельное, ежемесячное, ежеквартальное, полугодовое и годовое обслуживание, $\vec{V}^{ТО}$ – вектор, характеризующий объем ТО ТлОб. Кроме того, для каждой системы $\vec{V}^{ТО}$ назначаются индивидуально от 0 до 100% и стоимостные показатели (табл. 2).

Таблица 2

Стоимостные показатели СЭ ОНКИ

Система	Номер типа ЭОТН	Стоимость закупки ЭОТН	Стоимость обслуживания ЭОТН	Стоимость хранения ЭОТН	Стоимость плановой до-ставки ЭОТН	Стоимость экстренной доставки ЭОТН	Стоимость проведения ТО ЭОТН
№	j	$S_{\text{зак } ij}^{\text{ЭОТН}}$, у. е.	$S_{\text{обсл } ij}^{\text{ЭОТН}}$, у. е.	$S_{\text{хран } ij}^{\text{ЭОТН}}$, у. е.	$S_{\text{пл. дос } ij}^{\text{ЭОТН}}$, у. е.	$S_{\text{экс. дос } ij}^{\text{ЭОТН}}$, у. е.	$S_{\text{пров } ij}^{\text{ЭОТН}}$, у. е.
Система 1	1	100	20	5	1000	4000	7
	2	250	10	5	1000	4000	3
	3	1500	15	5	1000	4000	20
Система 2	1	300	4	3	600	2500	4
	2	150	10	3	600	2500	2
	3	230	7	3	600	2500	5
	4	1200	6	3	600	2500	6
	5	800	5	3	900	3000	8
	6	450	10	3	900	3000	3
...
Система 20	1	2100	19	15	1110	3950	17

Стоит отметить, что при изменении стоимостных показателей СЭ ОНКИ изменяется и значение $S^{ТР}$.

В результате многократного моделирования СЭ ОНКИ постепенно получили векторы параметров СЭ ОНКИ, удовлетворяющие заданным ограничениям \vec{R}_w . Данный вектор \vec{R}_w представляется в виде точки в n -мерном пространстве. По мере появления этих точек образовалась фигура, центроид которой является максимально устойчивым решением для функционирования СЭ ОНКИ.

В результате применения методики удалось получить максимально устойчивое решение $\vec{u}^{уст*}$, параметры которого приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры устойчивого решения для функционирования СЭ ОНКИ

Система	Номер типа ЭОТН	Количество ЭОТН	Количество ЗЧ	Периодичность пополнения комплекта ЗИП	Периодичность технического обслуживания системы					Объем технического обслуживания системы				
					ТО-1Н	ТО-1М	ТО-К	ТО-1	ТО-2	ТО-1Н	ТО-1М	ТО-К	ТО-1	ТО-2
№	<i>j</i>	<i>k</i>	z_{ijk} , шт.	$\tau_{\text{поп}}^{\text{ЗИП}}$, ч	ч					%				
1	1	6	24	8760	-	730	-	4380	8760	-	20	-	50	100
	2	3	12		-	730	-	4380	8760	-	20	-	50	100
	3	8	26		-	730	-	4380	8760	-	20	-	50	100
2	1	17	20	8760	-	730	-	4380	8760	-	20	-	70	100
	2	15	22		-	730	-	4380	8760	-	20	-	70	100
	3	20	35		-	730	-	4380	8760	-	20	-	70	100
	4	5	10		-	730	-	4380	8760	-	20	-	70	100
	5	12	20		-	730	-	4380	8760	-	20	-	70	100
	6	10	24		-	730	-	4380	8760	-	20	-	70	100
...	
3	1	2	4	8760	-	-	-	4380	8760	-	-	-	50	100

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ЛИЦОМ, ПРИНИМАЮЩИМ РЕШЕНИЕ

После получения результатов необходима разработка методических рекомендаций для реализации оптимального решения $\vec{u}^{\text{уст*}}$. Данные методические рекомендации – это своего рода предложения подчиненного своему начальнику, необходимые для принятия решения. Для разработки методических рекомендаций следует воспользоваться табл. 3 и 4 путем их сравнения.

Таблица 4

Текущие параметры системы эксплуатации ОНКИ

Система	Номер типа ЭОТН	Количество ЭОТН	Количество ЗЧ	Периодичность пополнения комплекта ЗИП	Периодичность технического обслуживания системы					Объем технического обслуживания системы				
					ТО-1Н	ТО-1М	ТО-К	ТО-1	ТО-2	ТО-1Н	ТО-1М	ТО-К	ТО-1	ТО-2
№	<i>j</i>	<i>k</i>	z_{ijk} , шт.	$\tau_{\text{поп}}^{\text{ЗИП}}$, ч	ч					%				
1	1	6	25	8760	168	730	-	4380	8760	10	30	-	60	100
	2	3	22		168	730	-	4380	8760	10	30	-	60	100
	3	8	14		168	730	-	4380	8760	10	30	-	60	100
2	1	17	17	8760	168	730	-	4380	8760	10	20	-	50	100
	2	15	26		168	730	-	4380	8760	10	20	-	50	100
	3	20	35		168	730	-	4380	8760	10	20	-	50	100
	4	5	20		168	730	-	4380	8760	10	20	-	50	100
	5	12	20		168	730	-	4380	8760	10	20	-	50	100
	6	10	24		168	730	-	4380	8760	10	20	-	50	100

Окончание табл. 4

Система	Номер типа ЭОПН	Количество ЭОПН	Количество ЗЧ	Периодичность пополнения комплекта ЗИП	Периодичность технического обслуживания системы					Объем технического обслуживания системы				
					ТО-1Н	ТО-1М	ТО-К	ТО-1	ТО-2	ТО-1Н	ТО-1М	ТО-К	ТО-1	ТО-2
...
3	1	2	4	8760	-	730	-	4380	8760	-	25	-	50	100

Приведем предложения по реализации оптимального решения для достижения комплекса целей функционирования СЭ ОНКИ.

Для успешного выполнения комплекса целей функционирования СЭ ОНКИ предлагаю:

1. Подать заявку в предприятие-разработчик и предприятие-изготовитель системы № 1 для коррекции эксплуатационной документации в части касающейся:

а) ведомости ЗИП: изменить количество ЗИП:

z_{1-1-6} – с 25 на 24;

z_{1-2-3} – с 22 на 12;

z_{1-3-8} – с 14 на 26;

б) для инструкции по техническому обслуживанию:

– исключить проведение еженедельного технического обслуживания;

– при проведении ежемесячного технического обслуживания вместо 30% обслуживать 20% самых ненадежных элементов одного типа наименования;

– при проведении полугодового технического обслуживания вместо 60% обслуживать 50% самых ненадежных элементов одного типа наименования.

2. Подать заявку в предприятие-разработчик и предприятие-изготовитель системы № 2 для коррекции эксплуатационной документации в части касающейся:

а) ведомости ЗИП: изменить количество ЗИП:

z_{2-1-17} – с 17 на 20;

z_{2-2-15} – с 26 на 22;

z_{2-4-5} – с 20 на 10;

б) инструкции по техническому обслуживанию:

– исключить проведение еженедельного технического обслуживания;

– при проведении полугодового технического обслуживания вместо 50% обслуживать 70% самых ненадежных элементов одного типа наименования.

3. Подать заявку в предприятие-разработчик и предприятие-изготовитель системы № 3 для коррекции эксплуатационной документации в части, касающейся инструкции по техническому обслуживанию: исключить проведение ежемесячного технического обслуживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа установлено, что для обеспечения своевременной подготовки и пуска РКН необходимо обосновывать оптимальное решение по управлению функ-

ционированием СЭ ОНКИ. Для обоснования оптимального решения предложен научно-методический аппарат, который представляет собой методику обоснования устойчивого решения по управлению функционированием СЭ ОНКИ.

В основе предлагаемой методики для нахождения устойчивого решения лежит метод определения центра тяжести области допустимых значений вероятности достижения комплекса целей. Центр тяжести представляет собой оптимальное решение, которое является вектором параметров СЭ ОНКИ и позволяет достигать цели функционирования СЭ ОНКИ с обеспечением допустимого значения вероятности достижения комплекса целей при воздействии возмущающих факторов.

Методика отличается от известных использованием в качестве критерия устойчивости решения коэффициента, характеризующего максимальное изменение значений неуправляемых параметров СЭ ОНКИ под воздействием возмущающих факторов, при которых гарантируется достижение цели функционирования СЭ ОНКИ. Это позволяет получить количественную оценку устойчивости решения и на ее основе выбрать оптимальное решение.

Список используемых источников

1. Морозова О. В. Модели оценки качества многопараметрического управления сложными системами // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2018. – № 4(100). – С. 161–172.
2. Озерной Н. А., Дронов В. В., Князев Н. В. Математическая модель поддержки принятия решения на формирование оптимального количества запасных частей защищенных пунктов управления // Сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 2021. – С. 33–38.
3. Дьяков А. Н. Модель процесса поддержания готовности технологического оборудования с обслуживанием после отказа // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 174–179.
4. Лиференко В. Д., Гураль Д. А., Легков К. Е. Методика оценивания оперативности принятия решения на примере средств зондирования околоземного космического пространства // I-METHODS. – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 1–18.
5. Вивчарь Р. М., Решетников Д. В., Герасименко С. Ю. Методика выбора значений параметров системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 10-1. – С. 32–37.
6. Клейман Л. А. Методика принятия решений в задаче диагностики элементов информационно-управляющих систем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электроника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 38. – С. 90–109.
7. Резников Б. А. Теория систем и оптимального управления. – МО СССР, 1988. – Ч. 3 : Принятие решений в условиях неопределенности и адаптация. – 140 с.
8. Ермольев Ю. М., Ястремский А. И. Стохастические модели и методы в экономическом планировании. – М. : Гл. ред. физико-математ. литературы, 1979. – 255 с.
9. Калинин В. Н., Резников Б. А., Варакин Е. И. Теория систем и оптимального управления. – Л. : ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1979. – Ч. 1 : Основные понятия, математические модели и методы анализа систем. – 319 с.
10. Резников Б. А. Системный анализ и методы системотехники. – МО СССР, 1990. – Ч. 1 : Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. – 522 с.
11. Лучко С. В. Теория автоматического управления : учебник. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 378 с.
12. Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении : учеб. пособие. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

13. Волкова В. Н., Емельянов А. А. Теория систем и системный анализ в управлении организациями : справочник : учеб. пособие. – М. : Финансы и статистика, 2006. – 848 с.
14. Силич В. А., Силич М. П. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 276 с.
15. Иванов В. А. Эффективные управленческие решения как основа устойчивости управленческой команды // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). – 2010. – № 4. – С. 64–67.
16. Лукина А. В. Методика оценки устойчивости экономических систем // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2013. – № 7(61). – С. 14–20.
17. Завгородняя А. С. Методика принятия решений в адаптивном управлении устойчивым развитием сельскохозяйственных предприятий // Фундаментальные исследования. – 2020. – № 9. – С. 36–40.
18. Билятдинов К. З. Методика оценки устойчивости технических систем // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 10. – С. 25–28.
19. Bilyatdinov K. Z. Model of stability provision and methodology for assessing the stability of big technical systems during operation // International journal of open information technologies. – 2022. – Vol. 10, № 9. – P. 32–40.
20. Старовойтов В. В., Голуб Ю. И. Нормализация данных в машинном обучении // Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси. – 2021. – № 3, т. 18. – С. 83–96.
21. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // Annals Mathematical Statistics. – 1962. – Vol. 33, № 3. – P. 1065–1076.

В. И. Горбулин,
доктор технических наук, профессор;
П. В. Горбулин;
Е. В. Котяшов,
доктор технических наук;
В. А. Чернявский,
кандидат технических наук

МЕТОД РАСЧЕТА ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ДВИГАТЕЛЕМ ОГРАНИЧЕННОЙ ТЯГИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МЕЖОРБИТАЛЬНЫХ ПЕРЕЛЁТОВ

В настоящей работе для поиска решения задачи межорбитального перелета с ограниченной тягой используется начальное приближение, получаемое с помощью полинома восьмой степени. Как показали численные исследования, сформированный на основе полученного решения метод позволяет сократить время маневра космического аппарата, затраты его характеристической скорости и конкретизировать область достижимости космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, межорбитальные перелёты, ограниченная тяга.

ВВЕДЕНИЕ

Совершение межорбитальных перелётов космическими аппаратами (КА) требует приложения, по крайней мере, двух импульсов для случаев, когда исходная и целевая орбиты не пересекаются.

Несмотря на то, что в настоящее время большинство трудностей решения подобных задач так или иначе преодолены, поиск даже импульсного решения требует существенных вычислительных затрат. Известно большое количество работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных исследованию различных частных задач межорбитальных перелётов [2–16].

Оптимизация межорбитальных перелётов прежде всего необходима для повышения эффективности использования доступного запаса рабочего тела разгонных блоков при решении задач выведения космических аппаратов и продления срока активного существования космических аппаратов, функционирующие на орбите которых предполагает выполнение активного маневрирования.

Частным случаем этой задачи является задача оптимизации перелёта в нормальном гравитационном поле с двумя активными участками при фиксированных точках на исходной и конечной орбитах [3, 5]. Аналитического решения для ограниченной тяги данная задача не имеет, а численные методы решения системы дифференциальных уравнений требуют достаточно близкого начального приближения. В качестве такого начального приближения может выступать импульсное решение классической задачи перелёта с исходной орбиты на конечную при фиксированных точках приложения импульсов для центрального гравитационного поля. Однако при этом длительность активного участка после перехода от импульсного решения к ограниченной тяге не должна оказаться слишком большой.

Поиску аналитического решения данной задачи двухимпульсного перелёта в центральном гравитационном поле посвящено большое количество работ. Известны решения [9–14], основанные на поиске корней полиномов различных степеней. Лучшим из них является результат, полученный признанным классиком небесной механики Р. Беттиным [9] на основе полинома одиннадцатой степени. Однако впоследствии было получено более оригинальное

решение этой задачи, основанное на анализе корней полинома восьмой степени, которое используется в настоящей работе для получения начального приближения.

Предлагаемый в данной статье математический аппарат поиска управления КА с ограниченной тягой апробирован при решении задач управления путем удержания геостационарного спутника и уточнения дальности между геостационарными объектами в задаче предотвращения столкновений на основе ситуационного управления [2, 3].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая постановка задачи формулируется как классическая задача оптимизации двухимпульсного перелёта с орбиты на орбиту при фиксированных точках приложения импульсов.

Пусть исходная и конечная орбиты КА заданы на моменты времени t_1 и t_2 векторами $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$:

$$\mathbf{x}_i(t_i) = [\mathbf{r}_i(t_i), \mathbf{V}_i(t_i)]^T,$$

где \mathbf{r}_i – радиус-вектор, $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, x_i, y_i, z_i – координаты в абсолютной геоцентрической системе координат;

\mathbf{V}_i – вектор скорости, $\mathbf{V}_i = [V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}]^T$, V_{xi}, V_{yi}, V_{zi} – компоненты вектора скорости в абсолютной геоцентрической системе координат.

Массогабаритные параметры КА и технические характеристики его двигательной установки заданы вектором \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = [M_0, P, I, \dot{m}]^T,$$

где M_0 – масса КА перед первым включением;

P – модуль вектора тяги, создаваемой двигательной установкой;

\dot{m} – секундный расход топлива двигательной установки;

I – удельный импульс.

Требуется определить кусочно-непрерывную вектор-функцию управления \mathbf{u} , обеспечивающую перевод космического аппарата с орбиты на орбиту с минимальными затратами характеристической скорости

$$\mathbf{u}^* = \arg \min_{\mathbf{u}} \Delta V(\mathbf{u}, \mathbf{u}_{\text{имп}}^*, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{P}), \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_{\text{имп}}^* = [\Delta \mathbf{V}_1^*, \Delta \mathbf{V}_2^*, \mathcal{G}_1^*, \mathcal{G}_2^*],$$

$$\Delta \mathbf{V}_1^* = [\Delta V_{\tau 1}^*, \Delta V_{r 1}^*, \Delta V_{n 1}^*]^T, \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{V}_2^* = [\Delta V_{\tau 2}^*, \Delta V_{r 2}^*, \Delta V_{n 2}^*]^T,$$

где $\mathbf{u}_{\text{имп}}^*$ – вектор-функция управления в импульсной постановке;

$\Delta \mathbf{V}_1^*$ и $\Delta \mathbf{V}_2^*$ – импульсы скорости

$$\Delta \mathbf{V}_1^* = [\Delta V_{\tau 1}^*, \Delta V_{r 1}^*, \Delta V_{n 1}^*]^T \text{ и } \Delta \mathbf{V}_2^* = [\Delta V_{\tau 2}^*, \Delta V_{r 2}^*, \Delta V_{n 2}^*]^T$$

в точках с истинными аномалиями \mathcal{G}_1 и \mathcal{G}_2 на исходной и конечной орбитах соответственно;

$\Delta V_{\tau}, \Delta V_r, \Delta V_n$ – трансверсальная, радиальная и боковая составляющие приращения вектора скорости соответственно.

Отличием приведенной постановки задачи от классической является предположение о наличии начального приближения $\mathbf{u}_{\text{имп}}^*$, являющегося решением данной задачи в импульсной постановке, характеризующееся векторами импульсов скорости $\Delta \mathbf{V}_1^*$ и $\Delta \mathbf{V}_2^*$ в точках с истинными аномалиями ϑ_1 и ϑ_2 на исходной и конечной орбитах соответственно.

Решение поставленной задачи в импульсной постановке требует решения следующих четырех подзадач.

Подзадача 1. По заданным параметрам исходной и целевой орбит и по известным точкам приложения импульсов скорости требуется найти угловую дальность перелёта β и углы некомпланарности γ_1, γ_2 между исходной и переходной орбитами, а также между переходной и целевой соответственно.

Подзадача 2. По заданным параметрам исходной и целевой орбит, по известным точкам приложения импульсов скорости и фиксированной величине большой полуоси $a_{\text{п}}$ переходной орбиты требуется найти ее параметры.

Подзадача 3. По заданным параметрам исходной, переходной и целевой орбит и по известным точкам приложения импульсов скорости требуется определить векторы импульсов скорости $\Delta \mathbf{V}_1 = [\Delta V_{\tau 1}, \Delta V_{r1}, \Delta V_{n1}]^T$ и $\Delta \mathbf{V}_2 = [\Delta V_{\tau 2}, \Delta V_{r2}, \Delta V_{n2}]^T$, обеспечивающие перевод КА с исходной орбиты на переходную в начальной точке и переход с промежуточной на заданную орбиту в конечной точке.

Подзадача 4. Провести оптимизацию переходов, с учетом решений подзадач 1–3 решить уравнение (1) и найти оптимальные элементы переходной орбиты.

Решение этих подзадач позволяет получить $\mathbf{u}_{\text{имп}}^*$, которое используется для перехода от импульсного управления к управлению с ограниченной тягой.

ПЕРЕХОД ОТ ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ К УПРАВЛЕНИЮ С ОГРАНИЧЕННОЙ ТЯГОЙ

При переходе от импульсного управления к управлению с непрерывной тягой, помимо точки приложения импульса, его импульса и ориентации в орбитальной системе может учитываться множество факторов и параметров, оказывающих существенное влияние на итоговое решение задачи. К ним в первую очередь следует отнести переходные процессы при включении и выключении двигательной установки и функцию управления ориентацией космического аппарата.

В данной работе предполагается, что переходные процессы при включении и выключении двигательной установки отсутствуют, а ориентация КА в процессе маневрирования остается постоянной в орбитальной системе координат, т. е. КА осуществляет разворот в инерциальной системе координат.

Указанные допущения позволяют вектор-функцию управления \mathbf{u} описать следующим образом:

$$\mathbf{u} = \{ \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, P, t_{\text{н1}}, t_{\text{акт1}}, t_{\text{акт2}}, t_{\text{к2}}, \dot{m}, M_0 \},$$

$$\alpha_i = \arctg \frac{\Delta V_{ri}}{\Delta V_{\tau i}}, \quad \beta_i = \arcsin \frac{\Delta V_{ni}}{\Delta V_i},$$

где $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ – углы ориентации вектора тяги в орбитальной системе координат для первого и второго включений соответственно, которые определяются по найденным векторам импульсов скорости $\Delta \mathbf{V}_1 = [\Delta V_{\tau 1}, \Delta V_{r1}, \Delta V_{n1}]^T$ и $\Delta \mathbf{V}_2 = [\Delta V_{\tau 2}, \Delta V_{r2}, \Delta V_{n2}]^T$;

- $t_{н1}$ – момент времени начала первого активного участка;
 $t_{к2}$ – момент времени окончания второго активного участка;
 $t_{акт1}, t_{акт2}$ – длительность первого и второго активных участков соответственно.

Длительность первого и второго активных участков определяется по формуле К. Э. Циолковского:

$$M_{к1} = \frac{M_0}{e^{\Delta V_1/I}}, \quad t_{акт1} = \frac{M_0 - M_{к1}}{\dot{m}},$$

$$M_{к2} = \frac{M_{к1}}{e^{\Delta V_2/I}}, \quad t_{акт2} = \frac{M_{к1} - M_{к2}}{\dot{m}},$$

где $M_{к1}, M_{к2}$ – масса КА после первого и второго включения соответственно;

В момент времени окончания второго активного участка $t_{к2}$ радиус-вектор $\mathbf{r}_{КА}$ и вектор скоростей $\mathbf{v}_{КА}$ КА должны оказаться равными \mathbf{r}_2 и \mathbf{v}_2 соответственно:

$$\Delta r(t_{к2}) = \sqrt{\Delta x^2(t_{к2}) + \Delta y^2(t_{к2}) + \Delta z^2(t_{к2})},$$

$$\Delta V(t_{к2}) = \sqrt{\Delta V_x^2(t_{к2}) + \Delta V_y^2(t_{к2}) + \Delta V_z^2(t_{к2})},$$

$$\Delta x(t_{к2}) = x_2 - x_{КА}(\mathbf{u}, t_{к2}),$$

$$\Delta y(t_{к2}) = y_2 - y_{КА}(\mathbf{u}, t_{к2}),$$

$$\Delta z(t_{к2}) = z_2 - z_{КА}(\mathbf{u}, t_{к2}),$$

$$\Delta V_x(t_{к2}) = V_{x2} - V_{КАx}(\mathbf{u}, t_{к2}),$$

$$\Delta V_y(t_{к2}) = V_{y2} - V_{КАy}(\mathbf{u}, t_{к2}),$$

$$\Delta V_z(t_{к2}) = V_{z2} - V_{КАz}(\mathbf{u}, t_{к2}).$$
(3)

Вектор-функция управления \mathbf{u} зависит от 11 параметров. Модуль вектора тяги P и секундный расход топлива \dot{m} считаются постоянными, также при расчетах не учитываются переходные процессы при включении и выключении двигательной установки. Остальные восемь параметров могут варьироваться. Для того чтобы система (3) была разрешаема, необходимо зафиксировать еще два параметра. Наиболее подходящими для этого являются моменты начала первого включения и окончания второго включения ДУ. Тогда с учетом принятых допущений систему уравнений (3) можно записать в виде следующего векторного уравнения:

$$\mathbf{u} = \{\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, t_{акт1}, t_{акт2}\},$$

$$\Lambda_{(6)} = \mathbf{F}_{[6,6]} \cdot \Delta \mathbf{u}_{(6)},$$
(4)

$$\Lambda_{(6)} = [\Delta x(t_{к2}), \Delta y(t_{к2}), \Delta z(t_{к2}), \Delta V_x(t_{к2}), \Delta V_y(t_{к2}), \Delta V_z(t_{к2})]^T,$$

$$\mathbf{F}_{[6,6]} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{16} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{26} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{61} & f_{62} & \dots & f_{66} \end{bmatrix},$$

$$\Delta \mathbf{u}_{(6)} = [\Delta \alpha_1, \Delta \beta_1, \Delta \alpha_2, \Delta \beta_2, \Delta t_{н1}, \Delta t_{к2}]^T,$$

где $\mathbf{F}_{[6,6]}$ – матрица частных производных.

Из уравнения (4) искомые приращения $\Delta \mathbf{u}_{(6)}$ параметров управления КА определяются по формуле

$$\Delta \mathbf{u}_{(6)} = \mathbf{F}_{[6,6]}^{-1} \cdot \Lambda_{(6)}. \quad (5)$$

Так как рассматривается управляемое движение с учетом сил солнечного давления, притяжения Луны и Солнца, нецентральности гравитационного поля Земли, то частные производные, входящие в правую часть выражений (4) и (5), могут быть найдены только численным путем.

Таким образом, полученная система линейных уравнений (3) в совокупности с численным расчетом частных производных позволяют уточнять параметры вектора-функции управления КА.

Результатом итерационного процесса будет такое управление \mathbf{u} , которое обеспечит попадание КА в заданную окрестность пространства с параметрами \mathbf{x}_2 . После достижения заданной точности $\Delta \mathbf{x}_2$ ($\Delta \mathbf{x}_2 = [\Delta r_2, \Delta V_2]^T$) считается, что краевые условия на конечном участке выполняются, т. е.

$$\begin{cases} |\Delta r(t_{k_2})| \leq \Delta r_{\max}, \\ |\Delta V(t_{k_2})| \leq \Delta V_{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ С ДВИГАТЕЛЕМ ОГРАНИЧЕННОЙ ТЯГИ

Предлагаемый математический аппарат позволяет построить алгоритм формирования управления КА с ограниченной тягой, основными этапами которого являются:

1. Выбор предполагаемого момента времени завершения перелёта t_k .
 2. Поиск импульсного решения $\mathbf{u}_{\text{имп}}^*$ задачи перелёта КА из его текущего положения в заданную точку за время T .
 3. Вычисление затрат характеристической скорости $\Delta V_{\text{хар имп}}$ для импульсного решения и их сравнение с запасом характеристической скорости КА $\Delta V_{\text{хар}}$. Если $\Delta V_{\text{хар имп}} > \Delta V_{\text{хар}}$, то осуществляется переход к пункту 1. При этом момент времени встречи $t_{\text{встр}}$ отодвигается на величину Δt , т. е. время перелета T увеличивается.
 4. Выбор начального приближения управляющей вектора-функции \mathbf{u} .
 5. Выполнение прогноза движения КА на интервале времени сближения $T = [t_0, t_k]$ с найденным управлением \mathbf{u} .
 6. Расчет вектора $\Lambda_{(6)}$ расхождения параметров движения КА после окончания второго активного участка. Если выполняется система неравенств (6), то вычисления завершаются.
 7. Расчет матрицы частных производных $\mathbf{F}_{[6,6]}$ численным путем.
 8. Вычисление обратной матрицы $\mathbf{F}_{[6,6]}^{-1}$.
 9. Определение приращения $\Delta \mathbf{u}_{(6)}$ параметров управления КА в соответствии с выражением (4).
 10. Корректировка вектора-функции управления \mathbf{u} в соответствии с найденными приращениями, переход к пункту 5.
- Вычисления продолжают, пока не будет найдено решение, удовлетворяющее условию (6).

Структурно-логическая схема алгоритма представлена на рис. 1. При этом на схеме показан этап поиска решения задачи в импульсной постановке. Его необходимость в полной реализации алгоритма обусловлена тем, что при переходе от импульсного решения к решению с непрерывной тягой длительность активного участка будет неизбежно возрастать, и, следовательно, будут увеличиваться затраты характеристической скорости. В связи с этим может возникнуть ситуация, когда имеющегося запаса рабочего тела для реализации управления с непрерывной тягой окажется недостаточно в отличие от импульсного решения. В этом случае потребуется увеличение времени перелета T .

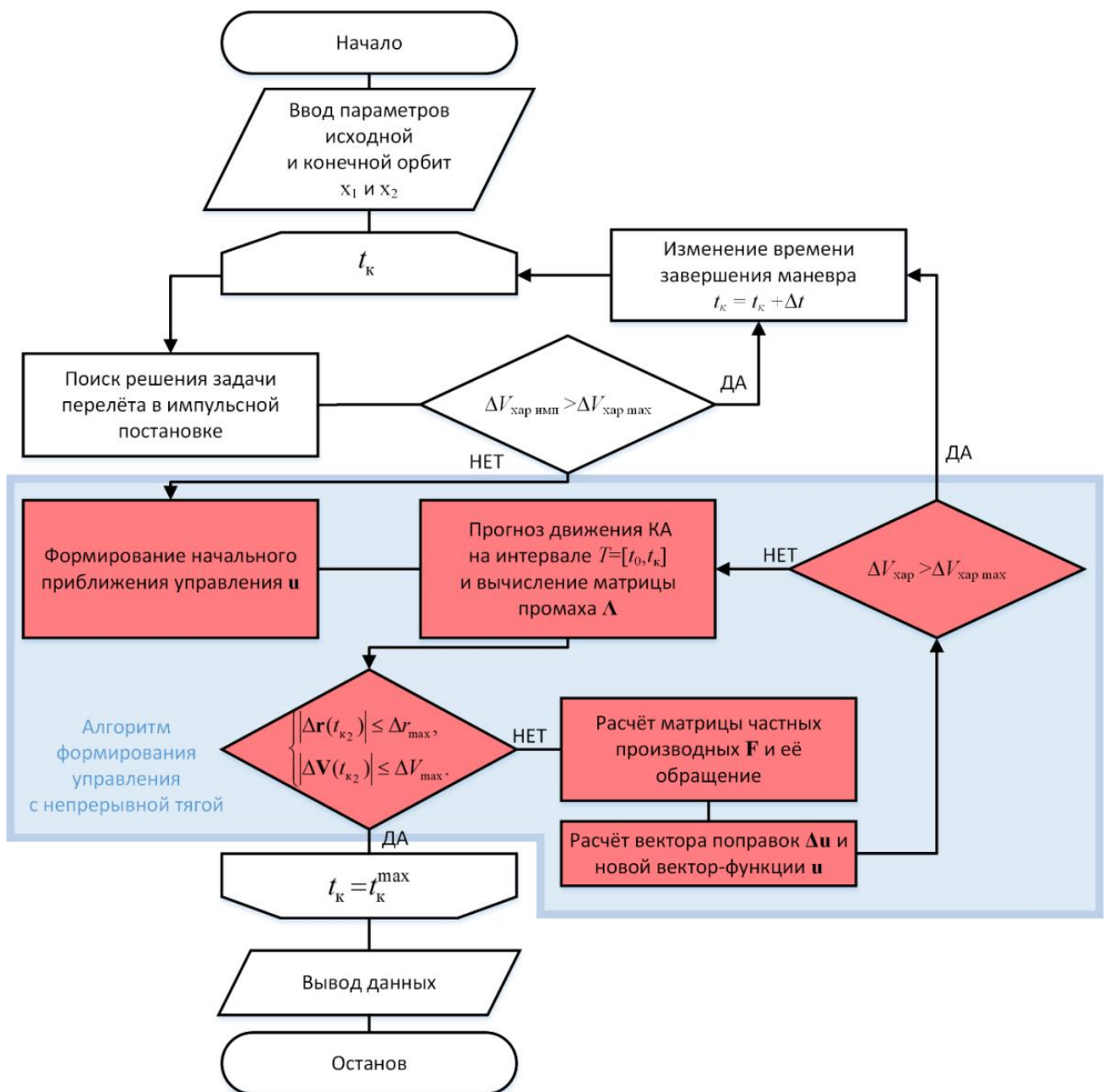


Рис. 1. Структурно-логическая схема алгоритма

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕЖОРБИТАЛЬНЫХ ПЕРЕЛЁТОВ КА

На основе предлагаемого метода было проведено математическое моделирование межорбитальных перелётов КА в области геостационарных орбит с различным уровнем тяги двигательной установки. Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Начальные условия для моделирования межорбитального перелёта

Наименование параметра	Параметры движения КА	
	В исходной точке стояния ГСО	В требуемой точке стояния ГСО
Большая полуось, м	42509074.34	42166441,92
Эксцентриситет	9.026e-007	0,000096
Наклонение орбиты, град	0.3	0,091
Аргумент широты перигея, град	358.15	89,94
Прямое восхождение восходящего узла, град	0.0	76,75
Истинная аномалия, град	229.53	321,02
Масса КА, кг	100	
Площадь миделя, м ²	3.3	

Таблица 2

Параметры двигательной установки КА

Номер исследуемого варианта	1	2	3	4	5
Тяга двигательной установки, Н	2	4	6	8	10
Секундный расход топлива, кг/с	0.00119	0.0023 8	0.0035 7	0.0047 6	0.0059 5
Удельный импульс, м/с	1680.67				

С помощью метода оптимизации межорбитальных перелётов в импульсной постановке [2] было найдено решение задачи для заданных исходных данных. В табл. 3 приведены результаты затрат характеристической скорости и времени перелёта для импульсного решения и решения для ограниченной тяги. Длительность перелёта во всех вариантах составила 19 часов 40 минут.

Таблица 3

Сравнение импульсного решения и решения для ограниченной тяги

№	Параметры импульсов	ΔV_{τ}	ΔV_r	ΔV_{τ}	$\Delta V_{\text{хар}}$, м/с	$\frac{\Delta V_{\text{хар}}}{\Delta V_{\text{харимп}}}$	Начальная длительность включения, с	Уточненная длительность включения, с	Доля активного участка, %
0	$\Delta \vec{V}_1$	0.339	0.939	0.050	79.77	-	-	-	
	$\Delta \vec{V}_2$	- 0.444	0.892	0.085	65.38	-	-	-	
1	$\Delta \vec{V}_1$	0.096	0.990	0.100	131.68	1.651	8700.00	13871.62	19.59
	$\Delta \vec{V}_2$	- 0.142	0.982	0.120	104.73	1.602	7200.00	11232.46	15.87
2	$\Delta \vec{V}_1$	0.236	0.970	0.058	99.22	1.244	4300.00	5340.45	7.54
	$\Delta \vec{V}_2$	- 0.309	0.947	0.085	80.41	1.230	3600.00	4382.94	6.19
3	$\Delta \vec{V}_1$	0.274	0.960	0.054	93.52	1.172	2900.00	3368.80	4.76
	$\Delta \vec{V}_2$	- 0.3564	0.931	0.084	74.90	1.146	2400.00	2731.92	3.86

Окончание табл. 3

№	Параметры импульсов	ΔV_τ	ΔV_r	ΔV_τ	$\Delta V_{\text{хар}},$ м/с	$\frac{\Delta V_{\text{хар}}}{\Delta V_{\text{харимп}}}$	Начальная длительность включения, с	Уточненная длительность включения, с	Доля ак- тивного участка, %
4	$\Delta \vec{V}_1$	0.286	0.957	0.053	92.55	1.160	2100.00	2501.90	3.53
	$\Delta \vec{V}_2$	0.372	0.925	0.084	77.09	1.179	1800.00	2105.79	2.97
5	$\Delta \vec{V}_1$	0.295	0.954	0.053	92.02	1.154	1700.00	1990.74	2.81
	$\Delta \vec{V}_2$	0.384	0.920	0.084	76.75	1.174	1400.00	1677.53	2.37

На рис. 2 представлены результаты исследования сходимости процесса итерационных вычислений. На графиках показаны зависимости значений параметров $|\Delta \mathbf{r}(t_{k_2})|$ и $|\Delta \mathbf{V}(t_{k_2})|$ в конце второго активного участка в зависимости от номера итерации уточнения параметров маневров для различных значений тяги ДУ.

Из рис. 2 видно, что с использованием начального приближения, найденного в импульсной постановке, итерационный процесс сходится достаточно быстро. Следует отметить, что после вычисления вектора $\Delta \mathbf{u}_{(6)}$ для лучшей сходимости итерационного процесса значения Δt_{n1} и Δt_{k2} ограничивались Δt_{\max} (при моделировании было выбрано значение $\Delta t_{\max} = 100$ с). Остальные параметры вектора $\Delta \mathbf{u}_{(6)}$ уменьшались пропорционально. При этом численное значение коэффициента k не должно превышать единицу.

$$\Delta \mathbf{u}_{(6)\text{огр}} = \Delta \mathbf{u}_{(6)} \cdot k,$$

$$k = \min \left[\frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{n1}}, \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{k2}}, 1 \right].$$

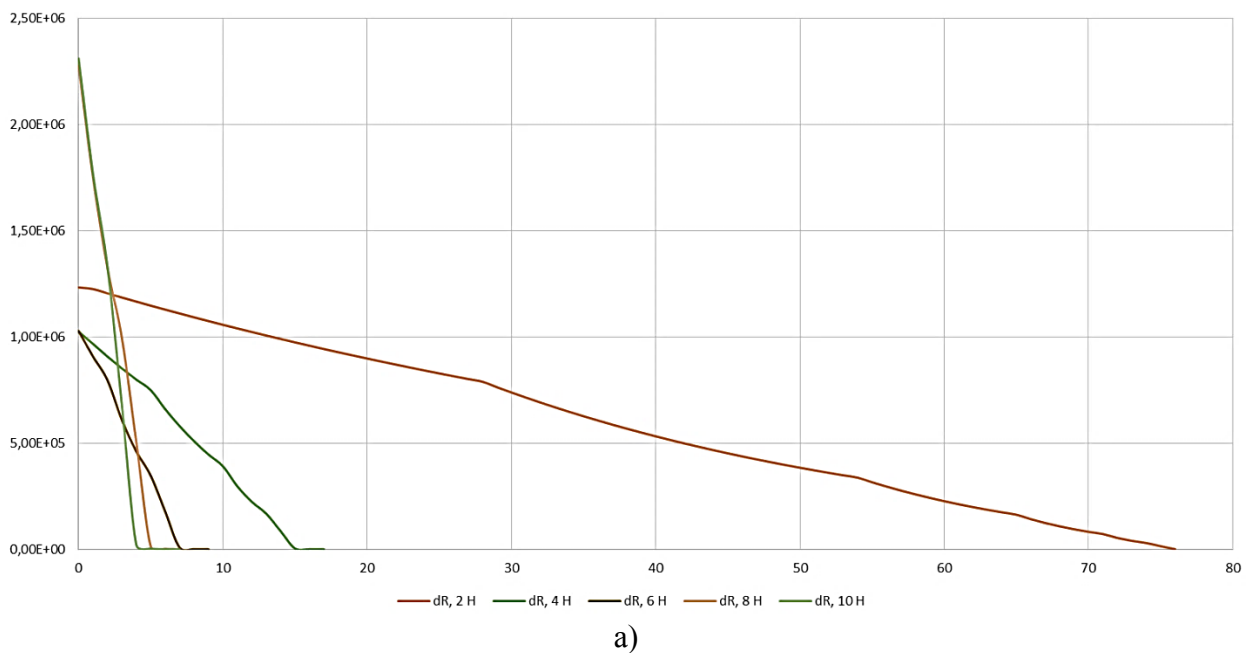


Рис. 2. Сходимость вычислительного процесса (начало):

а – по дальности до требуемого положения КА в конце второго активного участка;
б – по скорости КА относительно требуемой в конце второго активного участка

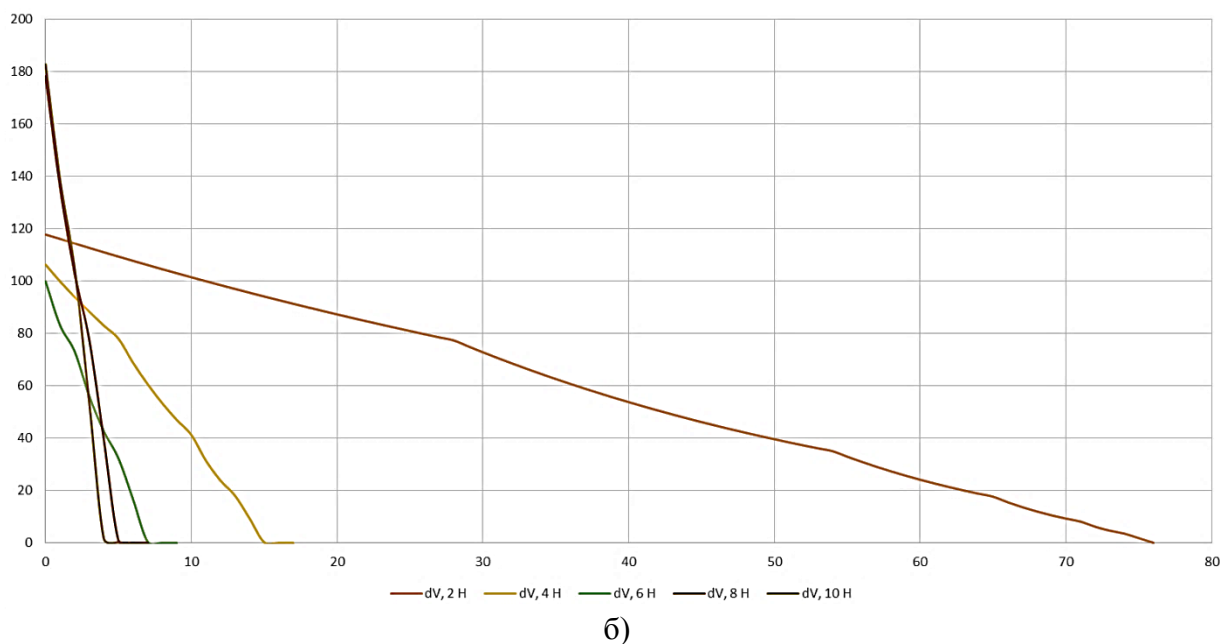


Рис. 2. Сходимость вычислительного процесса (окончание):
а – по дальности до требуемого положения КА в конце второго активного участка;
б – по скорости КА относительно требуемой в конце второго активного участка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный метод поиска управления КА для межорбитальных перелётов на основе импульсного решения позволяет достаточно быстро осуществить поиск решения в постановке с ограниченной тягой. При этом затраты характеристической скорости для ограниченной тяги могут достигать 65% по сравнению с импульсным решением (при котором допускается «скачкообразное» изменение вектора скорости).

Также стоит отметить, что суммарная длительность активных участков для тяги в 2 Н составила более 35% от длительности перелёта. Это доказывает, что предлагаемый метод обладает хорошей сходимостью.

Применение предложенного алгоритма в бортовом и наземном комплексах управления позволит сократить время маневра, затраты характеристической скорости и конкретизировать область достижимости космического аппарата с двигателем ограниченной тяги. Это особенно актуально при планировании межорбитальных перелётов. При этом конечные условия могут быть заданы как на конкретный момент времени, так и на произвольный (т. е. должно обеспечиваться попадание КА в заданную точку космического пространства с заданной скоростью). Однако следует отметить, что переходить от импульсного решения к постановке задачи с ограниченной тягой не всегда целесообразно. В первую очередь эта возможность определяется соотношением параметров двигательной установки КА и его массогабаритных характеристик. В случае, если длительность активных участков становится соизмерима с длительностью межорбитального перелёта, для решения задачи необходимо применять другие подходы.

Список используемых источников

1. *Силантьев С. Б., Фоминов И. В., Королёв С. С.* Роботы на орбите // Журнал ВКС. – 2016. – № 2 (87). – URL: <https://www.vesvks.ru/vks/article/roboty-na-orbite-16158> (дата обращения: 4.06.2023).
2. Методический подход к управлению удержанием геостационарного спутника в заданной точке стояния с учетом дополнительных фазовых ограничений / В. И. Горбулин [и др.] // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 43–68.
3. Методика уточнения дальности между геостационарными объектами в задаче предотвращения столкновений на основе ситуационного управления / В. А. Чернявский [и др.] // Информация и космос. – 2019. – № 4. – С. 55–60.
4. *Ислентьев Е. В.* Система обеспечения безопасного управления движением космического аппарата на геостационарной орбите // Решетневские чтения. – Т. 1, № 16. – 2012. – С. 149–150.
5. *Платонов В. Н.* Одновременное управление движением центра масс и вокруг центра масс при маневрах космических аппаратов на геостационарной и высокоэллиптических орбитах с использованием электрореактивных двигателей // Космическая техника и технологии. – 2013. – № 1. – С. 58–67.
6. *Красильщиков М. Н., Малышев В. В., Фёдоров А. В.* Автономная реализация динамических операций на геостационарной орбите. II. Синтез алгоритмов управления // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2016. – № 6. – С. 107–128.
7. *Назаров А. Е.* Решение задачи высокоточного удержания геостационарного космического аппарата в заданной точке «стояния» // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. – М., 2013. – С. 92–153.
8. Оптимизация схемы выведения космического аппарата с ограничениями по выбору интервалов включения двигательной установки / А. А. Авксентьев [и др.] // Вопросы электро-механики. – 2012. – № 5. – С. 7–13.
9. *Беттин Р.* Наведение в космосе. – М. : Наука, 1966. – 448 с.
10. *Ильин В. А., Кузмак Г. Е.* Оптимальные перелёты космических аппаратов. – М. : Наука, 1976. – 744 с.
11. *Охоцимский Д. Е., Сихарулидзе Ю. Г.* Основы механики космического полета. – М. : Наука, 1990. – 448 с.
12. *Эльясберг П. Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М. : Наука, 1971. – 541 с.
13. *Эрике К.* Космический полет. – М. : Наука, 1969. – 241 с.
14. *Эскобал П.* Движение по орбитам. – М. : Мир, 1981. – 541 с.

В. А. Горин,
кандидат технических наук;
В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
И. В. Хомич

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В настоящее время возрастают требования к надежности систем электроснабжения и качеству электроэнергии во всех режимах их работы. Учитывая недостаточный уровень надежности систем внешнего энергоснабжения, гарантировать выполнение наземными комплексами задач по предназначению невозможно без применения систем автономного (резервного) электроснабжения. В связи с этим система автоматического регулирования возбуждения генератора, работающего в системе автономного электроснабжения, должна иметь высокое быстродействие, должна обладать свойствами адаптивности и обеспечивать требуемое качество электроэнергии. Использование нейросетевой модели системы электроснабжения позволит решить данную задачу.

Ключевые слова: система автоматического регулирования возбуждения, система автономного электроснабжения, ПИД-регулятор, настройка параметров.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в связи с постоянно возрастающим уровнем оснащения технологических и технических систем наземных комплексов космических войск (НК КВ) оборудованием на базе вычислительной и микропроцессорной техники, все в большей степени возрастают требования к надежности систем электроснабжения и качеству электроэнергии во всех режимах их работы. Учитывая недостаточный уровень надежности систем внешнего энергоснабжения (электрических сетей энергоснабжающих организаций, износ электрических сетей, который достигает 60%), технологическое и моральное устаревание парка оборудования, нарастающий физический износ действующего оборудования систем электроснабжения (СЭС) комплексов, гарантировать выполнение наземными комплексами задач по предназначению порой невозможно без применения систем автономного (резервного) электроснабжения (САЭ). При этом в САЭ используются в качестве источников электроэнергии дизель-генераторные агрегаты (ДГА), представляющие собой энергетическую установку, состоящую из первичного двигателя – дизеля и синхронного генератора (СГ), которому на сегодняшний день адекватной альтернативы не существует [1].

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОНОМНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Вводимые в эксплуатацию в качестве автономных источников электроэнергии современных НК ДГА оснащаются микропроцессорными регуляторами возбуждения СГ, реализующими ПИД-законы регулирования. Основным назначением таких регуляторов при работе СГ в электрической сети является поддержание заданных значений напряжения на шинах станции и статизма по реактивному току или реактивной мощности. Реализованные в таких регуляторах технологические и защитные функции направлены на обеспечение в первую очередь работы больших электроэнергетических систем (ЭЭС). В этом случае с учетом применения

стабилизирующего воздействия по производной тока ротора СГ I'_B и стабилизирующих воздействий по изменению активной мощности ΔP и частоты Δf или по изменению Δf и производной частоты f' закон регулирования имеет вид

$$y = k_1 \Delta U + k_2 U' + k_3 \int_0^t \Delta U dt + k_4 I'_B + k_5 \Delta f + k_6 f',$$

где y – регулирующее воздействие на выходе регулятора;
 $\Delta U, U'$ – отклонение и производная напряжения СГ;
 I'_B – производная тока возбуждения (тока ротора) СГ;
 $\Delta f, f'$ – изменение и производная частоты;
 $k_1 - k_6$ – коэффициенты передачи (усиления) по соответствующим регулирующим воздействиям.

Такой закон регулирования важен для СГ большой мощности, особенно при работе их на сеть с длинными, сильно нагруженными линиями электропередачи.

Следствием применения таких ДГА в САЭ НК, которые имеют ряд особенностей и существенно отличаются от систем большой энергетики, являются неоправданные функциональная избыточность, сложность эксплуатации, высокая стоимость используемых регуляторов возбуждения.

К особенностям САЭ НК по сравнению с ЭЭС, которые необходимо учитывать при разработке систем автоматического регулирования возбуждения СГ (САРВ СГ) для САЭ, можно отнести следующие:

- САЭ и ЭЭС – это системы различной мощности и различных уровней напряжения;
- в САЭ и ЭЭС используются различные первичные двигатели. Генераторы электростанций ЭЭС приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами (турбогенераторы с частотой вращения 1500–3000 об/мин) и гидротурбинами (гидрогенераторы с частотой вращения 50–600 об/мин). В САЭ в основном применяются дизельные двигатели, реже при больших мощностях (меньше 1000 кВт) – газовые турбины;
- основным режимом работы ГА в СЭС является режим параллельной работы с другими ГА системы. В САЭ возможно сочетание режимов автономной работы на изолированную нагрузку и параллельной работы с другими ГА (как правило, однотипными) и сетью;
- в САЭ, по сравнению с ЭЭС, линии электропередачи являются достаточно короткими, имеющими незначительные активные и реактивные сопротивления. Это приводит к более интенсивным изменениям напряжения и частоты при коммутациях потребителей, включении на параллельную работу и при авариях, а также к увеличению токов переходных процессов в статорных цепях генераторных установок;
- относительно небольшие постоянные времени электрических цепей САЭ создают предпосылки к увеличению скоростей протекания электромагнитных переходных процессов в генераторных установках;
- соизмеримость мощностей генераторов и нагрузки, необходимость автономной работы генераторов на электроприводы большой мощности приводят к более тяжелым переходным режимам;
- повсеместное внедрение силовой полупроводниковой преобразовательной техники существенно усложняет задачу обеспечения качества электроэнергии в САЭ;
- существует многообразие режимов работы ГА в САЭ. Линейные регуляторы, настроенные на работу вблизи одного (номинального) режима, не являются одинаково эффективными для всего многообразия состояний СЭС;
- ГА, работающие в САЭ, не требуют установки защит от рассинхронизации.

Приведенные особенности являются основанием для необходимой адаптации принципов и технических решений, используемых при построении перспективных автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов САЭ НК, к особенностям их функциониро-

вания в системах автономного электроснабжения НК. При этом системы автоматического регулирования возбуждения СГ (САРВ СГ) должны иметь высокое быстродействие, должны обладать свойствами адаптивности и обеспечивать качество электроэнергии (ЭЭ), соответствующее требованиям ответственных потребителей НК.

В ряде публикаций показано, что интеллектуальные системы регулирования, в частности с использованием нейронной сети, позволяют обеспечить более высокое быстродействие и меньшие провалы напряжения, чем традиционные системы регулирования для СГ ЭЭС, а также позволяют добиться существенного повышения эффективности и оптимальности процессов управления [2, 3].

Кроме того, качество регулирования можно улучшить, если ошибку вычислять отдельно для пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих регулирования, т. е. взвешивать уставки по трем каналам регулирования.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

В связи с вышеизложенным для обеспечения соответствующих свойств систем автоматического регулирования напряжения (САРВ) СГ САЭ предлагается использовать адаптивную оптимизацию параметров 2DOFPID регулятора (ПИД-регулятора с двумя степенями свободы) возбуждения на основе нейросетевой модели управляемого объекта (САЭ).

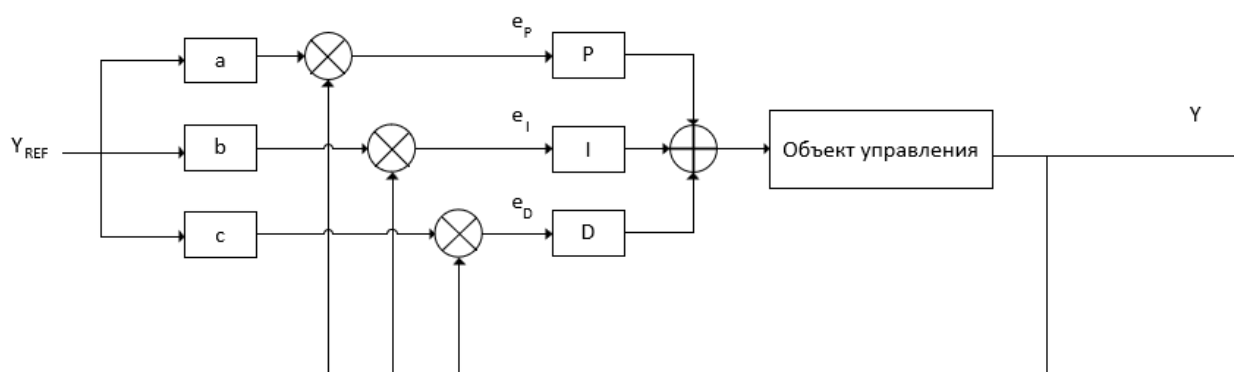


Рис. 1. Структурная схема САУ, оборудованной 2DOFPID регулятором (где P , I , D – блоки выработки пропорционального, интегрального и дифференциального управляющих сигналов соответственно; a , b , c – вес уставки для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно)

Закон регулирования напряжения ПИД-регулятором в простейшем виде выглядит следующим образом:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где t – время;

K_p , K_i , K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты соответственно.

При записи в виде передаточных функций алгоритм приобретает вид

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{N s + 1} \right) E(s),$$

где N – параметр фильтра.

При переходе к цифровой реализации закона ПИД-регулирования производится переход от непрерывных передаточных функций к дискретным. Для перехода к дискретному интегратору используется преобразование Тастина первого порядка, а для перехода к дискретному варианту дифференцирующего звена с фильтром используется инвариант площади производной импульса.

Дискретная форма ПИД-регулятора будет иметь вид

$$U(z) = \left(K_p + \frac{\tau K_i}{2} \frac{1 + \frac{1}{z}}{1 - \frac{1}{z}} + \frac{K_d}{\tau} \left(1 - e^{-\frac{N\tau}{K_d}} \right) \frac{1 - \frac{1}{z}}{1 - e^{-\frac{N\tau}{K_d} \frac{1}{z}}} \right) E(z),$$

где τ – частота дискретизации.

При переходе к закону регулирования с двумя степенями свободы (2DOFPID), учитывая, что $E(z) = Y_{REF} - Y(z)$, где $Y(z)$ – значение выхода системы, Y_{REF} – уставка системы, получим

$$U(z) = \left(aK_p + b \frac{\tau K_i}{2} \frac{1 + \frac{1}{z}}{1 - \frac{1}{z}} + c \frac{K_d}{\tau} \left(1 - e^{-\frac{N\tau}{K_d}} \right) \frac{1 - \frac{1}{z}}{1 - e^{-\frac{N\tau}{K_d} \frac{1}{z}}} \right) Y_{REF} - \left(K_p + \frac{\tau K_i}{2} \frac{1 + \frac{1}{z}}{1 - \frac{1}{z}} + \frac{K_d}{\tau} \left(1 - e^{-\frac{N\tau}{K_d}} \right) \frac{1 - \frac{1}{z}}{1 - e^{-\frac{N\tau}{K_d} \frac{1}{z}}} \right) Y(z),$$

где a, b, c – параметры, отвечающие за вклад значения уставки Y_{REF} в величину управляющего воздействия.

Используя некоторый критерий оптимальности \mathcal{F} и некоторую область допустимых значений параметров 2DOFPID-регулятора \mathcal{B} , в которой параметры переходного процесса (перерегулирование, время переходного процесса и т. д.) удовлетворяют некоторым техническим требованиям к функционированию системы, можно для каждого режима работы поставить следующую задачу ограниченной оптимизации: найти оптимальные, в смысле критерия \mathcal{F} , значения параметров ПИД-регулятора ($K_p, K_i, K_d, N, a, b, c$), которые находились бы в области \mathcal{B} .

В качестве критерия оптимальности \mathcal{F} определим следующий интегральный критерий качества переходного процесса

$$\mathcal{F} = \int_0^{\infty} (t|e(t)| + R(t))dt,$$

где t – время;

$e(t)$ – ошибка системы;

$R(t)$ – функция колебательности, численно определяемая по формуле

$$R(t) = \max\left(e(t) \frac{de(t)}{dt}, 0\right).$$

Для вычисления значения критерия \mathcal{F} необходимо для каждого набора параметров 2DOFPID-регулятора при одних и тех же начальных условиях симулировать переходный процесс, что даже в случае использования упрощенной математической модели протекания физических процессов в САЭ (модели Парка – Горева) является трудоемкой процедурой. Учитывая, что для решения задачи ограниченной оптимизации таких вычислений могут понадобиться тысячи, идея оптимизации параметров непосредственно на объекте отпадает сразу за невозможностью реализации, а возможность реализации на математической модели должна быть поставлена под вопрос вследствие чрезмерной трудоемкости.

Для решения указанной проблемы предлагается как модель САЭ использовать определенным образом устроенную рекуррентную нейронную сеть, обученную на выборке из различных переходных процессов, происходящих в системе автономного электроснабжения (рис. 2).

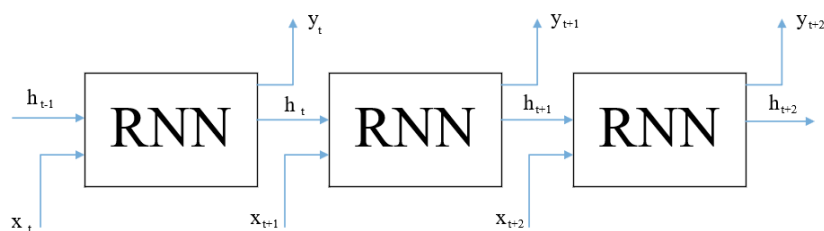


Рис. 2. Структурная схема распространения сигнала в рекуррентной нейронной сети (здесь RNN – блок рекуррентной нейронной сети, x_t – вход нейронной сети в момент времени t , h_t – скрытое состояние нейронной сети в момент времени t , y_t – выход нейронной сети в момент времени t)

Должным образом обученная нейронная сеть может в широком диапазоне изменения входных и управляющих величин с высокой точностью определять соответствующее значение выходной величины

$$y(t_k) = \aleph(y(t_{k-1}), \dots, y(t_{k-N_y}), f(t_{k-1}), \dots, f(t_{k-N_f}), u(t_{k-1}), \dots, u(t_{k-N_u})),$$

где \aleph – оператор применения нейронной сети;
 $y(t_k), f(t_k), u(t_k)$ – значение выходной, возмущающей и управляющей величин в момент времени t_k ;
 N_y, N_f, N_u – глубина памяти по выходной, возмущающей и управляющей величинам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование нейросетевой модели САЭ позволит значительно снизить вычислительную стоимость оптимизации параметров 2DOFPID регулятора возбуждения бесщеточного синхронного генератора. Это положительно скажется на многообразии наборов оптимальных параметров для различных режимов работы САЭ. Большое количество заранее оптимизированных наборов параметров позволит открыть дорогу к адаптивной оптимизации этих параметров непосредственно в ходе эксплуатации.

Список используемых источников

1. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 года. – М. : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 90 с.
2. Утляков Г. Н., Валеев А. Р., Асадуллин В. М. Разработка и исследование интеллектуальных систем регулирования напряжения бесконтактных синхронных генераторов // Вестник УГАТУ. – 2008. – Т. 10, № 1 (26). – С. 174–179.
3. Поляхов Н. Д., Приходько И. А., Карачев А. А. Бесщеточные системы возбуждения синхронного генератора // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. : Автоматизация и управление. – 2005. – Вып. 1. – С. 9–15.

С. С. Камчалов;
В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
Д. В. Рыбаков,
кандидат технических наук

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК

Системы электроснабжения специальных объектов космических войск в большинстве своем эксплуатируются в условиях превышения установленных сроков. В настоящее время на уровне государства рассматриваются несколько сценариев развития электроэнергетической отрасли страны, которые направлены на внедрение новых энергоэффективных инновационных технологий, повышающих наблюдаемость и управляемость электроэнергетических систем на основе применения современных IT-технологий. В связи с этим возникает необходимость обоснования направлений совершенствования находящихся в эксплуатации систем электроснабжения специальных объектов, учитывающих, с одной стороны, современные направления развития электрических сетей, с другой – особенности функционирования специальных объектов. Исходя из того, что системы электроснабжения специальных объектов являются сложными системами кибернетического типа, в статье рассмотрены направления их совершенствования, основанные на применении системного подхода.

Ключевые слова: специальный объект, система электроснабжения, направления развития, системный подход, управление состоянием системы.

ВВЕДЕНИЕ

К числу первоочередных задач развития систем вооружения относятся задачи повышения их боевой устойчивости, т. е. способности выполнять заданные функции в условиях воздействия поражающих факторов оружия вероятного противника, а при нарушении их работы – восстанавливать работоспособное состояние в кратчайшие сроки. Решение данных задач невозможно без выполнения жестких требований к надежности и живучести обеспечивающих их систем, в том числе и систем электроснабжения (СЭС), снабжающих электрической энергией оборудование специальных объектов (СО).

Необходимо отметить, что системы электроснабжения специальных объектов космических войск в большинстве своем разработаны более 40 лет назад и в настоящее время эксплуатируются в условиях превышения установленных сроков. Данное обстоятельство приводит к снижению надежности электроснабжения и, как следствие, может привести к снижению готовности специальных объектов к выполнению задач по предназначению.

Важность решаемых специальными объектами космических войск задач, а также изменившиеся условия эксплуатации определяют необходимость проведения реконструкции и модернизации обеспечивающих их надежное функционирование СЭС, а также разработки новых подходов к обоснованию направлений совершенствования СЭС СО.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

В основу программ совершенствования СЭС СО должны быть положены главные положения технической политики Российской Федерации в электроэнергетике, которые направ-

лены на внедрение новых энергоэффективных инновационных технологий, повышающих наблюдаемость и управляемость СЭС СО на базе применения современных IT-технологий [1–5].

Анализ существующих систем электроснабжения специальных объектов показал, что данные системы с точки зрения повышения их энергоэффективности обладают большим потенциалом для развития, которое может быть реализовано за счет внедрения современных технологий с использованием вычислительной и микропроцессорной техники и применения высокотехнологичных образцов энергетического оборудования. В качестве одного из вариантов совершенствования СЭС СО могут быть использованы принципы построения интеллектуальной системы электроснабжения с активно-адаптивной сетью [3]. Необходимо заметить, что реализация указанных принципов без учета специфики функционирования и условий эксплуатации СЭС СО не всегда возможна и целесообразна. В связи с этим применительно к системам электроснабжения специальных объектов требуется принять научно-обоснованные решения, которые позволят повысить энергоэффективность СЭС СО и обеспечить надежное функционирование потребителей современных систем вооружения.

Учитывая выше сказанное, **основными направлениями совершенствования систем электроснабжения специальных объектов** должны быть (рис. 1):

- преодоление тенденции физического и морального старения оборудования СЭС СО;
- применение передовых технологий и технологических решений;
- повышение надежности и живучести СЭС СО;
- обоснование применения в системах электроснабжения специальных объектов возобновляемых источников электрической энергии;
- повышение энергоэффективности применяемых технологий и электрооборудования;



Рис. 1. Основные направления совершенствования СЭС

– повышение управляемости и наблюдаемости электрических сетей, за счет внедрения высокоавтоматизированных трансформаторных подстанций, управление работой которых осуществляется в цифровом виде на основе протоколов МЭК [6, 7];

– использование в распределительных электрических сетях более высоких классов напряжений (например, распределительные сети с напряжением 6(10) кВ перевести на напряжение 20 кВ, с напряжения 35 кВ – на напряжение 110 кВ);

- разработка и реализация технических решений в области информационной безопасности и защиты электрических сетей от внешних воздействий;
- развитие информационной и телекоммуникационной инфраструктуры;
- развитие и внедрение современных систем диагностики и мониторинга технологического оборудования СЭС, обеспечение максимальной самодиагностики, функций самовосстановления и, как следствие, снижение вероятности возникновения перерывов в электроснабжении потребителей;
- развитие методов оценки работоспособности оборудования и продления ресурса;
- совершенствование технологий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта электрических сетей.

В основу совершенствования СЭС СО должны быть положены следующие **основные принципы**:

- структура и параметры функционирования СЭС должны обеспечивать надежность электроснабжения потребителей специальных объектов без ограничений по нагрузке и соблюдение требований к качеству электрической энергии в любых условиях эксплуатации. Кроме того, они должны давать возможность поддерживать различный уровень надежности системы электроснабжения и качества электрической энергии в зависимости от режимов функционирования;
- СЭС должна обладать необходимой гибкостью, позволяющей осуществлять ее поэтапное преобразование (поэтапный переход к новому облику) и обеспечивать возможность адаптироваться к изменениям величины и характера нагрузки потребителей электрической энергии;
- СЭС должна быть способна к самовосстановлению при возникновении перерывов в электроснабжении и переходе в неисправное состояние отдельных элементов (участков) СЭС;
- оснащение СЭС современными системами управления режимами функционирования отдельных ее элементов с использованием компьютерных технологий и единой локальной сети связи, позволяющей осуществлять управление и оценивание режимов работы СЭС в целом;
- обеспечение живучести специального объекта в любых условиях эксплуатации и внешних воздействий. СЭС должна обладать устойчивостью к физическому и кибернетическому воздействию вероятного противника [8];
- СЭС должна быть удобной и безопасной в эксплуатации.

Опыт применения цифровых и управляющих систем в электроэнергетических системах показал, что цифровизация процессов управления передачей и распределением электрической энергии сама по себе не в полной мере обеспечивает достижение ожидаемых эффектов. Внедрение цифровых элементов в СЭС СО должно осуществляться вместе с применением энергоэффективного оборудования, а также с разработкой системных подходов и методов обоснования и оценки совершенствования СЭС СО.

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

СЭС СО представляют собой большие, сложные электротехнические системы кибернетического типа, включающие различные подсистемы и элементы, размещенные на значительных площадях и расстояниях. Подсистемы представляют собой компоненты более крупные, чем элементы и в то же время более детальные, чем система в целом. Деления системы электроснабжения на подсистемы связано с необходимостью вычленения совокупностей взаимосвязанных элементов, способных выполнять относительно независимые функции, направленные на достижение общей цели системы. СЭС СО должна рассматриваться, с одной сто-

роны, как подсистема электроэнергетической системы, с другой – как надсистема для систем более низкого уровня (например, для распределительных электрических сетей, СЭС зданий и сооружений и т. п.).

Между отдельными подсистемами и элементами СЭС СО установлены функциональные и информационные связи и отношения. Зачастую термины «связь» и «отношения» в специальной литературе используются как синонимы, однако существуют и другие точки зрения. Связь – это частный случай отношения и основа для исследования СЭС в статике, а отношение – частный случай связи для анализа динамики системы. СЭС как единое целое существует благодаря наличию связей между ее элементами (подсистемами) [9]. Статическая связь обеспечивает качество СЭС, динамическая – свойство. Пока связи остаются статическими, интегративное свойство, т. е. свойство системы, которым она обладает, но не обладают ее элементы и подсистемы, не реализуется. С точки зрения системного анализа СЭС СО является эмерджентной, т. е. обладает свойствами, неприсущими ее подсистемам и элементам.

Процесс функционирования относится к такому интервалу времени, на котором происходит изменение состояния СЭС при заданной совокупности ее элементов и связей. Процесс совершенствования (развития) относится к более длительному интервалу времени. Основной задачей при этом является отслеживание процессов ввода в эксплуатацию новых элементов и связей, а также вывода из работы отказавших (выведенных из строя) или отработавших свой ресурс элементов.

Совокупность исследуемых свойств, которыми система электроснабжения обладает в каждый момент времени, называется состоянием системы. Данное понятие характеризует систему электроснабжения в определенный момент времени. Состояние СЭС определяется параметрами режима, т. е. показателями, определяющими качество функционирования системы электроснабжения. Свойства СЭС определяются физическими, техническими, экономическими и другими характеристиками элементов системы, параметрами их режимов и рядом допущений, обусловленных спецификой СЭС.

Система электроснабжения под воздействием как внешних, так и внутренних факторов способна переходить из одного состояния s_i в другое s_{i+1}

$$s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots \rightarrow s_i \rightarrow \dots \rightarrow s_n.$$

То есть она обладает поведением, которое представляется как функция состояния

$$S(t) = [s_i, y(t), x(t)],$$

где $y(t)$ – выход системы;

$x(t)$ – внешнее воздействие (управляющее, возмущающее).

Множество всех возможных значений состояний $\{S\}$ называется пространством состояний системы электроснабжения.

Совокупность состояний СЭС

$$s(t_0), s(t_1), s(t_{12}), \dots, s(t_i), \dots s(t_k),$$

упорядоченных по изменению какого-либо параметра, определяющего свойства системы, называется *процессом*. Формально процесс функционирования системы электроснабжения как последовательная смена состояний может интерпретироваться координатами точки в k -мерном фазовом пространстве.

Используя теоретико-множественные представления, состояние СЭС с учетом режимов и специфики функционирования специального объекта можно представить в следующей символической форме:

$$S = \{A, R, H, Z, RF, N\},$$

где A – множество элементов (подсистем) СЭС, $A = \{a_i\}$;

R – множество отношений (связей) между элементами (подсистемами) СЭС, $R = \{r_i\}$;

H – множество свойств элементов (подсистем) СЭС $H\{a_i\}$ и отношений (связей) $H\{r_i\}$;

- Z – множество целей функционирования СЭС;
- RF – множество режимов (условий) функционирования СЭС;
- N – лицо, принимающее участие в процессе функционирования и совершенствования (развития) СЭС.

Наряду с элементами (подсистемами) и их свойствами, связями, целями, при решении задач совершенствования СЭС СО требуется учет режимов (условий) функционирования, который влияет на поведение системы и наблюдателя N – лица, представляющего объект или процесс, принимающего участие в процессе функционирования и совершенствования СЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс совершенствования СЭС СО, т. е. переход СЭС из одного состояния в другое, при котором СЭС будет обладать улучшенными свойствами и показателями, должен быть планомерным и требует комплексного системного подхода. При этом необходимо прежде всего определить содержание этого процесса, выработать необходимые и достаточные требования к облику электрических сетей перспективных систем электроснабжения, имеющих необходимый уровень информационной безопасности.

Процесс совершенствования СЭС СО, а именно переход из одного состояния в другое, будет определяться параметрами режима – показателями функционирования системы. Для оценки уровня совершенства систем электроснабжения специальных объектов возможно использовать следующие показатели:

- эксплуатационно-технические показатели систем электроснабжения;
- показатели надежности элементов и системы электроснабжения в целом;
- показатели живучести элементов и систем электроснабжения;
- показатели качества электрической энергии.

Результатом системных преобразований должно быть превращение СЭС из пассивного устройства для передачи и распределения электрической энергии в систему, параметры и характеристики которой изменяются в зависимости от режимов и условий функционирования специального объекта.

Список используемых источников

1. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 года. – М. : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 90 с.
2. Программа инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016–2020 годы с перспективой до 2025 года. – URL: http://www.fsk-ees.ru/innovation/innovative_development/innovative_development_program (дата обращения: 10.07.2019).
3. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. – URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (дата обращения: 18.10.2019).
4. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Рыжий Н. В. Обоснование направлений совершенствования систем электроснабжения наземных комплексов с учетом обеспечения информационной безопасности // Электропитание : научно-техн. журн. – 2020. – Вып. 1. – С. 32–40.
5. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Рыбаков В. В. Направления развития систем электроснабжения специальных объектов в условиях реализации инновационного сценария развития электроэнергетики // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 3. – С. 168–173.
6. Зинин В. М., Подлесный А. М., Карантаев В. Г. Цифровая подстанция – объект критической инфраструктуры // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2017. – № 4 (93). – С. 21–28.

7. СТО 34.01-21-00 4 -2019. Стандарт организации ПАО «РОССЕТИ». Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110–220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ / публичное акционерное общество «РОССИЙСКИЕ СЕТИ». – 2019. – 114 с.

8. Каберник В. В. Кибервойна и кибероружие / Центр военно-политических исследований. – 2012. – URL: <http://eurasian-defence.ru> (дата обращения: 14.01.2020).

9. Папков Б. В., Куликов А. Л. Теория систем и системный анализ для энергетиков : учебник и практикум для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2022. – 470 с.

В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
В. В. Рыбаков,
кандидат технических наук;
Д. В. Рыбаков,
кандидат технических наук

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С РЕЗКО-ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Одним из основных показателей технического состояния и уровня эксплуатации систем электроснабжения является уровень отчетных потерь электроэнергии в электрических сетях. В статье обоснована актуальность их снижения, рассмотрен способ управления режимом функционирования трансформаторной подстанции объекта с резко-переменной нагрузкой. В основу способа положена адаптация структуры трансформаторных подстанций к режимам функционирования потребителей таких объектов, что позволит существенно снизить потери электрической энергии в существующих системах электроснабжения без изменения состава и типа оборудования.

Ключевые слова: системы электроснабжения, трансформаторная подстанция, коэффициент загрузки, потери электрической энергии.

ВВЕДЕНИЕ

К числу первоочередных задач развития систем вооружения космических войск относится повышение их надежности и боевой устойчивости. Это обуславливает необходимость выполнения жестких требований к энерговооруженности, надежности систем электроснабжения (СЭС).

При сложившемся на сегодняшний день уровне технического состояния оборудования систем электроснабжения одним из основных направлений повышения надежности и эффективности функционирования СЭС является проведение мероприятий, направленных на снижение потерь электроэнергии, которые являются основным показателем их технического состояния и уровня эксплуатации. Это полностью соответствует основным направлениям технической политики в электроэнергетике России, изложенным в документе [1].

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Потребители объектов космических войск по важности решаемых задач относятся в основном к потребителям первой и второй категории. Требования к построению систем электроснабжения указанных потребителей в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» определяют наличие в системе двух независимых взаимно резервирующих источников питания.

Анализ потребления электроэнергии на 1 ГИК МО РФ с учетом имеющихся официальных данных (расчетных схем потребления электроэнергии) показывает, что основную долю технологических потерь составляют нагрузочные потери в кабельных линиях напряжением 6 и 0,4 кВ (около 55%) и потери холостого хода в силовых трансформаторах 6/0,4 кВ (около 43%) трансформаторных подстанций (ТП).

Столь высокая доля потерь холостого хода в силовых трансформаторах трансформаторных подстанций СЭС СО объясняется спецификой функционирования объектов космических войск, которая заключается в том, что графики электрических нагрузок ТП, питающих потребители сооружений и зданий СО, существенно отличаются и зависят от выполняемых ими задач. В процессе повседневной деятельности потребление электрической энергии может не превышать 10% от расчетного значения, а потребителями являются в основном потребители третьей категории надежности. При проведении специальных работ нагрузка возрастает до значений, обусловленных технологическим процессом, и определяется потребителями первой и второй категории надежности. Режим повседневной деятельности, как правило, имеет наибольшую продолжительность и приводит к тому, что силовые трансформаторы работают при крайне низком коэффициенте загрузки, а следовательно, и к увеличению необоснованных технологических потерь в системе электроснабжения.

Учитывая вышесказанное, весь процесс функционирования ТП СО можно представить как совокупность двух режимов, разнесенных по времени:

- режим функционирования, в котором обеспечивается электроснабжение технологических потребителей первой и второй категории (режим «максимальных» нагрузок);
- повседневный режим функционирования, в котором обеспечивается электроснабжение потребителей только третьей категории надежности (режим «минимальных» нагрузок).

Исследование влияния загрузки силовых трансформаторов на технологические потери показывает, что наиболее экономичным режимом загрузки силовых трансформаторов 6/0,4 кВ является режим, при котором их коэффициент загрузки находится в интервале от 0,3 до 0,5. Работа силового трансформатора в режиме, близком к холостому ходу, вызывает неоправданные потери мощности не только в самом силовом трансформаторе, но и в других элементах системы электроснабжения [3–5].

Одним из возможных путей повышения коэффициента загрузки существующих силовых трансформаторов в процессе эксплуатации является отключение на период повседневной деятельности малонагруженных трансформаторов с переводом их нагрузки на более загруженные или выбранные для этого трансформаторы.

При переходе ТП в режим максимальных нагрузок электроснабжение ответственных потребителей осуществляется от двух независимых взаимно резервирующих источников питания (оба трансформатора находятся в работе).

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Способ управления режимом функционирования трансформаторной подстанции специального объекта, однолинейная схема которой показана на рис. 1, может быть реализован с помощью блока управления режимом (БУР), алгоритм функционирования которого представлен на рис. 2.

Алгоритм заключается в выполнении ряда действий (шагов), представленных в виде следующих блоков.

Блок 1. Ввод исходных данных. Исходными данными для управления режимом функционирования трансформаторной подстанции являются:

- параметры схемы ТП специального объекта, представленной на рис. 1, а именно: первичные напряжения силовых трансформаторов $U_{1.1}$ и $U_{1.2}$; вторичные напряжения силовых трансформаторов $U_{2.1}$ и $U_{2.2}$; номинальные мощности силовых трансформаторов $S_{ном.т1}$ и $S_{ном.т2}$; потери холостого хода силовых трансформаторов ΔP_{xx1} и ΔP_{xx2} ; потери короткого замыкания силовых трансформаторов $\Delta P_{кз1}$ и $\Delta P_{кз2}$;

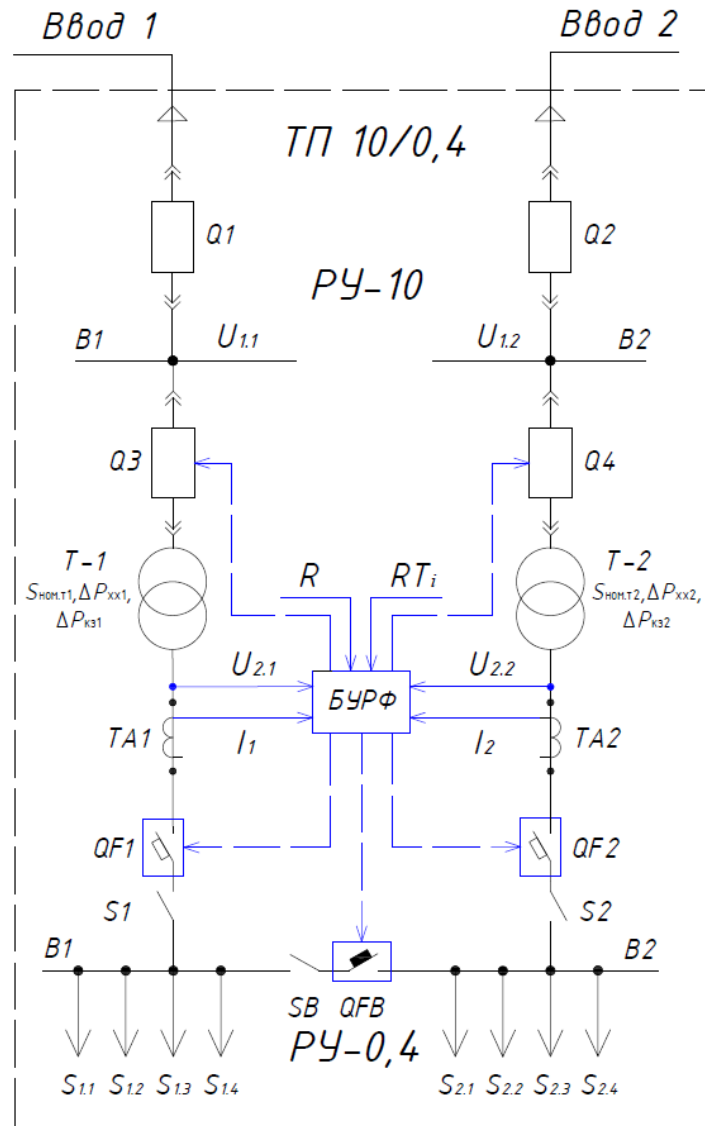


Рис. 1. Однолинейная схема ТП СО

– элементы управления режимом функционирования ТП: коммутационные аппараты распределительного устройства высшего напряжения – высоковольтные выключатели $Q3$, $Q4$; коммутационные аппараты распределительного устройства низшего напряжения – автоматические выключатели $QF1$, $QF2$, QFB ;

– режим функционирования специального объекта R : в режиме «минимальных» нагрузок $R = 0$, при режиме «максимальных» нагрузок $R = 1$;

– приоритет отключения силовых трансформаторов на трансформаторной подстанции T_j , $j = 1, 2$: при отключении силового трансформатора $T-1$ $j = 1$, при отключении силового трансформатора $T-2$ $j = 2$.

Блок 2. Сбор данных о текущем состоянии оборудования. На основе информации об измеряемых параметрах токов I и напряжений U , а также о положении коммутационных аппаратов (элементов управления режимом функционирования ТП) определяются:

– нагрузки силовых трансформаторов S_{T1} и S_{T2} ;

– состояние элементов управления $Q3$, $Q4$, $QF1$, $QF2$, QFB (0 – элемент управления отключен, 1 – элемент управления включен);

– режим функционирования ТП $RT = \{RT_i, i = 0, 1, 2\}$. При работе ТП в двухтрансформаторном режиме $i = 0$ в работе находятся два силовых трансформатора: $T-1$ и $T-2$. При работе

ТП в однострансформаторном режиме в работе находится один из силовых трансформаторов: либо $T-1$ ($i = 1$), либо $T-2$ ($i = 2$).

Блок 3. Осуществление перехода к блокам алгоритма в зависимости от режима функционирования ТП. Если трансформаторная подстанция функционирует в двухтрансформаторном режиме RT_0 , тогда осуществляется переход к блоку 4.

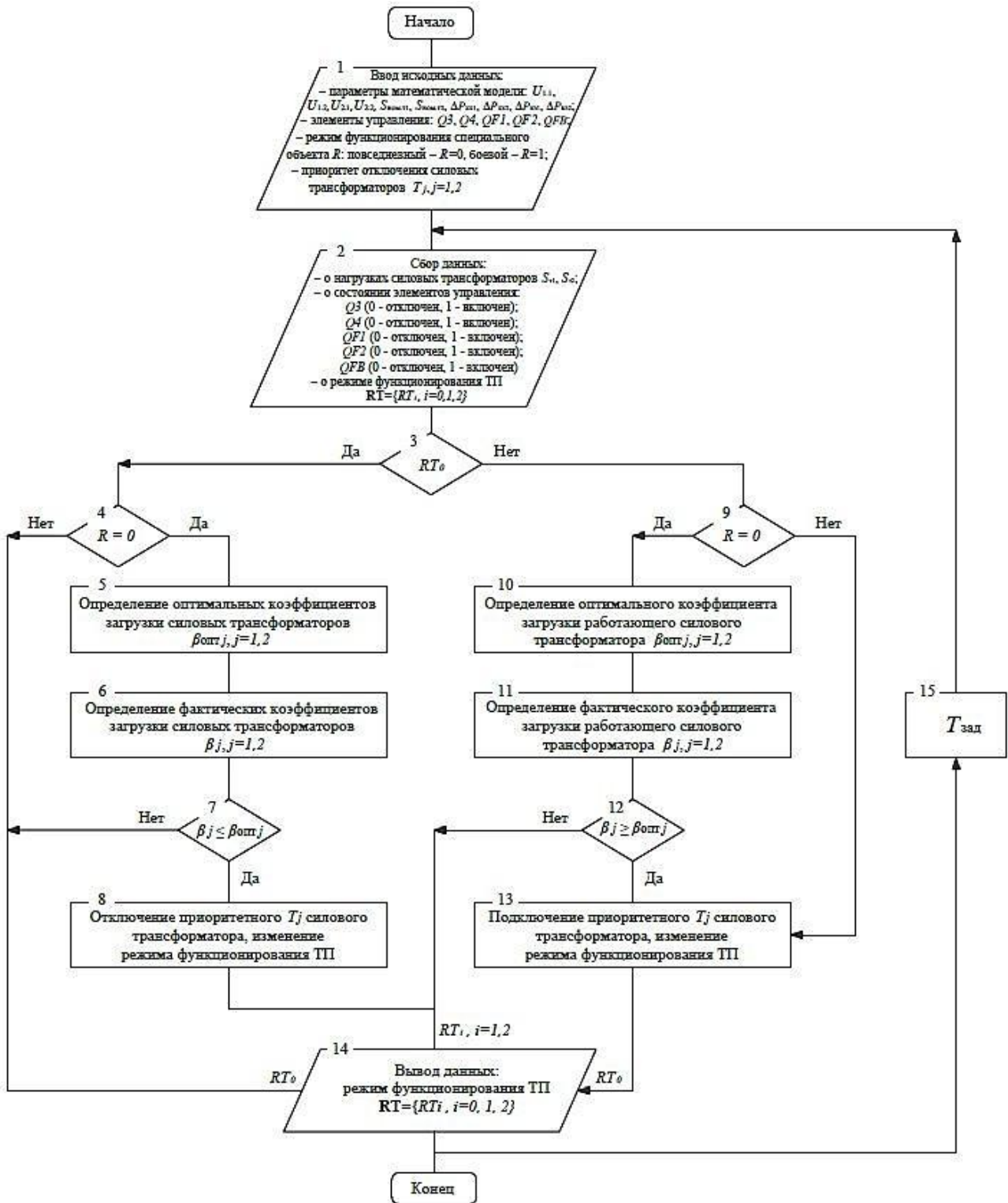


Рис. 2. Алгоритм управления режимом функционирования ТП

Блок 4. Осуществление перехода к блокам алгоритма в зависимости от режима функционирования специального объекта. Такой переход реализуется следующим образом:

– если режим функционирования объекта – режим «максимальных» нагрузок ($R = 1$), тогда режим функционирования ТП не изменяется и ТП продолжает функционировать в двухтрансформаторном режиме RT_0 (осуществляется переход к блоку 14);

– если режим функционирования объекта – режим «минимальных» нагрузок ($R = 0$), тогда осуществляется переход к блоку 5.

Блок 5. Определение оптимальных коэффициентов загрузки силовых трансформаторов $\beta_{\text{опт } j}$, $j = 1, 2$. Эти коэффициенты находятся по соотношению

$$\beta_{\text{опт } j} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{xx } j}}{\Delta P_{\text{кз } j}}}.$$

Блок 6. Определение фактических коэффициентов загрузки силовых трансформаторов β_j , $j = 1, 2$. Эти коэффициенты находятся по соотношению

$$\beta_j = \frac{S_{\text{т } j}}{S_{\text{ном.т } j}}.$$

Блок 7. Сравнение оптимальных коэффициентов загрузки силовых трансформаторов с их фактическими коэффициентами загрузки. Такое сравнение осуществляется следующим образом:

– если $\beta_j \geq \beta_{\text{опт } j}$, то режим функционирования ТП не изменяется и ТП продолжает функционировать в двухтрансформаторном режиме RT_0 (осуществляется переход к блоку 14);

– если $\beta_j \leq \beta_{\text{опт } j}$, то осуществляется переход к блоку 8.

Блок 8. Производство отключения приоритетного T_j , $j = 1, 2$ силового трансформатора с помощью соответствующих элементов управления, изменения режима функционирования ТП на однотрансформаторный режим RT_i , $i = 1, 2$ (осуществляется переход к блоку 14).

Блок 3. Если трансформаторная подстанция функционирует в однотрансформаторном режиме RT_i , $i = 1, 2$, тогда осуществляется переход к блоку 9.

Блок 9. Осуществление перехода к блокам алгоритма в зависимости от режима функционирования специального объекта. Указанный переход реализуется так:

– если режим функционирования – режим «максимальных» нагрузок ($R = 1$), тогда осуществляется переход к блоку 13;

– если режим функционирования – режим «минимальных» нагрузок ($R = 0$), тогда осуществляется переход к блоку 10.

Блок 10. Определение оптимального коэффициента загрузки работающего силового трансформатора $\beta_{\text{опт } j}$, $j = 1, 2$. Оптимальный коэффициент находится по соотношению

$$\beta_{\text{опт } j} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{xx } j}}{\Delta P_{\text{кз } j}}}.$$

Блок 11. Определение фактического коэффициента загрузки работающего силового трансформатора β_j , $j = 1, 2$. Фактический коэффициент находится по соотношению

$$\beta_j = \frac{S_{\text{т } j}}{S_{\text{ном.т } j}}.$$

Блок 12. Сравнение оптимального коэффициента загрузки работающего силового трансформатора с его фактическим коэффициентом загрузки. Это сравнение осуществляется следующим образом:

– если $\beta_j \leq \beta_{\text{опт } j}$, тогда режим функционирования ТП не изменяется и ТП продолжает функционировать в однострансформаторном режиме RT_i , $i = 1, 2$ (осуществляется переход к блоку 14);

– если $\beta_j \geq \beta_{\text{опт } j}$, тогда осуществляется переход к блоку 13.

Блок 13. Производство подключения приоритетного T_j , $j = 1, 2$ силового трансформатора с помощью соответствующих элементов управления, изменения режима функционирования ТП на двухтрансформаторный режим RT_0 (осуществляется переход к блоку 14).

Блок 14. Вывод данных о режиме функционирования трансформаторной подстанции $RT = \{RT_i, i = 0, 1, 2\}$.

Блок 15. Для адаптации режима функционирования ТП к режиму функционирования объекта с резко-переменной нагрузкой периодически с задержкой времени $T_{\text{зад}}$ осуществление контроля текущего режима функционирования объекта.

Апробация полученного алгоритма произведена с помощью имитационного математического моделирования функционирования ТП СО (см. рис. 1) в математическом пакете MATLAB и его расширении *Simulink*. На рис. 3 представлены графики изменения токов нагрузки трансформаторов при управлении режимом функционирования ТП СО с помощью блока управления режимом функционирования (БУРФ), реализующего рассмотренный алгоритм. При снижении нагрузки $T-2$ до уровня $\beta_2 \leq \beta_{\text{опт } 2}$ данный силовой трансформатор отключается, а его нагрузка переключается на шины силового трансформатора $T-1$.

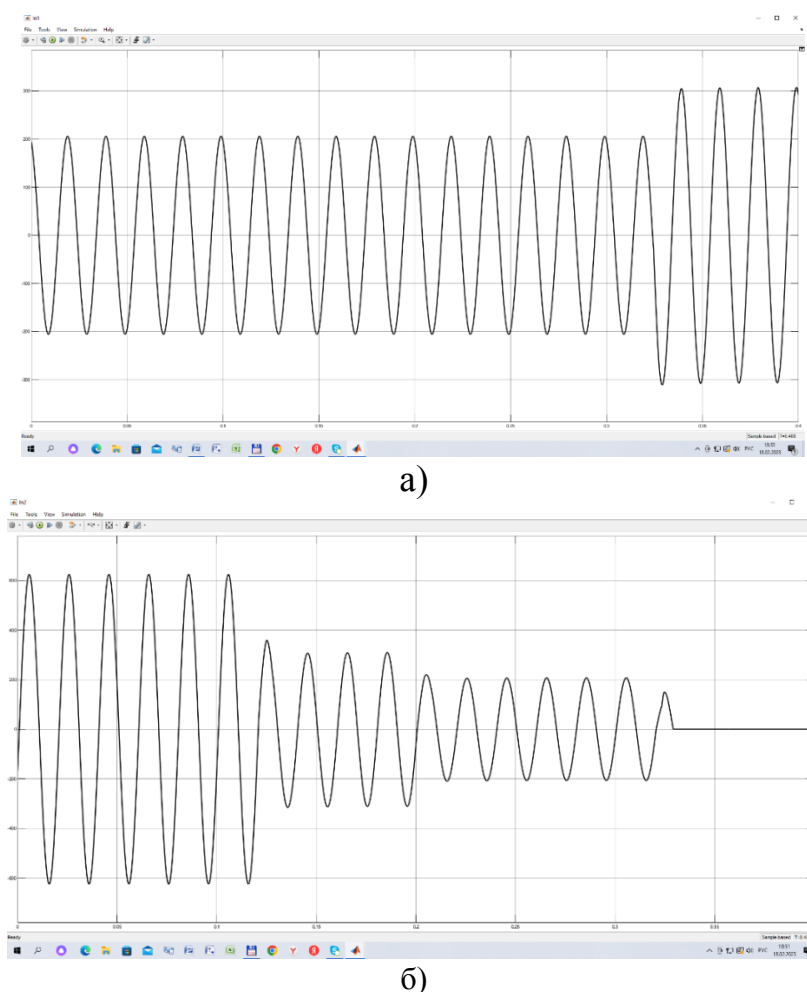


Рис. 3. Графики токов нагрузки трансформаторной подстанции:
а – силового трансформатора $T-1$;
б – силового трансформатора $T-2$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адаптация структуры источников питания (трансформаторных подстанций) к режимам функционирования потребителей объектов с резко-переменной нагрузкой раскрывает весомый потенциал для снижения потерь электрической энергии в существующих системах электроснабжения без изменения состава и типа оборудования. Для определения условия перехода от одной структуры ТП к другой целесообразно использовать значения коэффициентов загрузки силовых трансформаторов.

Внедрение рассмотренного способа управления режимом функционирования трансформаторной подстанции на трансформаторных подстанциях потребителей объектов с резко-переменной нагрузкой позволит улучшить их эксплуатационно-технические показатели.

Список используемых источников

1. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 года. – М. : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 90 с.
2. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – СПб. : изд-во ДЕАН, 2013. – 704 с.
3. Электропитающие системы и электрические сети специальных объектов : учеб. пособие / В. В. Карагодин [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 220 с.
4. *Копылов И. П.* Электрические машины : учебник для ВУЗов. – 5-е изд. – М. : Высш. шк., 2006. – 607 с.
5. *Якшина Н. В.* Целесообразность применения трансформаторов со сниженным энергопотреблением // Энергоэксперт : информационно-аналитич. журн. – 2015. – № 2. – С. 4–6.

Е. Л. Лебедев¹,

доктор технических наук, профессор;

С. П. Савчук²

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

²ФКП «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности»,

Московская область, Сергиево-Посадский городской округ, Пересвет.

СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Представлены результаты механических испытаний алюминиевого термоупрочняемого сплава в условиях знакопеременной нагрузки. Особенностью исследований являются наличие концентратора напряжений и различные скорости деформирования исследуемых образцов. Показано, что процесс усталостного разрушения в данных условиях объясняется конкуренцией двух процессов: с одной стороны, образования поверхностей разрушения, с другой – пластического деформирования в устье трещины (концентратора напряжения). При повышении скорости деформирования превалирующим является образование поверхностей разрушения, этим объясняется интенсивное разветвление трещин и более высокое значение постоянной выносливости исследуемого сплава.

Ключевые слова: концентратор напряжения, испытание на усталость, алюминиевый сплав, скорость деформирования.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проводимых исследований обусловлена наличием фактов образования трещин в силовом наборе и обшивке корпусов при эксплуатации вертолетов и других летательных аппаратов [1]. Данные дефекты являются наиболее частой причиной выполнения ремонтных работ корпусов авиационной техники. Причина появления данных дефектов заключается в циклической знакопеременной нагрузке и наличии концентраторов в виде технологических дефектов в рассматриваемой конструкции. Закономерности образования разрушений (трещин) в указанных условиях ранее были рассмотрены [1, 2]. Согласно результатам испытаний на усталость алюминиевых сплавов Д16 после закалки и естественного старения [2–4] постоянная выносливости при наличии концентратора напряжения в виде V-образного надреза снижается практически в 2 раза и составляет: без надреза $S\sigma = 120 \text{ кг/мм}^2$ и с надрезом $S\sigma_V = 64 \text{ кг/мм}^2$.

Однако практика эксплуатации вертолетной техники показывает, что закономерности трещинообразования не всегда соответствуют полученным ранее результатам. Зачастую усталостное разрушение конструкций возникает при более малом количестве циклов знакопеременной нагрузки. Это может быть объяснено наличием особых дефектов, а именно трещин, в которых отсутствует пластическое упрочнение в их вершине. Подобные трещины характерны для термоупрочняемых алюминиевых сплавов. Причина образования таких концентраторов напряжений может быть как эксплуатационная – забоины, царапины, так и технологическая – образование микротрещин при обработке деталей давлением или резанием в районах технологических отверстий, технологических изгибов и др.

Наиболее опасными концентраторами напряжений являются хрупкие микротрещины, в устье которых напряжения могут превосходить временное сопротивление разрушению [3]. В этом случае образование усталостных трещин будет возможным даже при условии, если эксплуатационные нагрузки не будут превосходить расчетные значения.

Кроме того, на характер разрушения в подобных условиях может влиять скорость деформирования исследуемой конструкции. Это связано с возможностью образования наклепа в вершине

трещины. Если при деформировании в вершине трещины успевают образоваться локальная пластическая деформация, то произойдет затупление вершины трещины (снизится концентрация напряжения), появится упрочняющий наклеп и разрушение будет затруднено. Если скорость деформирования будет настолько высокой, что подобные процессы не будут успевать проявляться, то разрушение будет носить квазихрупкий характер.

Таким образом, целью проводимых исследований является испытание на усталость алюминиевого сплава Д16 в условиях наличия концентратора напряжения в виде хрупкой трещины. Вместе с тем будет изучено влияние скорости деформирования на характер разрушения в данных условиях.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исследования (испытания на усталость) проведены согласно ГОСТ 25502-79 с целью определения механических характеристик исследуемого конструкционного материала – алюминиевого сплава Д16 (после упрочняющей термической обработки) в условиях повторно-переменного приложения нагрузки. Особенностью проводимых испытаний является то, что они выполнены при наличии в исследуемых образцах концентратора напряжений в виде трещин, имитирующих технологические дефекты изделий, которые выполнены из сплава Д16. Методика формирования подобных трещин указана в работах [5–7].

Целью планируемых испытаний является установление кривой усталости конструкционных алюминиевых сплавов при симметричном цикле нагружения (рис. 1) в условиях концентратора напряжения в виде хрупких трещин.

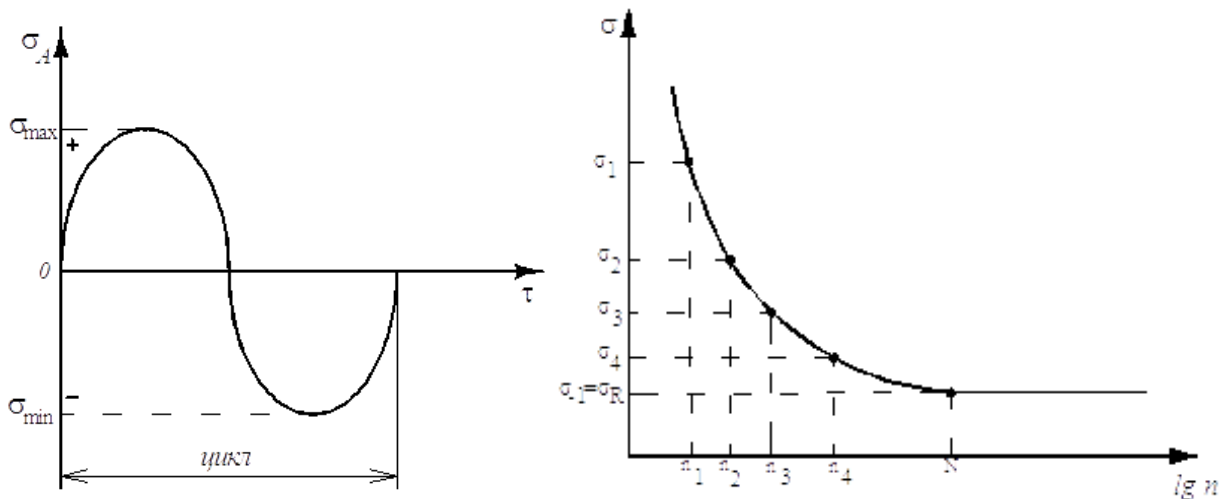


Рис. 1. Изменение напряжений при знакопеременной нагрузке и кривая усталости

Кроме этого, по результатам испытаний определялись следующие параметры:

- предел выносливости при знакопеременном изгибе (σ_{-1}^K);
- постоянная выносливости при наличии концентратора напряжений в виде трещин ($C\sigma^K$).

Для испытания использовались гладкие образцы круглого профиля (ГОСТ 25347-82), показанные на рис. 2. Подготовка образцов аналогична подготовке, описанной в работе [5].

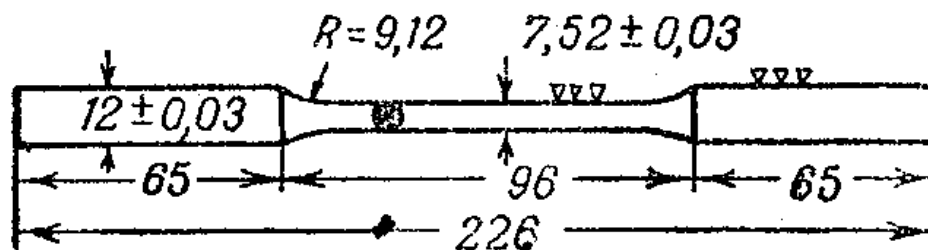


Рис. 2. Образец для испытания на усталость

Испытания проводились на установке МУИ-6000 (рис. 3). Трещины создавались по середине рабочей части образца. Как указывалась ранее особенность данной трещины – это отсутствие пластического деформирования в ее устье (вершине трещины) вследствие ее быстрого деформирования (рис. 4). Такие трещины условно называются хрупкими и являются наиболее критичными концентраторами напряжений по причине малого радиуса закругления в ее вершине. В этом случае механические напряжения в вершине трещины могут возрастать на порядок.

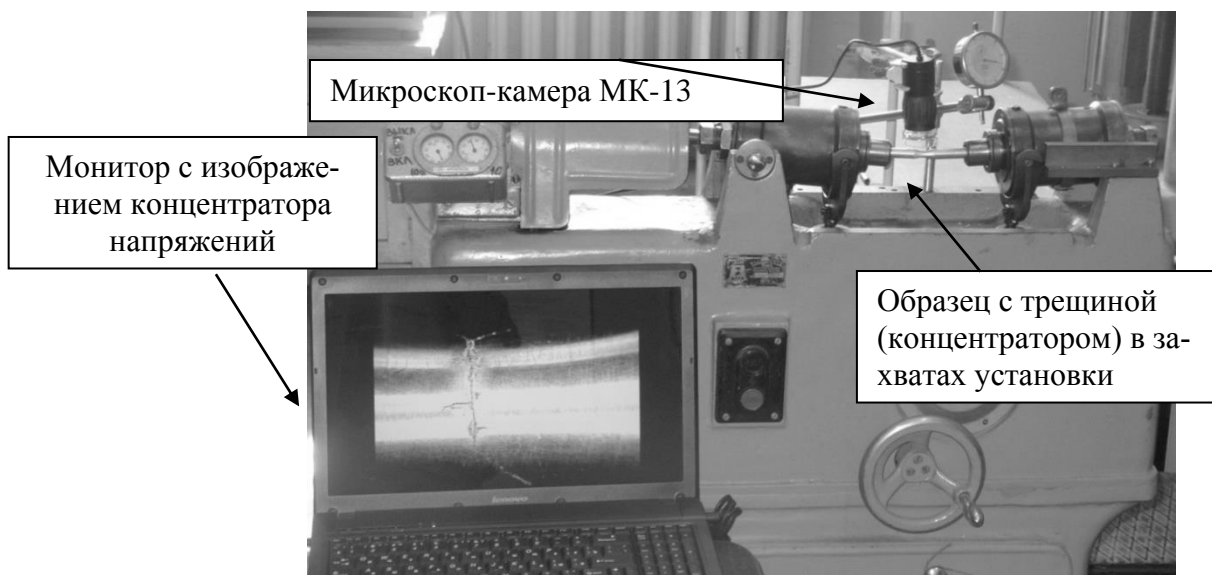
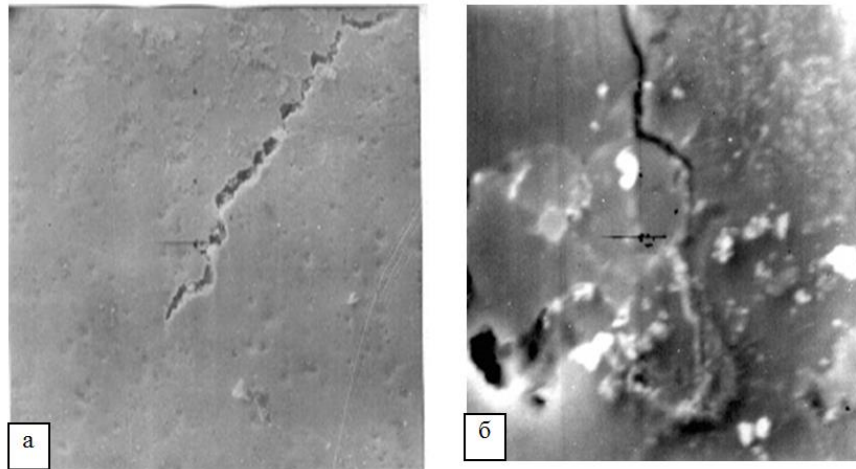


Рис. 3. Установка МУИ-6000

Скорость деформирования образцов регулировалась изменением амплитуды циклов и скорости вращения образца. Величина амплитуды цикла была обоснована эксплуатационными нагрузками исследуемых элементов и находилась в диапазоне от 50 до 300 МПа. Скорость вращения образца составляла 6000; 60 и 6 об/мин. Для изменения скорости вращения образца указанная установка была дооснащена двигателями с соответствующими скоростями вращения. Кроме того, во время испытаний фиксировался момент начала роста хрупкой трещины и наблюдался процесс ее развития. Для этого использовалась система микровидеонаблюдения на основе микроскопа-камеры МК-13. Для возможности наблюдения за образцом во время его вращения использовался стробоскоп. Температура испытаний составляла приблизительно 20°C.

Для изучения характера разрушения был применен микрофрактографический анализ [8]. Для проведения данных исследований использовались фрагменты, вырезавшиеся из исследуемых образцов в местах, представляющих интерес. Поскольку данные фрагменты

не являются диэлектриками с низкой теплопроводностью, то дополнительной обработке они не подвергались.



*Рис. 4. Микроструктура сплава (вторичные электроны):
а – концентратор напряжения – хрупкая трещина (400^x);
б – вершина хрупкой трещины (2000^x)*

Исследования проводились на растровом электронном микроскопе (РЭМ) PSEM 500 (PHILIPS). Данный микроскоп позволяет проводить исследования с увеличением от 10 до 50000^x. При этом разрешающая способность составляет от нескольких до 0,1 мкм с глубиной резкости до нескольких миллиметров. Это обеспечивается изменением диаметра сканирующего зонда (пучка электронов) от 0,1 до 1 мкм.

Исследуемые фрагменты образцов через шлюзовое устройство подавались в электронную колонну. Посредством электронной пушки формировался зонд, который с помощью электромагнитных линз и катушек направлялся на исследуемый участок. При этом с поверхности участка выбивались вторичные электроны. С помощью устройства регистрации и усиления вторичных электронов модулировалась яркость электронно-лучевой трубки в каждой точке. Данный сигнал пропорционален энергии и количеству вторичных электронов в каждой точке развертки, что формирует видеосигнал рельефа исследуемой поверхности. Вакуумная система обеспечивает необходимые условия исследования.

Сопротивление усталости в условиях хрупких трещин

Изменение скорости деформирования образцов в зависимости от скорости его вращения – ω и амплитуды цикла нагружения – σ_a определяется зависимостью [6, 7]

$$V_{\text{деф}} = 2\pi\sigma_a\omega/E \cdot 100\%, \quad (1)$$

где E – модуль упругости конструкционных алюминиевых сплавов, и показано на рис. 5.

Согласно полученным экспериментальным данным, кривая усталости алюминиевых сплавов в присутствии хрупкой трещины имеет вид, аналогичный виду кривой усталости алюминиевых сплавов без концентраторов напряжения, но с резким смещением в сторону малого числа циклов до разрушения (рис. 6). Необходимо отметить, что смещение в сторону малого числа циклов до разрушения тем больше, чем меньше скорость вращения (скорость деформирования).

Необходимо отметить, что, в отличие от начала образования обычной усталостной трещины (без концентратора напряжений), начало развития иницируемой хрупкой трещины происходило в образцах практически сразу после начала испытания. При всем диапазоне скоростей деформирования и амплитуды цикла нагружения σ_a начало развития трещины

от концентратора напряжения лежит в области 5–15 циклов до разрушения ($LgN = 0,7 \div 1,2$) (рис. 6).

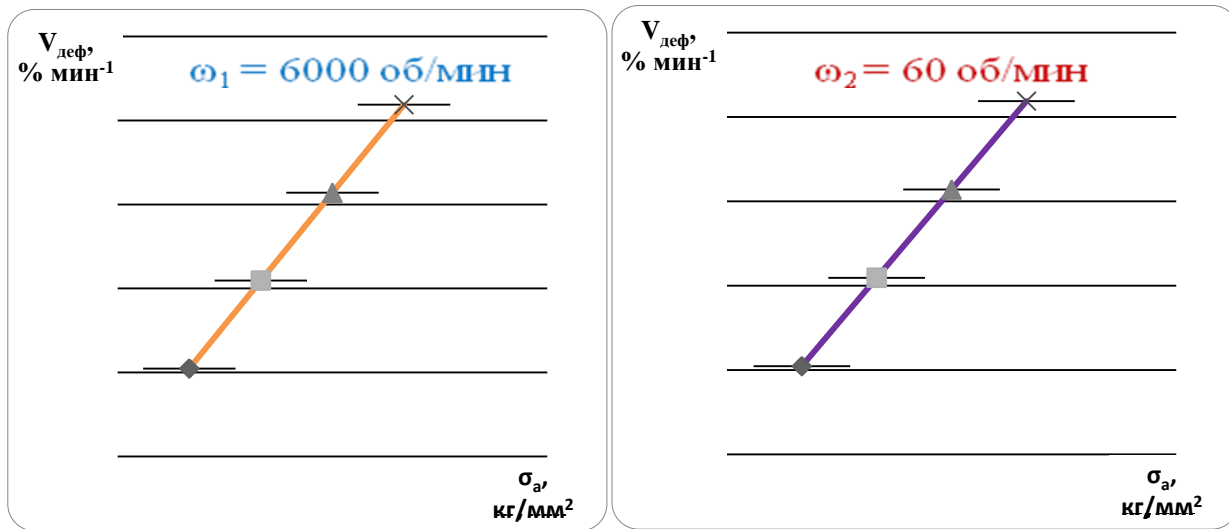


Рис. 5. Зависимость скорости деформирования образцов от скорости их вращения и амплитуды цикла нагружения

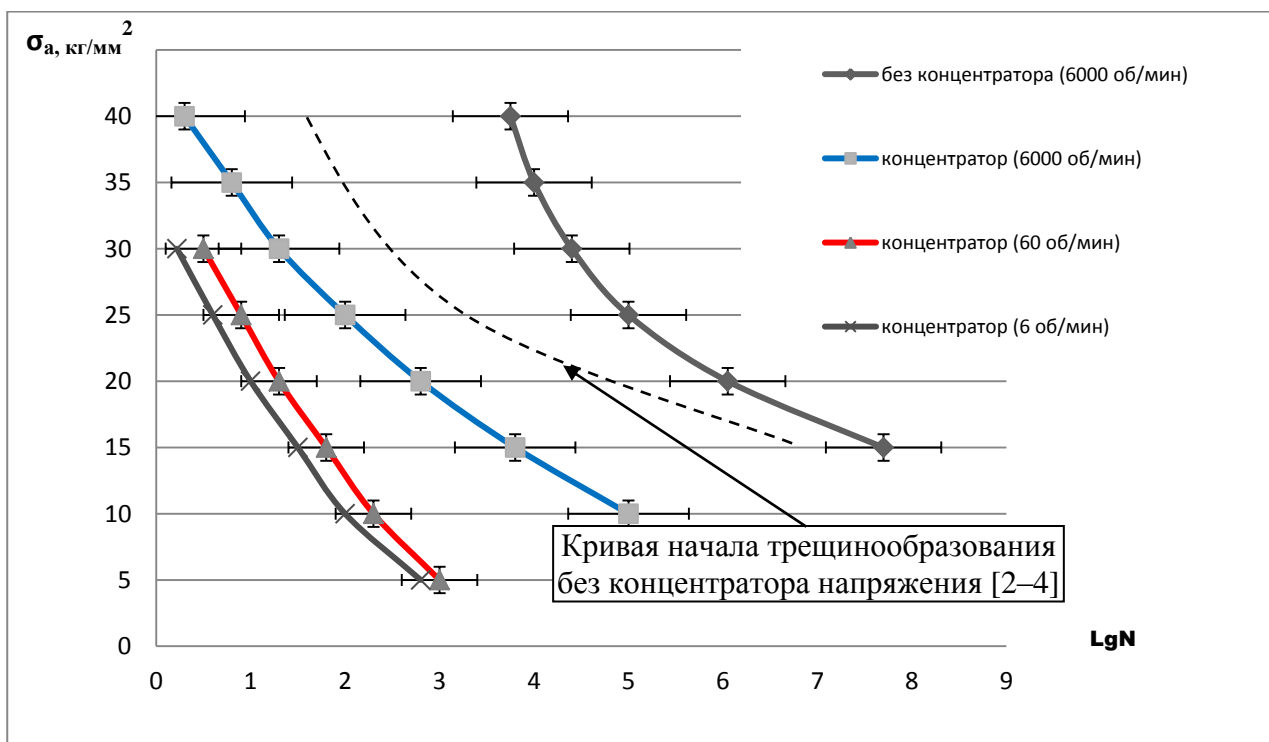


Рис. 6. Кривые усталости сплава Д16

Однако особенностью трещинообразования при скоростях вращения 6000 и 60 об/мин на всем диапазоне амплитуды цикла нагружения – σ_a является раздвоение усталостной трещины (рис. 7). В этом случае трещина распространяется вдоль касательных напряжений,

и ее разветвление происходит тем интенсивнее, чем больше скорость деформирования образца.

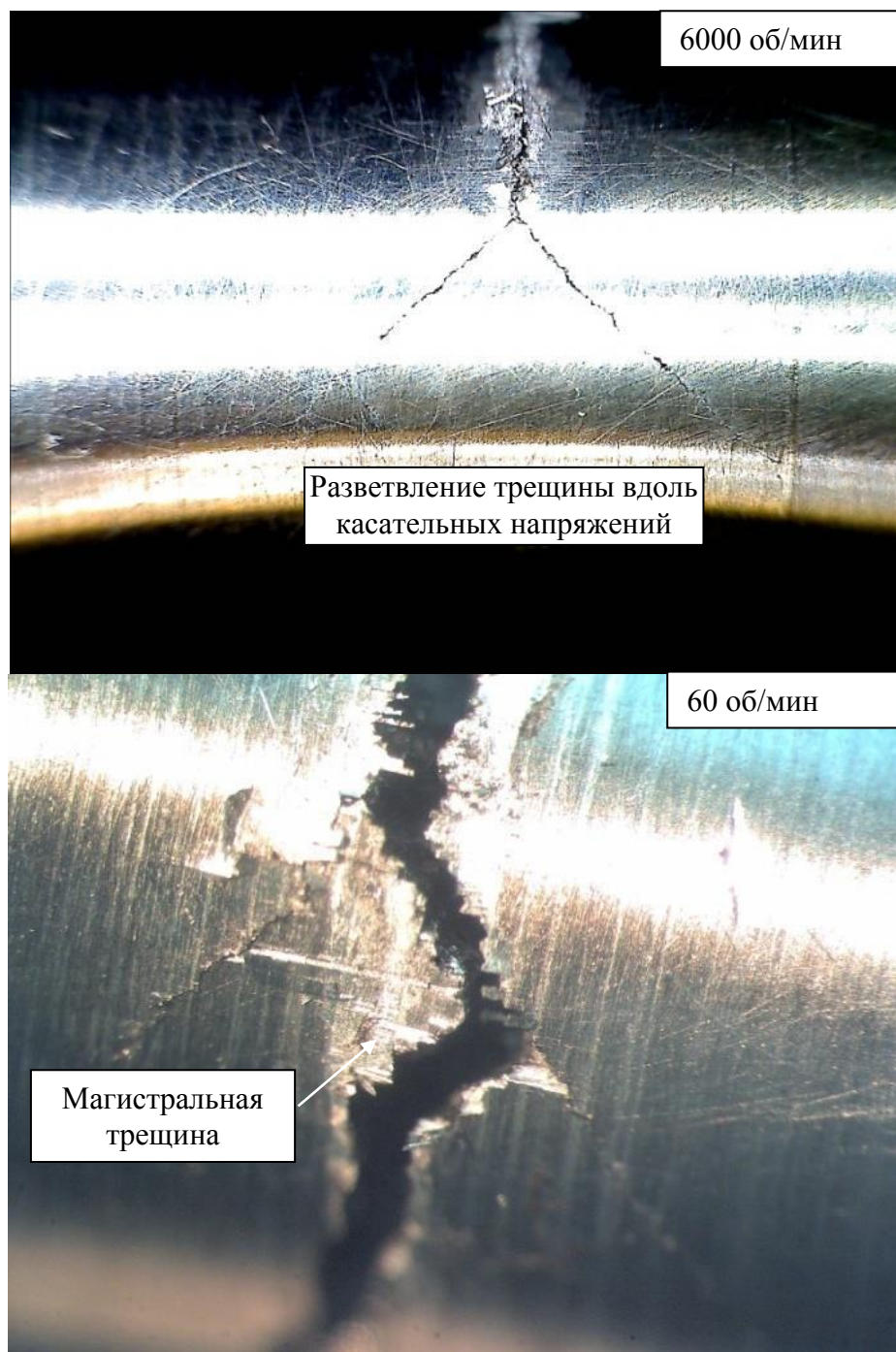


Рис. 7. Раздвоение трещины при испытании на усталость сплавов Д16 (скорости вращения образца составляют 6000 и 60 об/мин)

Например, при скоростях вращения 6000 об/мин трещины развивались практически вдоль оси образца (рис. 8,а). Суммарная длина трещин в этом случае, в 2–4 раза превосходит аналогичный параметр для более низких скоростей вращения (скоростей деформирования). Площадь поверхностей разрушения составляет в среднем 300 мм². Разрушение носит квазихрупкий характер (рис. 9,а), при этом работа разрушения тратится не на пластическую деформацию в устье трещины, а на образование новых поверхностей (поверхностей

разрушения) вдоль касательных напряжений. Однако поскольку в этом случае магистральная трещина формируется не по нормали к оси образца, то требуется больше циклов для полного его разрушения в поперечном направлении.

При скорости вращения 60 об/мин также наблюдается разветвление трещины но в меньшей степени, чем в предыдущем случае (рис. 8,б). Площадь поверхностей разрушения составляет в среднем 100 мм². Характер разрушения более вязкий (рис. 9,б). В этом случае работа разрушения, помимо образования новых поверхностей (поверхностей разрушения), тратится на пластическое деформирование и упрочнение алюминиевого сплава в устье трещины. Однако, несмотря на это, поскольку формируется магистральная трещина по нормали к оси образца, суммарная площадь разрушения, а значит, и требуемая работа разрушения резко снижаются. Количество циклов до разрушения также снижается.

При более низкой скорости вращения (6 об/мин) разветвление трещины практически не наблюдается (рис. 8,в; 9,в), «паразитных» поверхностей разрушения, не участвующих в формировании магистральной трещины, практически не образуется. Площадь поверхностей разрушения составляет в среднем 60 мм². Однако и характер разрушения в основном – вязкий. Работа разрушения в большей степени тратится на пластическое деформирование, которое успевает формироваться в устье трещины, при этом, не смотря на то, что поверхность разрушения меньше, чем при скорости вращения 60 об/мин, количество циклов до разрушения примерно одинаковое.

Таким образом, наблюдаемые закономерности усталостного разрушения термоупрочняемых алюминиевых сплавов при наличии концентратора напряжений в виде хрупких трещин и при различных скоростях деформирования объясняются конкуренцией процессов, на которые тратится работа разрушения. Так, при больших скоростях деформирования работа разрушения тратится на формирование большой площади поверхностей разрушения по причине интенсивного разветвления трещин по направлениям касательных напряжений при отсутствии пластического деформирования. При снижении скорости деформирования возрастает доля пластического деформирования, но снижается процесс разветвления трещин и образования «паразитных площадей разрушения». Второй процесс превалирует над первым, и количество циклов до разрушения снижается.

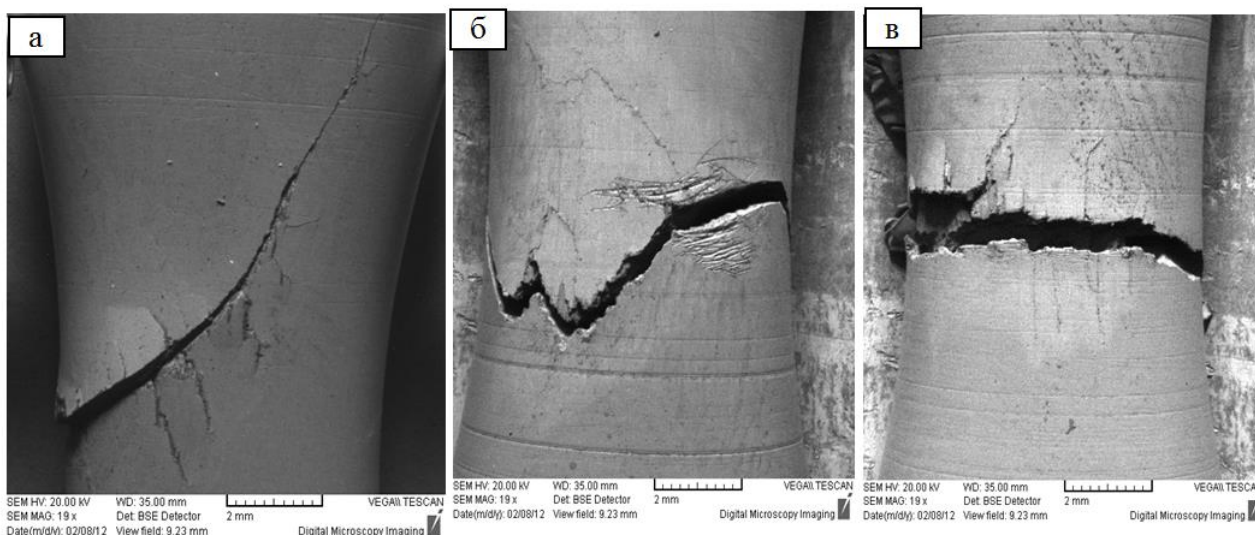


Рис. 8. Развитие усталостных трещин в сплавах Д16 от концентратора напряжений со скоростями:

а – 6000 об/мин; б – 60 об/мин; в – 6 об/мин

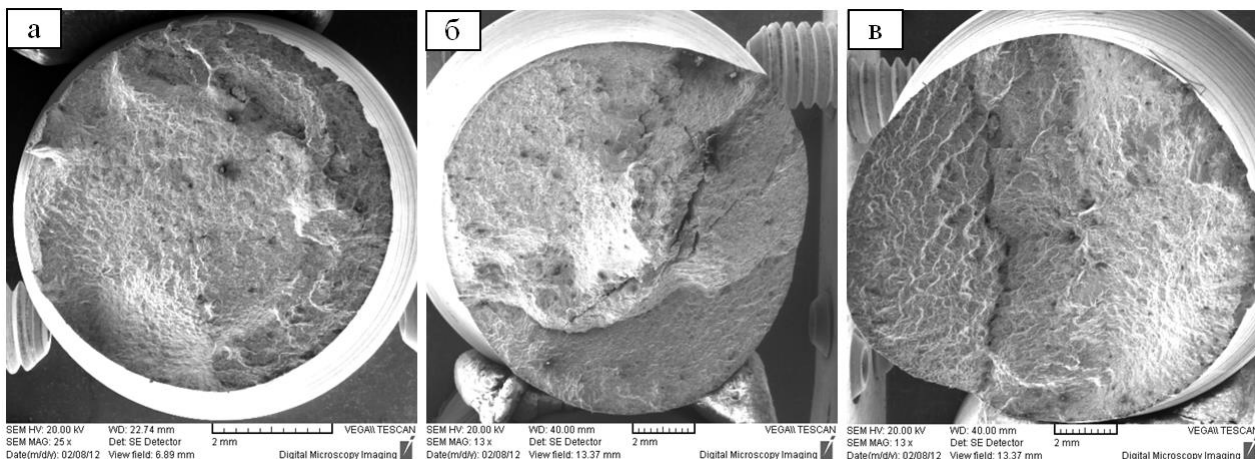


Рис. 9. Поверхность усталостного разрушения сплавов Д16 при различных скоростях деформирования (от концентратора в виде хрупкой трещины):
 а – 6000 об/мин; б – 60 об/мин; в – 6 об/мин при $R_n = 0,7$

Оценивание предела выносливости и постоянной выносливости

Предел выносливости исследуемых сплавов, согласно экспериментальным данным (см. рис. 6), снизился с $\sigma_{-1} = 15 \text{ кг/мм}^2$ [2–4] до $\sigma_{-1}^K \approx 10 \text{ кг/мм}^2$ (при 6000 об/мин) без концентратора напряжения и $\sigma_{-1}^K \approx 5 \text{ кг/мм}^2$ (при 60 и 6 об/мин) при наличии концентратора напряжения (рис. 10).

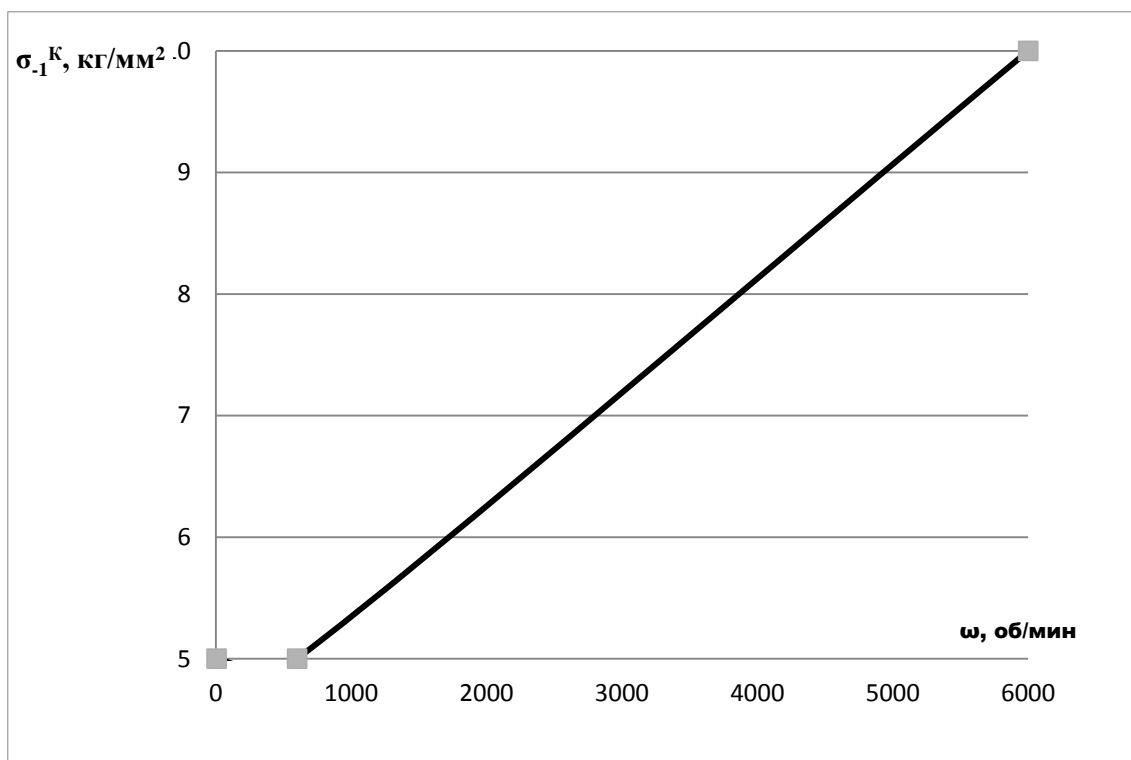


Рис. 10. Зависимость предела выносливости от скорости деформирования

Для определения постоянной выносливости $C\sigma_{-1}^{Ga}$ использовалось выражение [9]

$$C\sigma^K = \sigma_a \cdot LgN, \quad (2)$$

где N – количество циклов до разрушения алюминиевых сплавов в условиях знакопеременных нагрузок при амплитуде цикла σ_a^K .

Согласно полученным результатам, постоянная выносливости алюминиевых сплавов (при наличии концентраторов в виде хрупких трещин) нелинейно зависит от скорости деформирования и составит: около 50 кг/мм^2 при 6000 об/мин , 22 кг/мм^2 при 60 об/мин и 20 кг/мм^2 при 6 об/мин . При отсутствии концентратора напряжения $C\sigma = 120 \text{ кг/мм}^2$. При наличии концентратора напряжения в виде V-образного надреза $C\sigma = 64 \text{ кг/мм}^2$ [2–4]. Зависимость площади поверхности разрушения и постоянной выносливости от скорости деформирования показана на рис. 11 и 12.

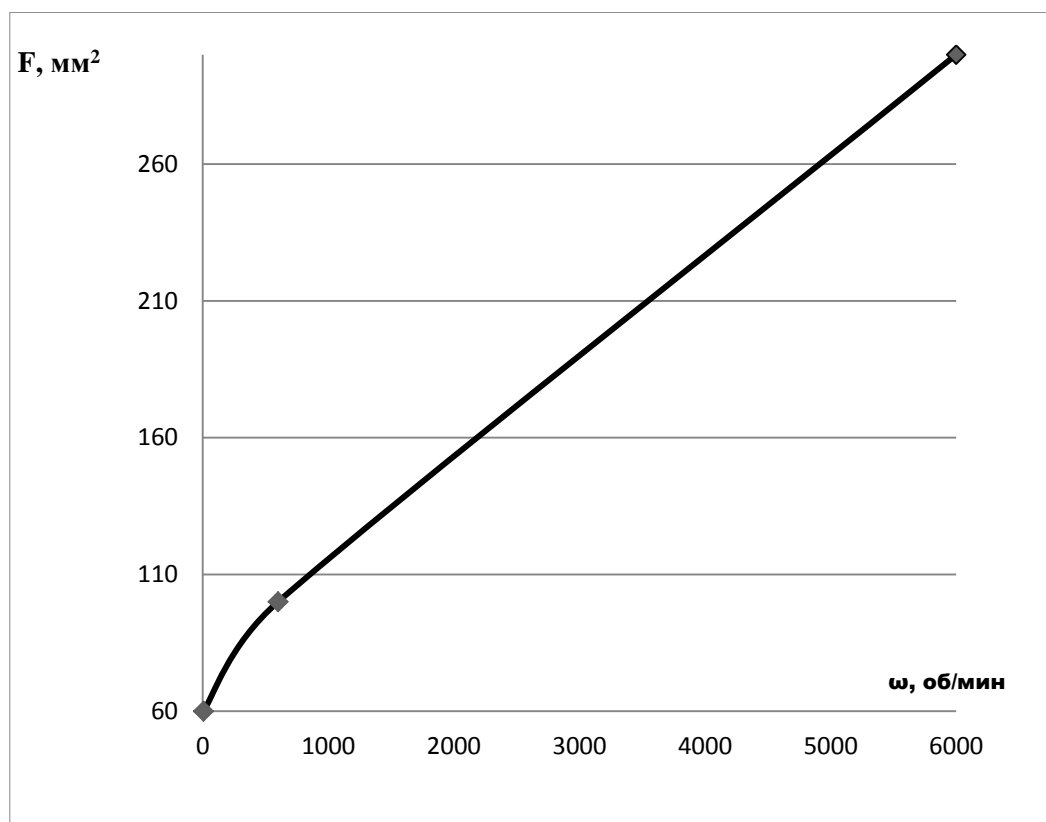


Рис. 11. Зависимость площади поверхности разрушения от скорости деформирования

Данные зависимости можно описать уравнениями в виде полиномов 2-й степени, что обеспечивает значение коэффициента достоверности аппроксимации около 0,8:

$$\sigma_{-1}^K = 2^{-7} \omega^2 + 0,009\omega + 5, \quad (3)$$

$$F = 5 \cdot 10^{-6} \omega^2 + 0,07\omega + 59, \quad (4)$$

$$C\sigma^K = 3 \cdot 10^{-7} \omega^2 + 0,003\omega + 19 \quad (5)$$

С учетом уравнения (1) данные зависимости могут быть представлены в следующем виде:

$$\sigma_{-1}^K = 2^{-7} (V_{\text{деф}} E / 2\pi \sigma_a)^2 + 0,009 V_{\text{деф}} E / 2\pi \sigma_a + 5, \quad (6)$$

$$F = 5 \cdot 10^{-6} (V_{\text{деф}} E / 2\pi \sigma_a)^2 + 0,07 (V_{\text{деф}} E / 2\pi \sigma_a) + 59, \quad (7)$$

$$C\sigma^K = 3 \cdot 10^{-7} (V_{\text{деф}} E / 2\pi \sigma_a)^2 + 0,003 (V_{\text{деф}} E / 2\pi \sigma_a) + 19 \quad (8)$$

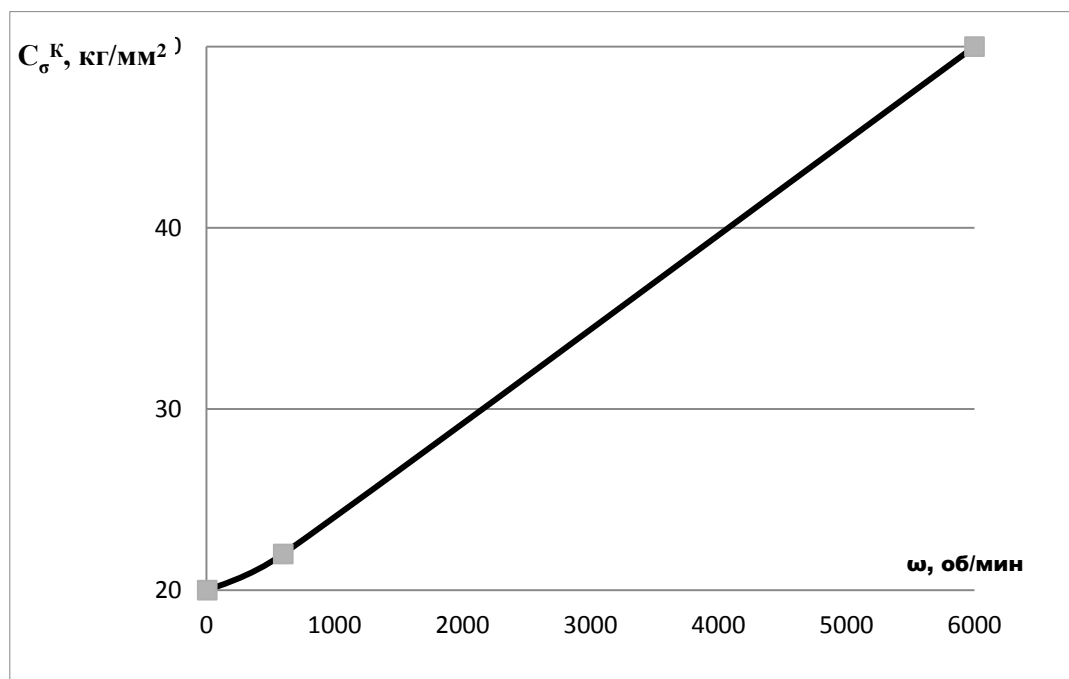


Рис. 12. Зависимость постоянной выносливости от скорости деформирования

Уравнения (6)–(8) позволяют прогнозировать допустимые нагрузки σ_{-1}^K и характер разрушения контролируемой конструкции с учетом F , а также число циклов до разрушения с учетом $S\sigma^K$ в зависимости от амплитуды σ_a и скорости деформирования $V_{\text{деф}}$. Если известна частота изменения прилагаемой нагрузки, то можно воспользоваться зависимостями (3)–(5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получены экспериментальные данные изменения механических характеристик термоупрочняемого алюминиевого сплава Д16 при симметричных знакопеременных нагрузках в условиях наличия концентратора напряжения в виде хрупких трещин. Показано, что наличие указанного концентратора в значительной степени снижает сопротивляемость усталости исследуемых сплавов. Это объясняет наличие разрушений контролируемых конструкций при нагрузке ниже предельного расчетного значения (которое получено при концентраторе напряжений в виде V-образных трещин).

Впервые представлена зависимость характера разрушения в указанных условиях от скорости деформирования. При высоких скоростях деформирования характер разрушения в основном – хрупкий, наблюдается разветвление трещин вдоль касательных напряжений. Работа разрушения затрачивается на образование поверхностей разрушения. Данный режим достаточно опасен по критерию суммарной длины трещины при эксплуатации конструкций в условиях знакопеременной нагрузки.

При снижении скорости деформирования проявляется вязкий характер разрушения. Однако работа разрушения снижается по причине снижения степени разветвления трещины и уменьшения «паразитных» поверхностей разрушения.

Представлены эмпирические зависимости основных характеристик усталостного разрушения исследуемых сплавов в виде полиномов 2-й степени. Данные зависимости могут быть

использованы для прогнозирования стойкости конструкции с учетом амплитуды и скорости деформирования при циклических нагрузках.

Список используемых источников

1. *Бутушин С. В., Семин А. В., Фейгенбаум Ю. М.* Оценка вероятности развития усталостного повреждения в элементах конструкции планера воздушного судна, имеющего производственные дефекты // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – № 163. – С. 103–109.
2. *Кудрявцев И. В.* Материалы в машиностроении : справочник. – Печатный двор, 1967. – Т. 1 : Цветные металлы и сплавы. – 304 с.
3. Справочник по авиационным материалам : в 4 т. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – М. : ВИАМ, Машиностроение, 1965. – Т. II : Цветные сплавы, ч. 1 : Алюминиевые сплавы. – 353 с.
4. *Хэйвуд Р. Б.* Проектирование с учетом усталости / пер. с англ. под ред. чл.-кор. АН СССР И. Ф. Образцова. – М. : Машиностроени, 1969. – 504 с.
5. Применение акустико-эмиссионных средств для регистрации начала образования и развития трещин в конструкционном материале корпусов летательных аппаратов / К. В. Алексеев [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 658 – С. 119–129.
6. *Карпенко Г. В.* Влияние активных сред на выносливость стали. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 116 с.
7. *Карпенко Г. В.* Влияние среды на прочность и долговечность металлов. – Киев : Наукова думка, 1976. – 127 с.
8. *Новиков И. И., Строганов Г. Б., Новиков В. Ю.* Металловедение, термообработка и рентгенография : учебник для ВУЗов. – М. : «МИСИС», 1994. – 480 с.
9. *Самойлов Н. С.* Основы теории ускоренных испытаний на выносливость и термостойкость. – СПб. : НПО «Профессионал», 2012. – 450 с.

В. Н. Дяченко;
А. А. Казько;
И. В. Кузьмичева,
кандидат биологических наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВ ЦИФРОВОЙ ГРАМОТНОСТИ У ОБУЧАЮЩИХСЯ В ВОЕННО-УЧЕБНОМ ЗАВЕДЕНИИ

В статье приведены результаты исследования, проведенного с целью определения типов и оценки уровней цифровой грамотности курсантов академии как компетенций, значимых для осуществления ими учебной и повседневной деятельности.

Ключевые слова: военно-учебное заведение, образовательная деятельность, электронная информационно-образовательная среда, обучающиеся, цифровая грамотность.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальная проблема современности – цифровая трансформация экономики Российской Федерации, которая была заложена правительственной программой «Цифровая экономика» [1]. Одной из задач проекта является «подготовка кадров будущего с учетом сквозной цифровизации».

Для образовательного процесса в военно-учебном заведении (вузе) характерно широкое использование компьютеров и информационных технологий, что делает процесс обучения не только более наглядным, но и, что гораздо важнее, обеспечивает большую познавательную активность обучающегося за счет внедряемых высокотехнологичных решений, компонентов информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, элементов искусственного интеллекта. Необходимым условием реализации образовательных программ с использованием информационных технологий является развертывание в военной образовательной организации единой электронно-информационной образовательной среды (ЭИОС), что предписано федеральным законом «Об образовании в Российской Федерации» для каждого высшего учебного заведения в нашей стране [2]. В основе цифровой трансформации образовательного процесса лежит использование электронных учебных модулей, разработанных по всей учебной дисциплине или отдельным ее разделам. Очевидно, что для успешного осуществления образовательной деятельности в условиях использования цифровых технологий как преподаватель, так и обучающийся должны иметь определенный уровень цифровой грамотности (ЦГр).

Цифровая грамотность – это способность человека понимать и использовать информацию, полученную с помощью компьютера (или другого цифрового устройства) из различных источников и в различных форматах; создавать и использовать контент с помощью цифровых технологий, включая навыки компьютерного программирования; осуществлять коммуникацию с другими людьми с целью обмена информацией [3–6]. Пространство ЦГр включает социогуманитарный и технико-технологический уровни, причем как полезные, так и опасные их аспекты, поэтому грамотный пользователь должен уметь защитить свои личные данные от неправомерного их использования [7, 8].

Нами проведено теоретическое и эмпирическое исследование по определению типов и уровней цифровой грамотности постоянного и переменного состава вуза [9, 10]. В исследовании приняли участие около 700 старшекурсников. Была составлена анкета, анализ ответов на которую позволил оценить уровень готовности обучающихся к применению современных способов реализации цифровых технологий, потребность обучающихся в тех или иных видах

цифровых технологий в учебной и повседневной деятельности, а также их представления о потребности в информационно-коммуникационных технологиях в будущей профессиональной деятельности.

В ходе проделанной работы нами была предложена методика оценки типов и уровней цифровой грамотности у исследуемого контингента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Разработанная нами версия обработки полученного эмпирического материала базируется на типологии ЦГр, описанной в работе В. С. Зябревой [11].

В интегративном понятии ЦГр мы выделили пять ее аспектов (типов): информационная и компьютерная грамотность, медиаграмотность и коммуникативная грамотность, компетенции в сфере технологических инновации и отношение респондента к ним. Каждый тип ЦГр мы охарактеризовали совокупностью необходимых компетенций. Далее из разработанной анкеты мы отобрали пункты, в которых прописывался запрос на самооценку уровня сформированности той или иной компетенции. Эти вопросы анкеты мы стали считать индикаторами компетенций, характеризующих различные типы ЦГр (табл. 1).

Таблица 1

Классификация типов цифровой грамотности

Тип цифровой грамотности	Необходимые компетенции	Кол-во индикаторов компетенций
Компьютерная грамотность (комп. гр.)	Совокупность знаний, умений и навыков работы на компьютере, владение средствами вычислительной техники. Уровни навыков варьируются от базового пользователя до программирования и умения осуществлять ремонт и сборку компьютерной техники	13
Информационная грамотность (инф. гр.)	Набор умений и навыков, позволяющий запрашивать, искать, отбирать, оценивать и перерабатывать нужную информацию, создавать новую информацию, безопасно и эффективно обмениваться ею, обеспечивать защиту своей информации	9
Медиаграмотность (медиагр.)	Умения и навыки, позволяющие анализировать разные виды медиапродукции, оценивать их и создавать собственные сообщения в разных медийных жанрах и формах	5
Коммуникативная грамотность (комм. гр.)	Знания и умения, позволяющие использовать современные средства коммуникации (социальные сети, мессенджеры и т. п.) в процессе общения. Навыки соблюдения правил общения и способность соотнести их с конкретной ситуацией (осознание наличия особой этики и норм общения в цифровой среде)	6
Отношение к технологическим инновациям (техн. гр.)	Понимание технологических трендов. Готовность учиться использовать в учебной, повседневной и будущей профессиональной деятельности современные технологии (устройства, программы и т. п.). Способность распознать мошеннические действия и знание методов защиты личных данных и ПК от их утечки	10

Вопросы-индикаторы были сформулированы так, чтобы ответ на них давал возможность курсанту оценить степень проявления (частоту использования и т. п.) у себя той или иной компетенции. Это позволило нам ранжировать различные индикаторы для дальнейшей математической обработки полученных данных (табл. 2). Очевидно, что выбираемый при ответе на каждый вопрос уровень позволяет прямо или косвенно судить о степени сформированности цифровой компетенции (уровне определенного типа ЦГр)

Таблица 2

Способы ранжирования различных индикаторов цифровых компетенций

№ п/п	Содержание вопроса-индикатора	Градации индикатора (уровень сформированности цифровой компетенции)				
		Данные умения и навыки не развиты	Развиты слабо	Развиты средне	Развиты, но требуют совершенствования	Данные умения и навыки развиты хорошо, не требуют совершенствования
1	Оцените, насколько хорошо развита у Вас способность отбирать и оценивать необходимую информацию					
2	Насколько часто Вы используете ПК для выхода в интернет	Редко	1 раз в месяц	1 раз в неделю	Несколько раз в неделю	Ежедневно
3	Как часто Вы используете следующие возможности интернет-ресурсов	Никогда	редко	Время от времени	Часто	–

Сформированность показателей цифровой грамотности респондентов определяли путем самооценки по каждому индикатору.

Статистическая обработка полученных эмпирических данных осуществлялась стандартными методами. Подсчитывались: суммарные баллы, набранные по каждому индикатору в каждой возрастной группе каждого потока, каждой специальности по отдельности, суммарные цифры для каждой возрастной группы (т. е. для каждого учебного курса в отдельности) и сводные значения показателей по всей выборке обследуемых.

Обобщенные результаты определения типов и уровней цифровой грамотности исследуемого контингента представлены на рис. 1.

При обработке полученного материала мы, в первую очередь, оценили потребности молодых людей в работе на персональном компьютере (ПК) и в сети Интернет (табл. 3).

Таблица 3

Потребность респондентов в работе на ПК и в сети Интернет с учебной целью

Курс обучения	Пользуются ПК без доступа к интернету (% обучающихся)						Пользуются интернетом (% обучающихся)							
	в будние дни			в выходные			в будние дни				в выходные			
	меньше 1 часа	1–3 часа	3–5 часов	меньше 1 часа	1–3 часа	3–5 часов	меньше 1 часа	1–3 часа	3–5 часов	меньше 1 часа	1–3 часа	3–5 часов	5–8 часов	
3-й	70,3	23,1	3,8	67,5	18,9	9,4	69,3	20,3	8,0	58,0	19,8	16,5	4,7	
4-й	55,3	28,3	13,3	50,9	29,2	13,3	47,3	34,1	11,1	30,5	32,3	20,8	13,3	
5-й	42,9	35,0	15,8	48,3	30,4	15,8	33,3	41,3	17,9	29,6	32,9	20,0	15,0	

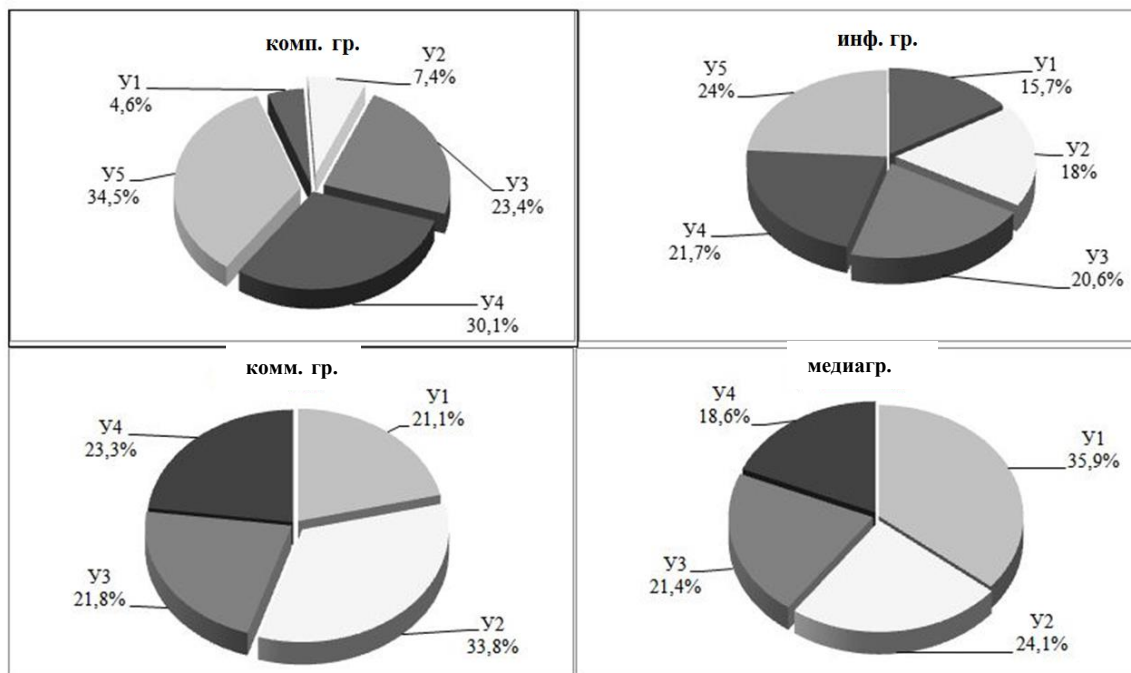


Рис. 1. Типы и уровни цифровой грамотности у исследованного контингента обучающихся: комп. гр. – компьютерная грамотность; инф. гр. – информационная грамотность; комм. гр. – коммуникативная грамотность; медиагр. – медиаграмотность; У1–У5 – уровни ЦГ

Из анализа табл. 3 следует, что почти 100% опрошенных пользуются ПК и интернетом с учебными целями, причем продолжительность работы возрастает от 3-го к 5-му курсу как в будние дни, так и в выходные.

Развертывание в вузе ЭИОС позволяет обеспечить обучающимся доступ к различным специальным цифровым устройствам и программным средствам, осуществлять процесс обучения с опорой на электронные образовательные ресурсы (электронные учебники, интерактивные 3D-модели, видеоматериалы), подготовленные как сотрудниками кафедр, так и доступные для курсанта из сторонних источников.

Очевидно, что работа в вузе должна быть построена так, чтобы как в учебное, так и во внеучебное время у обучающихся был доступ к компьютерам в специализированных классах, при кафедрах и в библиотеке академии для осуществления различных видов учебной деятельности, подготовки к научным конференциям и занятиям в военно-научном обществе, культурно-досуговой работы и творчества (табл. 4).

В ходе проводимых нами в настоящее время исследований, связанных с внедрением в ЭИОС вуза технологий искусственного интеллекта, был сделан вывод, что переменному составу, помимо автоматизированных рабочих мест, необходимы также мобильные и персональные цифровые устройства.

Следует отметить, что модернизированные федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (ФГОС ВО 3++) рассматривают компьютерную грамотность как одну из обязательных категорий (групп) общепрофессиональных компетенций выпускника вуза.

Для оценки уровня компьютерной грамотности (комп. гр.) анализировались знания обучающихся о предназначении программ, установленных на компьютере, их умение установить на компьютер программное обеспечение, антивирусные и другие необходимые программы, навыки работы с офисными приложениями и графическими редакторами, умение разобраться в том, как использовать новое незнакомое цифровое устройство и т. п.

Таблица 4

Оценка необходимости цифровых технологий в учебной и повседневной деятельности обучающихся в вузе

Место расположения АРМ, виды деятельности	Пользуются ПК, в том числе с выходом в ЭИОС академии				Пользуются интернетом			
	<i>ежедневно</i>	<i>несколько раз в неделю</i>	<i>несколько раз в месяц</i>	<i>редко</i>	<i>ежедневно</i>	<i>несколько раз в неделю</i>	<i>несколько раз в месяц</i>	<i>редко</i>
В компьютерном (специализированном) классе, на кафедре	17,7	30,7	26,7	24,9	5,2	17,0	23,5	54,4
В учебной библиотеке	3,2	8,0	18,3	70,5	–	–	–	–
Дома	45,0	22,7	9,9	22,6	44,2	24,0	8,7	23,0
Для работы с электронными учебниками	17,8	32,7	24,4	25,1	5,8	10,3	10,8	73,1
Для выполнения математических и других расчетов	20,4	35,8	24,5	19,3	–	–	–	–
Для работы с графическими редакторами	16,7	30,5	30,7	22,1	–	–	–	–
Для подготовки к текущим занятиям	38,8	22,1	29,6	9,4	43,8	20,4	27,5	8,4
Для подготовки к экзаменам и зачетам	29,2	22,3	20,8	27,8	35,4	21,2	19,6	23,8
Для разработки курсовой или дипломной работы	60,6	23,6	11,3	7,1	55,2	32,5	8,5	3,8
Для подготовки к научным конференциям и занятиям в военно-научном обществе	50,4	22,0	15,2	12,5	–	–	–	–
Для пользования электронными библиотеками и научными базами данных	27,0	40,6	19,8	12,7	5,5	11,2	34,4	48,9
Для культурно-досуговой работы и творчества	31,3	17,6	24,9	26,3	39,1	18,1	20,9	21,1

Анализ полученного материала (см. рис. 1, блок 1) свидетельствует о достаточно высокой компетентности исследуемого контингента в сфере компьютерной грамотности и демонстрирует активный характер использования этих знаний и умений в процессе обучения и в быту. В то же время опрашиваемые отдают себе отчет, что в будущей профессиональной деятельности им придется совершенствоваться и получать новые умения и навыки в сфере компьютерных технологий. В первую очередь это касается владения языками программирования, работы со специальными программными средствами для математических расчетов, специальными программными средствами для 3D-моделирования, анимации, создания цифровых карт, с графическими редакторами. Вероятна работа со специальными цифровыми устройствами, проведение и поддержка работы локальных компьютерных сетей и тому подобные виды профессиональной деятельности.

В качестве индикаторов информационной грамотности (инф. гр.) были выбраны вопросы анкеты, которые характеризовали умение запрашивать и находить информацию, необходимую как в учебной, так и в повседневной деятельности, грамотно оценивать ее, создавать информационные ресурсы. Например, это такие вопросы:

1. Оцените, насколько Вам необходим выход в интернет в повседневной и учебной деятельности в вузе.

2. Как часто Вы используете возможности интернет-ресурсов при поиске информации для выполнения служебных задач, для пользования образовательными порталами и обучающими онлайн-курсами, для пользования электронными библиотеками и научными базами данных.

3. Способны ли Вы обеспечить защиту своей информации, хранящейся в интернете и тому подобные вопросы.

Из диаграммы (см. рис. 1) видно, что высокий уровень инф. гр. (4–5-й уровни) продемонстрировали менее половины старшекурсников. Подавляющее большинство опрошенных редко пользуются внешними интернет-ресурсами: электронными библиотеками, научными базами данных, образовательными порталами, обучающими онлайн-курсами, в основном, очевидно, – для работы в военно-научном обществе и подготовки к научным конференциям, о чем свидетельствуют их ответы в анкетах.

На первый взгляд, полученные результаты свидетельствуют о невысоком в целом уровне информационной компетентности исследуемого контингента. Однако интерпретация полученных результатов может быть иной, если вернуться к статистике данных по пользованию обучающимися сетью ЭИОС (т. е. внутренними ресурсами академии) и сопоставить цифры, представленные в табл. 4. Очевидно, что для подготовки к текущим занятиям, экзаменам и зачетам, для выполнения курсовых и дипломных проектов обучающийся нуждается в специализированной литературе, представленной в библиотеках вуза. Такая литература отсутствует в сети Интернет. Невысокая активность в ЭИОС академии в таком случае должна стимулировать преподавателей к повышению темпов оцифровки специализированной учебной литературы и созданию востребованных старшекурсниками учебников и учебно-методических пособий.

Степень сформированности коммуникационных и медиакомпетенций в области цифровых технологий у переменного состава академии оценивалась с помощью таких индикаторов, как использование электронной почты, общение в социальных сетях, использование мессенджеров и т. п.

Результаты, представленные на рис. 1, свидетельствуют о невысокой коммуникативной активности обучающихся в интернет-сообществе. Лишь 23,3% из них часто общаются в социальных сетях, пользуются электронной почтой и играют в мобильные и онлайн-игры, в то время как почти столько же респондентов не используют эти возможности интернета и мобильного интернета никогда. Следует отметить, что полученные показатели оказались практически не зависящими от возраста респондентов (курса обучения).

Такая, в определенном смысле, парадоксальная картина может быть объяснена тремя возможными причинами:

– во-первых, возможно, вопросы анкеты были неправильно истолкованы некоторыми исследуемыми. Например, у них могло создаться впечатление, что речь идет об общении в сети и пользовании мобильным интернетом во время учебных занятий, что категорически запрещено;

– во-вторых, многие из них живут в общежитиях, расположенных на территории академии, где пользование интернетом может быть ограничено;

– третья возможная причина заключается в том, что у старшекурсников, действительно, большая загруженность в ходе учебного процесса и при выполнении специальных обязанностей, поэтому время на общение в сети может быть ограничено лишь самыми необходимыми видами коммуникативной деятельности, например перепиской с родителями.

Индикатор, касающийся этики общения в сети, был проанализирован отдельно. Лишь 11,5% опрошенных считают, что могут позволить себе не стесняться в выражениях, участвуя в дискуссиях и оставляя комментарии на интернет-сайтах (уровень 1). Однако подавляющее большинство из них имеет представление о нормах общения в цифровой среде и считают недопустимым их нарушение, несмотря даже на анонимность авторов.

Анализ уровней сформированности медиаграмотности (медиагр.) у старшекурсников показал, что 75,8% из них ежедневно читают новостные ленты, а 58,7% – часто либо время от времени осуществляют поиск развлекательного контента в сети. Вместе с тем 79% респондентов отметили, что интернет необходим им для культурно-досуговой работы и творчества, а 58,0% используют его поисковые системы с этой целью несколько раз в неделю.

Таким образом, поисковая активность обучающихся в сфере медиаграмотности достаточно высока, что может свидетельствовать, по нашему мнению, об активной жизненной позиции и разнообразии интересов исследуемого контингента.

Для большинства опрошенных не характерно творчество в сфере медиатехнологий. Лишь единицы отметили, что имеют опыт создания сайтов, программ, приложений или своего контента (текстов, видео и т. д.) для интернет-ресурсов. Отметим, однако, что более половины из них высказали пожелание овладеть такими умениями и навыками в будущем.

Отношение к технологическим инновациям (техн. гр.), как компонент цифровой грамотности, оценивалось по интересу к технологическим новинкам, по готовности использовать современные технологии в повседневной деятельности (включая пользование государственными и образовательными услугами, заказ и покупку товаров, создание сайтов, программ, приложений) и в будущей профессиональной деятельности. Уровень этих компетенций у опрошенных молодых людей наиболее высок и превышает даже уровень компьютерной грамотности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральный закон «Об образовании...», ФГОС и Квалификационные требования обязывают образовательные организации высшего образования оснащать учебные аудитории и помещения для самостоятельной работы обучающихся компьютерами с «доступом каждого обучающегося ...к электронной информационно-образовательной среде организации, а также к современным профессиональным базам данных и информационным справочным системам, сетям Интранет и Интернет ...в пределах, установленных законодательством Российской Федерации и иными нормативными правовыми актами в области защиты государственной тайны».

Именно в ЭИОС базируется административно-штатная платформа (в частности, СПО «Образование – МО») и разворачиваются учебно-методические комплексы. Сеть вуза позволяет осуществлять взаимодействие преподавателей и обучающихся как в онлайн-режиме, так и в режиме отставленного времени, обеспечивает выход к внутреннему оцифрованному библиотечному фонду и в систему Единой библиотеки Министерства обороны Российской Федерации. Стратегия цифровизации образования предусматривает такие технологические инструменты, как искусственный интеллект, виртуальная реальность, работы с интерактивной доской, графическими редакторами и с офисными приложениями и т. п.

Все это предъявляет определенные требования к уровню сформированности цифровых компетенций обучающихся и профессорско-преподавательского состава вуза.

В рамках проведенного нами исследования был предложен опросник и разработана методика оценки типов и уровней ЦГр обучающихся в вузе. Мы определили цифровую грамотность как совокупность информационной, компьютерной, медиа, коммуникационной и технологической компетенций.

Ответы старшекурсников на вопросы анкеты позволили определить значимость ЦГр и ее компонентов (типов) для учебной и повседневной деятельности обучающихся. Полученные данные позволяют констатировать, что, по мнению опрошенных, цифровая грамотность является необходимым условием для успешного функционирования участников учебного процесса в вузе. При этом каждый тип цифровых компетенций вносит свой вклад в общую цифровую компетентность и обеспечивает те или иные потребности обучающегося.

Анализ результатов исследования свидетельствуют о том, что обучающиеся в вузе в большинстве своем имеют представление о технологических трендах и готовы использовать в повседневной и профессиональной деятельности современные технологии. Респонденты также осознают, что уровень их грамотности в сфере информационных технологий

важен для будущей профессиональной деятельности и повышает их шансы на трудоустройство по гражданской специальности после увольнения в запас.

В рамках проведенного исследования изучался уровень цифровой грамотности обучающихся по разным направлениям подготовки. Анализ различий между ними не входит в задачу настоящей публикации. Заметим лишь, что был обнаружен ряд предпочтений отдельных индикаторов ЦГр определенными группами обучающихся. Это свидетельствует о том, что для разных категорий обучающихся есть необходимость совершенствования (повышения уровня) тех цифровых компетенций, которые наиболее востребованы в их учебном процессе и в будущей профессиональной деятельности. Соответствующие сведения при необходимости могут быть нами предоставлены руководству кафедр и факультетов.

Список используемых источников

1. Цифровая экономика Российской Федерации : правительственная программа : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации 28 июля 2017 г. № 1632-р. – URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media (дата обращения: 27.05.2020).

2. Об образовании в Российской Федерации : фед. закон от 29.12.2012 г. № 273-ФЗ. – М., 2012. – 160 с.

3. Шариков А. В. О четырехкомпонентной модели цифровой грамотности // Журнал исследований социальной политики. – 2016. – Т. 14 (1). – С. 87–98.

4. Посыпкина А. А. Аналитики оценили уровень цифровой грамотности россиян // Технологии и медиа. – 2018. – URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media (дата обращения: 27.05.2020).

5. Кузьмина М. В. Формирование цифровой грамотности обучающихся : метод. рекомендации для работников образования. – Киров, 2019. – 47 с.

6. Давыдов С. Г. Цифровые компетенции россиян и работа на самоизоляции во время пандемии COVID-19 // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. – 2021. – № 2. – С. 403–422.

7. Дженкинс Г. Конвергентная культура. Столкновение старых и новых медиа. – М. : РИПОЛ классик, 2019. – 273 с.

8. Солдатова Г. У., Рассказова Е. И., Нестик Т. А. Цифровое поколение России: компетентность и безопасность. – М. : Смысл, 2017. – 375 с.

9. Мерзвинская Л. В., Прохоров М. А. Проблемы цифровой грамотности преподавателей военно-учебных заведений высшего образования Министерства обороны Российской Федерации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 4. – С. 107–114.

10. Формирование цифровой грамотности научно-педагогического и переменного состава вузов Воздушно-космических сил : СЧ НИР «Цифра» : заключительный отчет. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2021. – 76 с.

11. Зябрева В. С. Факторный анализ значимости цифровой грамотности в профессиональном развитии студентов-психологов // Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования. – 2018. – Т. 7, № 2А. – С. 110–121.

С. А. Мусиенко,
кандидат военных наук, доцент

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ: ЕДИНСТВО ПРАВОВЫХ НОРМ И ТВОРЧЕСТВА

В публикации рассматриваются актуальные проблемы разработки технологий проектирования образовательного процесса. Акцентируется внимание на диалектическом единстве в этом процессе образовательного права, педагогических норм и творчества. Автор обосновывает способы проектирования рабочей программы, содержание уровней обученности и необходимое время для их достижения. Особое внимание уделено технологиям обучения, определение которых обуславливает основные виды учебных занятий, а также методические рекомендации преподавателям, указания обучающимся и процедуры оценивания.

Ключевые слова: образование, образовательное право, правовые нормы, творчество, рабочая программа учебной дисциплины, способы проектирования рабочей программы, компетенции, индикаторы уровня обученности, технологии обучения, лекции, занятия практической направленности.

Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» четко сформулировал сущностные признаки отечественного образования. Оно представлено прежде всего как единый, взаимосвязанный процесс воспитания и обучения. Обратим внимание, что воспитание не случайно представлено в определении прежде обучения. Здесь, убежден автор, устранен весьма важный и противоречивый момент, характеризующий современное российское образование. Серьезным заблуждением, ошибкой для образовательной системы России, после вступления нашей страны в Болонский процесс, стала принципиальная установка образования на оказание «образовательных услуг». И, несомненно, еще много предстоит сделать всем участникам образовательного процесса для перелома сложившейся в последние годы, а возможно, и десятилетия ситуации в отечественном образовании. В первую очередь отечественное образование должно формировать личность.

В законе также подчеркивается, что формируемые в процессе образования компетенции (как совокупность знаний, навыков, практических умений и способности успешной их реализации в определенном виде деятельности) нацелены в конечном счете на всестороннее развитие личности. При этом в процессе образования происходит не только удовлетворение духовных потребностей и интересов обучающихся, но и осуществляется активный, целенаправленный процесс их нравственно-этического, интеллектуального и физического совершенствования. В совокупности это должно обеспечить всестороннее формирование профессионала – творческой, духовно развитой и обладающей необходимыми компетенциями личности. Это веление времени, и от выполнения этих задач в образовании зависит в значительной степени будущее России [1].

Одной из сущностных характеристик процесса образования выступает целенаправленность, обеспечивающая стройность его управления. Данный процесс включает в себя целую систему отношений, которая складывается между педагогом и обучающимся, образовательным учреждением и государством, личностью и государством. Образовательный процесс направлен на обогащение личности и групп людей прикладными и фундаментальными знаниями.

Вышеперечисленные отношения закреплены в образовательном праве. То есть образовательное право можно рассматривать как совокупность правил, установленных государством или от имени государства. Таким образом, образовательное право регулирует отношения, складывающиеся между субъектами и объектами образовательных отношений. В литературе рассматриваются несколько подходов к составляющим термина «образовательное право».

Автор предлагает выделить следующие компоненты образовательного права: образовательное законодательство, которое представлено нормативными актами, регулирующими

отношения, складывающиеся в образовательном процессе; совокупность правил поведения, норм права, которые содержатся в этих нормативных актах и которые можно рассматривать как отрасль образовательного права; реальные отношения людей, урегулированные нормами права, складывающиеся в систему правоотношений в сфере образования; мнение и ощущение людей о справедливости общественных отношений в сфере образования; субъективное право человека на образование; учебная дисциплина.

Непосредственно к праву, как к юридической норме, имеют отношение следующие составляющие: образовательное законодательство, которое представлено нормативными актами, регулирующими отношения, складывающиеся в образовательном процессе; совокупность правил поведения, норм права, которые содержатся в этих нормативных актах. А такие составляющие образовательного права, как реальные отношения людей, урегулированные нормами права, складывающиеся в систему правоотношений в сфере образования; мнение и ощущения людей о справедливости общественных отношений в сфере образования; субъективное право человека на образование; проектирование рабочей программы учебной дисциплины следует рассматривать как так называемые неправовые нормы образовательного права, к которым также можно отнести религиозные, этнические, финансовые, педагогические, творческие, традиционные, нравственные и другие отношения людей в области права.

Очевидно, что кроме законодательных и правовых основ реализации образовательных программ значимую роль играют и педагогические нормы, которые являются наиболее важными и весомыми в сфере образовательного права. Таковыми являются, например, отношения между педагогом и обучающимися, выбор образовательных технологий, методов и средств воспитания и обучения, технологий обучения, учебно-методическое обеспечение преподавания, контроль качества подготовки обучающихся и иные компоненты педагогической деятельности, которые, несомненно, носят творческий характер.

Реальный образовательный процесс строится на основе как правовых, так и педагогических, творческих норм, находящихся в диалектической взаимосвязи. В этой диалектике проявляется степень свободы, творчества и инициативы педагогических работников военной образовательной организации. Указанное обстоятельство имеет важное теоретическое и особенно практическое значение и требует углубленного исследования.

Основные характеристики образования, организационно-педагогические условия представлены в образовательных программах. Одним из наиболее важных элементов образовательной программы является рабочая программа учебной дисциплины. Это формализованный документ, представляющий собой дидактически обработанные знания по основам определенной области науки или деятельности для достижения образовательной цели.

Исходной основой при разработке учебной программы, документом, в котором прописаны образовательные цели (образовательные цели должны быть санкционированы обществом), являются такие нормативные документы, как федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС), образовательные стандарты (ОС), федеральные государственные требования (ФГТ), квалификационные требования к военно-профессиональной подготовке выпускников (КТ). В этих документах сформулированы основные требования к содержанию учебных программ, в них, по сути дела, представлена модель выпускника учебного заведения, обладающего компетенциями, необходимыми для успешной деятельности по предназначению.

Основные способы проектирования рабочей программы учебной дисциплины определены в современной педагогической литературе. Такими способами являются линейный; модульный; спиральный и концентрический.

Технология разработки учебной программы, основанная на *линейном способе*, представляет собой своеобразный алгоритм смысловых блоков. Последние расположены в строгой логической последовательности и взаимосвязаны между собой, вытекают друг из друга. Следует отметить, что программы, созданные с использованием линейного способа, позволяют в полной мере реализовать в обучении принципы системности и последовательности.

В качестве условия успешной деятельности выпускника политехнического вуза выступают именно систематизированные знания. Это достижимо только посредством целенаправленной организации образовательного процесса, которая обеспечит вооружение выпускников прочными знаниями в строгой логической последовательности представления знаний и комплексным формированием устойчивых умений и навыков. Содержание каждой новой темы, раздела взаимосвязано и логично вытекает из предшествующего учебного материала, в дальнейшем его развитии. Плюсом или достоинством этого способа построения является то, что исключается дублирование материала, существует четкая структурированность учебной программы, и, как следствие, возникает экономичность по времени. Вместе с тем присутствуют и недостатки этого принципа построения. В частности, на разных ступенях обучения не всегда обучающиеся могут усвоить определенный материал, который является несколько сложнее предыдущего.

Как показывает опыт, реализация *компетентного подхода* в высшей школе вызвала особый интерес разработчиков учебных программ к *модульному подходу*. Он позволяет не только обеспечивать целостное впечатление о конкретной предметной области, но и оперативное реагирование на динамику развития науки, техники, технологии производства, учитывать индивидуальные и групповые интересы обучающихся и т. д. В этом случае программа учебной дисциплины проектируется, исходя из определенной совокупности независимых тем (разделов) – модулей. Они относительно самостоятельны, но подчинены общей цели и замыслу всей дисциплины и принципиально не противоречат другим модулям и учебной дисциплине в целом. При использовании данного принципа проектирования прохождение учебных модулей возможно в любом порядке. В основном, по традиции, образовательный процесс в значительной степени построен на базе линейного принципа проектирования. Модульный принцип построения учебной программы применяется реже. Наиболее применим и актуален модульный принцип построения в системе профессиональной подготовки и повышения квалификации. Это объясняется определенным уровнем знаний, профессиональным опытом обучающихся, их способностью усвоения преподаваемого. Также такой подход наибольшую эффективность показывает в разработке и реализации всех планирующих документов (учебных планов, программ и т. д.).

Технология *спирального проектирования программы* позволяет обучающимся углублять и расширять предметные (профильные) знания, основываясь на исходных научных принципах, ядре, вокруг которого формируются темы, разделы, модули учебной программы. Весь учебный материал представлен последовательно и циклично с точки зрения его преподавания и развития. В отличие от других принципов построения рабочей программы учебной дисциплины, при спиральном построении программы появляется возможность повторения (неоднократного изучения) тех или иных тем (модулей).

Концентрический способ построения учебной программы характеризуется систематическим повторением и исследованием одного и того же вопроса. При таком подходе происходит планомерное усложнение изучаемого учебного материала, появляются новые компоненты, подробно и глубоко рассматриваются взаимосвязи и взаимозависимости.

Рассматривая методологические возможности различных способов проектирования рабочей программы учебной дисциплины и учитывая опыт организации этой работы в академии, автор считает, что для военной образовательной организации наиболее оптимальным является *линейный способ* проектирования рабочей программы учебной дисциплины.

В самом процессе проектировании рабочей программы учебной дисциплины условно можно выделить несколько этапов. Каждый из них, как правило, обусловлен соответствующим ему компонентом (разделом) и имеет свои особенности, требующие безусловного учета.

Исходным этапом проектирования учебной программы является определение перечня компетенций и индикаторов их достижения, которые заданы в ФГОС и КТ и в формировании которых участвует дисциплина.

В рамках этого этапа важно правильно определить уровни обученности в соответствии с определенными индикаторами достижения компетенции. Автор проанализировал содержание значительного количества рабочих программ учебных дисциплин кафедр академии и обратил внимание на некорректное определение в некоторых из них уровней обученности. Так, в некоторых рабочих программах результаты обучения определены понятиями не только «знать», «уметь», «владеть», но и «соблюдать», «понимать», «способен», «использовать», «проводить», «анализировать», «обладать», «применять», «оценивать».

Императивным для разработчиков должно быть понимание обучения как процесса целенаправленного, в ходе которого обучающиеся овладевают компетенциями, содержание которых составляют прежде всего знания, навыки и умения. Красной нитью через весь процесс проходит задача формирования способностей их применения в повседневной жизни, устойчивой мотивации к самосовершенствованию, непрерывному образованию на протяжении всей жизни человека. Указанные требования принципиально предопределяют в конечном итоге цели обучения, достижение которых и проявляется в потенциальных результатах обучения.

Основная профессиональная образовательная программа определяет не только комплекс компетенций, которыми должны обладать выпускники, но и конкретизирует цели обучения по каждой дисциплине, т. е. результаты, которые должны быть достигнуты. Эти результаты выражены в категориях «знать», «уметь», «иметь навыки» и опыт практической деятельности. В планируемых документах последних лет их принято называть индикаторами достижения. Выбранная система показателей, на которые должно ориентироваться содержание программы, нуждается в системе оценивания степени их достижения в конкретном образовательном процессе. Система оценивания должна включать в себя виды контроля качества подготовки обучающихся, процедуры их осуществления и однозначно определенные критерии оценки.

Таким образом, руководствуясь требованиями нормативных правовых актов в сфере подготовки военных кадров в военных образовательных организациях, разработчики рабочих программ учебных дисциплин обязаны использовать в качестве проектируемых результатов уровни обученности «знать», «уметь», «владеть».

Реализация указанных уровней обученности требует уточнения содержания и распределения учебного времени на их достижение. Следует отметить, что этот вопрос в целом достаточно обоснован в научной литературе и признается большинством педагогов-практиков, однако проблема определения учебного времени, в том числе его градация на занятия лекционные и практической направленности, остается дискуссионной. Автор предлагает свое решение данной проблемы, основываясь на опыте работы преподавателей академии.

Уровень «знать» – это способность сформулировать закон, дать ему определение, охарактеризовать всесторонне явление, процесс; с достаточной степенью точности изложить содержание учебного материала. Для достижения указанного уровня обученности требуется, по мнению автора, не менее шести часов аудиторных занятий. Из них на лекции целесообразно выделить два часа, а на занятия практической направленности – четыре учебных часа.

Достижение обучающимся *уровня «уметь»* позволяет ему решать стандартные задачи, которые находятся в области его профессиональной деятельности, применяя полученные в ходе обучения знания с использованием справочной литературы. Для достижения указанного уровня обученности требуется, на наш взгляд, не менее восьми часов учебных занятий практической направленности.

Уровень «владеть» необходимо определять как способность творчески решать новые нестандартные задачи, при этом не используя дополнительные источники, и адаптировать имеющиеся знания и умения для принятия решения в других аналогичных сферах деятельности. Для достижения указанного уровня обученности требуется не менее двенадцати часов учебных занятий практической направленности.

Проектирование учебной программы учебной дисциплины предполагает определение необходимых информационных и управляющих воздействий на обучающихся, применяемых в строгой логической последовательности, а также наличие средств материально-технического обеспечения образовательного процесса, обеспечивающих достижение требуемого уровня знаний на диагностируемом уровне при заданных в ФГОС и КТ материальных и временных ограничениях.

Исходя из вышеизложенного при проектировании учебной программы должна быть представлена модель образовательного процесса. Модель образовательного процесса должна учитывать следующие обязательные признаки: формулировку цели, способов диагностики ее достижения; программу, которая должна быть представлена в виде теоретической (познавательной) и практической части, средств и способов их освоения; наличие жесткого алгоритма, логики усвоения определенных этапов обучения учебного материала, выбора профессиональных функций и т. п., описание взаимодействия педагог – обучающийся, обучающихся друг с другом; использование обоснованных средств обучения; мотивационное обеспечение деятельности как преподавателя, так и обучающихся, креативность и состоятельность, учет жизненного и профессионального опыта. [3]

Решение этих вопросов напрямую связано с выбором технологии обучения.

В отечественной литературе представлено достаточно много определений данного термина. На взгляд автора, наиболее обоснованной является точка зрения, когда под технологией обучения понимают определенный процесс, способствующий формированию у обучающихся знаний, умений, навыков и компетенций и обеспечивающий выполнение ими функциональных обязанностей по избранной специальности. [4]

Структурными элементами технологии обучения в этом случае являются: цели обучения и его содержание; обучающийся, преподаватель и средства педагогического взаимодействия; организация образовательного процесса; результаты деятельности.

Нормативные правовые документы являются основополагающими при проектировании рабочей программы, вместе с тем значимая роль в процессе проектирования, по мнению автора, принадлежит творческому подходу. Так, в федеральном законе РФ «Об образовании в Российской Федерации» указаны детерминанты использования образовательных технологий. Те, которые могут нанести физический или психический ущерб здоровью усваивающим образовательные программы, категорически запрещены. В результате образовательные технологии, не попадающие под указанные ограничения, могут быть использованы при проектировании рабочей программы учебной дисциплины, а их выбор в конкретном случае и является творческим подходом к данному процессу.

Объем статьи не предоставляет возможность рассмотреть все разделы рабочей программы учебной дисциплины, где применим творческий подход в проектировании. Поэтому автор считает уместным в качестве примера остановиться на образовательных технологиях, определяющих основные формы организации образовательного процесса (технологии чтения лекций, технологии проведения занятий практической направленности, технологии организации самостоятельной работы обучающихся, технологии организации и проведения консультаций, проведения зачетов, экзаменов и др.). Современные образовательные технологии позволяют оптимизировать образовательный процесс в военном вузе: курсанты активно включаются во взаимодействие не только с преподавателями, но и с другими субъектами образования (слушателями магистратуры и адъюнктами), учатся рефлексии, не боятся выражать собственное мнение, рисковать, проявлять разумную инициативу. Используемый педагогами инновационный образовательный инструментальный способен помочь обучающимся в дальнейшем грамотно и эффективно строить собственную профессиональную деятельность. [5]

Как известно, в военно-учебных заведениях могут использоваться различные виды учебных занятий. Прежде всего, это занятия лекционного типа, выполняющие основную функцию передачи информации от преподавателя к обучающимся. Занятия практической направ-

ленности (семинары, практические занятия, лабораторные работы, групповые упражнения и др.) предназначены для выработки практических умений и приобретения навыков, практического освоения обучающимися теоретических положений учебных дисциплин. Эти и другие виды занятий определены нормативными правовыми документами. При этом организациям дается право вводить в образовательный процесс иные виды занятий. Так, например, ученый совет Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского принял решение ввести в образовательный процесс академии такой вид учебного занятия, как индивидуальное контрольное собеседование. Очевидно, что выбору конкретного вида занятия должно предшествовать разделение в программе видов занятий проектируемой дисциплины на теоретическую и практическую части. Этому вопросу уже уделено внимание в данной статье при рассмотрении уровней обученности – «знать», «уметь», «владеть». Именно реализация указанных критериев позволит обоснованно определить теоретическую и практическую составляющие проектируемой дисциплины, соответственно определяются и виды учебных занятий.

Формирование у обучающихся теоретических основ универсальных, общепрофессиональных и профессионально-специализированных компетенций осуществляется прежде всего на лекциях. На лекционных занятиях рассматривается основное содержание учебной дисциплины, ее место и роль в предстоящей профессиональной деятельности выпускников, формируется представление о состоянии и тенденциях развития научной отрасли, перспективах развития техники, технологий и т. д. Лекции стимулируют познавательную деятельность обучающихся и формируют у них творческий стиль мышления.

Наряду с традиционными видами учебных занятий, по мнению автора, в качестве учебных занятий могут быть проектно-аналитические и проектно-инновационные сессии, форсайт-сессии, тренинги. Использование таких занятий особенно эффективным будет в системе повышения квалификации различных категорий педагогических работников.

При проведении занятий практической направленности необходимо использовать новые формы таких занятий: выездные занятия, проектные работы, мастерские, в военных вузах уже давно зарекомендовавшие себя так называемые ролевые игры: командно-штабные военные игры, командно-штабные учения, тактико-специальные учения, выполнение тактико-специальных заданий и др.

Высокая информационная насыщенность учебного материала, достаточно развитые познавательные способности обучающихся, опыт деятельности, в том числе образовательной, руководящей, специальной, требуют поиска новых форм, видов занятий и т. д. Использование вышеперечисленных видов практических занятий позволяет поставить обучающихся в условия, близкие к потенциальной профессиональной деятельности.

Творческий (индивидуальный) подход при проектировании рабочей программы учебной дисциплины также играет немаловажную роль при определении элементов текущего контроля, промежуточной аттестации (формирования фонда оценочных средств), при разработке методических указаний обучающимся по изучению предметного содержания учебной дисциплины, организации своей самостоятельной работы по подготовке к учебному занятию. Для преподавательского состава в программе представлены основные ориентиры по организации и методике проведения занятия, рекомендации по осуществлению процедур контроля качества усвоения учебного материала посредством как текущего контроля, так и промежуточной и итоговой аттестации. Разработчик учебной программы имеет право определять сроки и формы проведения такого важного этапа в осуществлении контроля качества усвоения знаний, как рубежный контроль. При диагностике образовательных достижений обучающихся в современной образовательной организации мало применяются инновационные методы диагностики, такие как анализ конкретных ситуаций, метод проектов, активные и деловые игры и др.

Вывод. Таким образом, по мнению автора, проектирование рабочей программы учебной дисциплины должно оптимальным образом сочетать как требования нормативных правовых

документов – безусловно обязательное и необходимое условие, так и творческий, индивидуальный подход, основанный на личном опыте, опыте кафедры и образовательной организации.

Список используемых источников

1. Об образовании в Российской Федерации : фед. закон № 273-ФЗ от 29.12.2012 (с изм. и доп., вступающими в силу с 1 февр. 2023 г.). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174 (дата обращения: 19.04.2023).
2. Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации : приказ министра обороны Российской Федерации от 30 мая 2023 года № 308. – URL: <http://base/garant.ru/404933517> (дата обращения: 30.04.2023)
3. Психология и педагогика высшей военной школы : учеб. пособие / Н. А. Репях [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 246 с.
4. Технологии профессионально ориентированного обучения : учеб. пособие / М. А. Голубев [и др.]; под ред. Н. С. Кужекина. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – 136 с.
5. Российская Федерация. Министерство обороны Российской Федерации. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Методические указания по разработке, утверждению и обновлению элементов основной профессиональной образовательной программы высшего образования (специалитет, магистратура) и среднего профессионального образования в соответствии с модернизированными федеральными государственными образовательными стандартами в Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского : приказ начальника ВКА им. А. Ф. Можайского от 27 марта 2020 г. № 315. – СПб., 2020. – 63 с.

Д. А. Соловьев,
кандидат технических наук, доцент

МОДЕЛЬ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНОВЛЕНИЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ВОЕННО-УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ, ПРОШЕДШЕГО ОБУЧЕНИЕ В АДЬЮНКТУРЕ

В статье рассмотрены проблемные вопросы профессионального становления преподавателей. Представлена модель программы дополнительной профессиональной программы выпускников адъюнктуры.

Ключевые слова: профессиональное становление преподавателя, подготовка преподавательского состава, модель программы профессионального становления преподавателей.

Качество подготовки офицеров Вооруженных сил Российской Федерации напрямую зависит от профессионализма профессорско-преподавательского состава вуза, в котором проходил обучение офицер. Преподаватель вуза – это главное действующее лицо в обучении и воспитании курсантов и слушателей.

Формирование профессорско-преподавательского состава высших учебных заведений Министерства обороны Российской Федерации, в том числе нашей академии, осуществляется из нескольких источников.

В настоящее время основными формами подготовки преподавательского состава является обучение в адъюнктуре академии и в системе дополнительного образования по программам профессиональной переподготовки к новому виду деятельности в сфере педагогики высшей школы.

О подготовке преподавательского состава написано немало монографий, учебных пособий, научных статей. Н. В. Кузьмина [1] предложила модель подготовки педагога, где основной акцент связан с индивидуальной педагогической деятельностью, которая приводит к овладению педагогическими умениями. Т. А. Вековцева [2] указывает, что профессиональному саморазвитию преподавателя способствует система содействия профессионального саморазвития, направленная на проектирование и осознание индивидуальной траектории профессионального саморазвития, прохождение которой позволяет достичь высокого уровня профессиональной деятельности. А. В. Барабанщиков и С. С. Муцынов [3] подчеркивали, что для преподавателя недостаточно «только таланта» для удачного проведения занятий. Они отметили необходимость овладеть методикой преподавания, эффективными методами обучения. Этому способствует только «любовь к педагогической деятельности». В. П. Демиденко, В. Г. Анисимов и В. А. Константинов [4] отмечают, что для повышения педагогического мастерства начинающих преподавателей, а также руководителей, назначенных на более высокие должности, во многих вузах созданы специальные двух- и трехмесячные курсы. Опыт функционирования таких курсов на базе ведущих вузов Министерства обороны Российской Федерации подтверждает целесообразность их существования. А для того, чтобы военные педагоги не отрывались от реальной жизни войск, практикуется хорошо апробированная система соответствующих стажировок преподавательского состава.

А. В. Барабанщиков и С. С. Муцынов [3] отмечали, что к основным психолого-педагогическим аспектам профессионального становления выпускника адъюнктуры как преподавателя относятся становление и развитие личности педагога, формирование педагогической деятельности и профессионального педагогического мышления.

Данные аспекты, отражающие разнообразные психологические качества преподавателя, имеют определенные механизмы и детерминанты, определяют условия дальнейшего развития.

Становление преподавателя как личности происходит в профессиональном педагогическом взаимодействии через межличностные отношения. Различные педагогические ситуации, сама деятельность и профессиональные отношения оказывают влияние на формирование личности начинающего преподавателя. К психологическим механизмам, позволяющим обеспечить развитие его социально-профессиональной позиции, следует отнести не только самопознание, определение ценностных ориентиров, но и прогнозирование, проектирование и принятие оптимальных и педагогически обоснованных решений в конкретных профессиональных ситуациях.

Профессиональное становление преподавателя предполагает развитие различных сторон личности, включающих как интеллектуальную и операционно-деятельную, так и эмоционально-волевую, духовно-нравственную стороны. Вместе с тем развитие профессионального сознания, самопознания и профессионально важных личностных качеств является существенной сферой развития личности преподавателя.

Становление профессиональной педагогической деятельности предполагает формирование у преподавателя профессиональных компетенций, развитие профессиональных знаний, умений и навыков, профессионального мастерства, стиля профессиональной педагогической деятельности.

Становление педагогического мышления, определяющего особенности познания и творческого преобразования действительности образовательного процесса, следует рассматривать как процесс решения проблемных ситуационных задач и формирования инновационного стиля мышления.

Организация необходимого сопровождения в профессиональном становлении преподавателя имеет важное значение. Существенной поддержкой преподавателю в данном процессе является не только самообразование и воспитание самого педагога, но в значительной степени – помощь старших и опытных коллег.

Сам процесс профессионального становления преподавателя должен носить исключительно гуманистический характер. Молодой педагог должен стать изначально «своим», а затем «равным» среди коллег.

Необходимо подчеркнуть, что и подготовленность преподавателя к профессиональной деятельности предполагает в ходе ее осуществления осмысленное воплощение гуманистической составляющей. Преподаватель должен быть готов взаимодействовать с обучающимися и видеть в каждом из них личность, учитывать уровень их подготовки, талантливость, самобытность [3].

Назначенные на должности профессорско-преподавательского состава офицеры, несмотря на прежнее служебное положение и возраст, могут не обладать необходимым уровнем знаний в предметной области психолого-педагогической подготовки для осуществления педагогического процесса, поэтому они должны пройти новый этап в своей жизни – этап профессионального становления в качестве преподавателей.

Под профессиональным становлением преподавателя прежде всего следует понимать организованный процесс профессионального совершенствования молодого педагога. Данный процесс осуществляется с целью развития профессиональной направленности начинающего преподавателя и формирования у него профессиональных компетенций, что позволит выработать личную систему педагогической деятельности.

Современная практика профессионального становления может быть представлена в виде модели, показанной на рис. 1.

После назначения выпускника адъюнктуры на профильную кафедру обучение проводится в системе профессионально-должностной подготовки и самообразования, по сути речь идет об известном двухлетнем плане профессионального становления преподавателя.



Рис. 1. Модель профессионального становления преподавателя

При назначении выпускников адъюнктуры на преподавательскую должность в соответствии с нормативными документами [5] в организациях обязаны обучать их в группе профессиональной переподготовки к новому виду деятельности в сфере педагогики высшей школы.

Наиболее предпочтительным является обучение в группе дополнительной профессиональной переподготовки к новому виду деятельности. В настоящее время в этой группе обучаются офицеры, которые назначаются на должности из войск, и учебные планы и программы учитывают специфику подготовки именно этой категории военнослужащих.

С 2022 года из программы адъюнктуры исключена психолого-педагогическая подготовка адъюнкта как преподавателя [6]. Формирование профессиональной педагогической компетенции у лиц, закончивших адъюнктуру, можно реализовать различными путями. В предлагаемой модели программы дополнительной профессиональной подготовки представлены два варианта (рис. 2).



Рис. 2. Структура программы дополнительной профессиональной подготовки

Первый вариант – обучение выпускников адъюнктуры, которые не защитили диссертацию. Их подготовку целесообразно осуществить в группе с офицерами, которые назначаются из войск.

Отличие офицеров, закончивших адъюнктуру, от офицеров, назначенных на воинские должности из войск, состоит в том, что в адъюнктуре уже получают знания и умения на профильной кафедре, участвуют в написании отчетов о научно-исследовательских работах,

в работе научных конференций и семинаров, вырабатывая методологию научной работы, воспитывая чувство ответственности за предназначение выпускников вуза, понимая проблемы, стоящие перед наукой и практикой в конкретной области знаний. Они на протяжении срока обучения в адъюнктуре уже вливаются в педагогический коллектив кафедры в процессе повседневной жизнедеятельности.

Второй вариант – выпускники адъюнктуры, которые защитили диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук и получили соответствующий диплом. Для данной группы, однородной в своем составе, с одним уровнем подготовки, может быть разработана собственная программа обучения и по срокам, и по содержанию. В том числе могут применяться сокращенные сроки обучения, обучение по индивидуальному плану, смешанные формы обучения и т. д. Современная нормативно-правовая база позволяет это реализовать.

Вариант программ, предложенный для данного вида подготовки, включает:

- психологию и педагогику высшей военной школы;
- педагогическую психологию;
- современные технологии профессионально ориентированного обучения.

Завершается обучение педагогической практикой в форме проведения пробного занятия.

Вывод. Предложенная модель программы дополнительной профессиональной подготовки позволит реализовать новый подход профессионального становления преподавателя, сохранить академические традиции по подготовке преподавателей, комплектовать кафедры подготовленными высококвалифицированными молодыми преподавателями при сокращении срока обучения.

Список используемых источников

1. Исследование гуманитарных систем / под ред. В. П. Бедерхановой; сост. А. А. Остапенко. – Краснодар : Парабеллум, 2013. – Вып. 1 : Теория педагогической системы Н. В. Кузьминой: генезис и следствия. – 90 с.
2. *Вековцева Т. А.* Система содействия профессиональному саморазвитию преподавателя вуза // Научно-педагогическое обозрение. – 2014. – Вып. 2. – С. 68–72.
3. *Барабанчиков А. В., Муцынов С. С.* Педагогическая культура преподавателя высшей военной школы. – М., 1985. – 169 с.
4. *Анисимов В. Г., Демиденко В. П., Константинов В. А.* Преподаватель военно-учебного заведения. О профессиональной деятельности преподавателя : моногр. – СПб. : МВАА, 2008. – 216 с.
5. Об организации деятельности адъюнктуры военных образовательных организаций высшего образования, организаций дополнительного профессионального образования и научных организаций, находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации : приказ Министра обороны Российской Федерации от 31.05.2022 г. № 309 // Гарант : справочно-правовая система РФ. – URL: <https://base.garant.ru>> (дата обращения: 05.03.2023).
6. Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации : приказ Министра обороны Российской Федерации от 30.05.2022 г. № 308 // Гарант : справочно-правовая система РФ. – URL: <https://base.garant.ru>> (дата обращения: 05.03.2023).

С. М. Беседин,
кандидат военных наук, доцент;
Р. Н. Галипанов;
М. А. Кукушкин,
кандидат военных наук;
Е. А. Поздеев

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАЗМЕЩЕНИЯ СРЕДСТВ МОБИЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

В статье предлагается методический подход к выбору районов размещения средств мобильных организационно-технических систем [ОТС (М)] с целью повышения эффективности выполнения ими задач по предназначению.

Использование методического подхода, разработанного авторами на основе выбора районов размещения средств мобильных организационно-технических систем, позволяет повысить эффективность их применения за счет выбора рационального варианта размещения средств ОТС (М) с целью максимального использования их возможностей.

Ключевые слова: район размещения, мобильные организационно-технические системы.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях важную роль играют мобильные организационно-технические системы [ОТС (М)] управления космическими аппаратами. В качестве мобильных организационно-технических систем в данной статье будем рассматривать подвижные наземные комплексы, предназначенные для управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ).

Вопросам повышения эффективности применения ОТС (М) посвящен ряд научных работ [1–5]. В статье [1] рассмотрены варианты маневрирования ОТС (М) в районе выполнения задач по предназначению. В статье [2] уделено внимание вопросам маскировки ОТС (М) при их маневрировании в районе выполнения задач по предназначению. Однако в указанных работах не учитывались вопросы определения районов размещения средств ОТС (М), при этом начальное или базовое размещение играет ключевую роль в ходе выполнения ОТС (М) целевых задач и может значительно повысить эффективность их применения. В данной статье предлагается методический подход к выбору рационального размещения средств ОТС (М), а также будут учтены такие факторы, как нахождение средств ОТС (М) в зонах радиовидимости, наличие развитой дорожной сети, равномерность распределения средств по площади и другие особенности размещения ОТС (М) на территории одного государства.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Подход к разработке методики выбора рационального варианта размещения средств ОТС (М) предлагается выполнить следующим образом.

Дано:

1) Требования к функционированию средств ОТС (М) в районе применения описываются следующими критериями:

- оперативностью проведения сеанса управления космическим аппаратом – $T^{CY} \leq T^{TP}$;
- ресурсоемкостью (количество средств ОТС (М), выполняющих задачи по предназначению: $R^{OTC(M)} \leq R^{TP}$);
- временем нахождения средств ОТС (М) в зоне радиовидимости КА ДЗЗ – $\tau^{OTC(M)} \leq \tau^{TP}$;
- удаленностью размещения средств ОТС (М) от населенных пунктов – $\rho^{OTC(M)} \leq \rho^{TP}$;
- другими факторами размещения ОТС (М) на территории одного государства – $p^{OTC(M)} \leq p^{TP}$.

2) Количество средств ОТС (М), выполняющих задачи по предназначению, описывается равенством

$$R^{OTC(BH)} = \{r_j^{OTC(BH)}, j = \overline{1, J}\}.$$

3) Множество площадей поверхности территории, на которой планируется размещение средств ОТС (М) – $\{x_{\xi}, y_{\xi}\}, \xi = \overline{1, \bar{S}}, f = \overline{1, \bar{F}},$ с учетом рельефа местности – $z_{\tilde{u}}, \tilde{u} = \overline{1, \bar{U}}.$

4) Множество объектов «дорожная сеть» в районе размещения ОТС (М) $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_{\zeta}\}$ представляет собой сеть автомобильных дорог с твердым и грунтовым покрытием, а также искусственные дорожные сооружения (зимники, мосты, переправы по льду, путепроводы, тоннели, эстакады и др.), где $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_{\zeta}$ – участки автомобильных дорог с твердым покрытием или участки грунтовых дорог.

5) Множество координат населенных пунктов – $\{x_{\tilde{z}}, y_{\tilde{z}}\}^{HP}.$

6) Множество координат, описывающих участки установленной границы размещения ОТС (М) с учетом их развертывания на территории одного государства, – $\{x_{\tilde{y}}, y_{\tilde{y}}\}^{GT}.$

7) Множество космических аппаратов, подлежащих управлению ОТС (М) – $\{K_y\} = \{k_m^{KA}, m = \overline{1, M}\}.$

8) Множество интервалов времени пролета космических аппаратов ($\{K_y\}$) в районах размещения ОТС (М) – $\{\Delta t_{\delta}\}.$

Сформулируем задачу следующим образом. Построим множество допустимых вариантов размещения средств ОТС (М) для выполнения задач по предназначению, описываемых равенством

$$\Omega = \{\omega_k | k = \overline{1, K}\}, \quad (1)$$

где $\omega_k = \langle r_k^{OTC(BH)}, H_k, \Delta k_k^{KA} t_{\delta k}, g_k^{OTC(M)}, p_k^{OTC(M)}, \{x_k, y_k\} \rangle.$

Для повышения эффективности применения ОТС (М) необходимо найти рациональный вариант размещения средств ОТС (М), удовлетворяющий следующему критерию:

$$\omega^* = \operatorname{argmax}_{\omega_k \in \Omega} P(\omega_k), \quad (2)$$

где P – количество проведенных сеансов управления космическими аппаратами, оцениваемыми ОТС (М), при ограничении

$$\begin{cases} R(\omega_k) \leq R^{TP}; \\ T(\omega_k) \leq T^{TP}. \end{cases} \quad (3)$$

Допущения, принимаемые при разработке методики, включают следующие условия:

- 1) средства ОТС (М) размещаются в заданных границах, описываемых координатами – $\{x_{\tilde{y}}, y_{\tilde{y}}\}^{GT};$
- 2) средства ОТС (М) перемещаются только по дорожной сети;
- 3) тактико-технические характеристики средств ОТС (М) позволяют управлять всеми КА ДЗЗ.

В рамках методического подхода требуется разработать методику выбора рационального варианта размещения средств мобильных организационно-технических систем, для чего необходимо:

- обосновать достаточность используемых исходных данных;
- провести моделирование вариантов размещения средств ОТС (М) с учетом наличия развитой дорожной сети, равномерного распределения средств ОТС (М) по площади, а также близости к населенным пунктам и других особенностей размещения на территории Российской Федерации, а также оценку этих вариантов решений;
- построить множество допустимых вариантов размещения средств ОТС (М);
- осуществить выбор рационального варианта размещения средств ОТС (М).

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАЗМЕЩЕНИЯ СРЕДСТВ МОБИЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Структура методики выбора рационального варианта размещения средств ОТС (М) представлена на рис. 1.

Шаг 1. Задаются требования к процессу применения ОТС (М) по ресурсоемкости – ($R(\omega_k) \leq R^{TP}$) и оперативности проведения СУ КА ДЗЗ – ($T(\omega_k) \leq T^{TP}$).

Шаг 2. На этом шаге происходит формирование исходных данных:

- 1) множество участков местности, на которых планируется размещение средств ОТС (М),
 $\{x_{\xi}, y_{\xi}\}, \xi = \overline{1, \Xi}, \xi = \overline{1, \Xi}$

с учетом рельефа местности

$$z_{\tilde{u}}, \{\tilde{u} = \overline{1, \tilde{U}}\};$$

- 2) множество средств ОТС (М)

$$N^{OTS(BH)};$$

- 3) множество сеансов управления назначенными космическими аппаратами

$$\{S_v\} = \{S_{vq}, q = \overline{1, Q}\};$$

- 4) множество космических аппаратов, с которыми запланировано проведение СУ КА,

$$\{L_i\} = \{L_i^{KA}, i = \overline{1, I}\};$$

- 5) множество высот орбит космических аппаратов

$$\{(L_i)\} = \{H_n, n = \overline{1, N}\};$$

- 6) множество координат населенных пунктов

$$\{x_{\xi}, y_{\xi}\}^{HP};$$

- 7) множество координат, описывающих участки заданной границы размещения ОТС (М),

$$\{x_{\gamma}, y_{\gamma}\}^{\Gamma};$$

- 8) множество объектов «дорожная сеть» в районе размещения средств ОТС (М)

$$\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_c\}.$$

Шаг 3. Осуществляется равномерное распределение средств ОТС (М) на участках местности ($z_{\tilde{u}}, \tilde{u} = \overline{1, \tilde{U}}$) с помощью метода Неймана [7–10]:

3.1 Задаются участки местности – $\{x_{\xi}, y_{\xi}\}$ и высоты с учетом рельефа местности – $z_{\tilde{u}}, \tilde{u} = \overline{1, \tilde{U}}$ параметрическими уравнениями: $x = x_{\xi}(u, v), y = y_{\xi}(u, v), z = z_{\tilde{u}}(u, v)$ на области $D = \{u_1 \leq u \leq u_2; v_1 \leq v \leq v_2\}$.

3.2 Определяется максимальное значение функции $f(u, v)$ на области $D = \{u_1 \leq u \leq u_2; v_1 \leq v \leq v_2\} \rightarrow \max_D f(u, v)$.

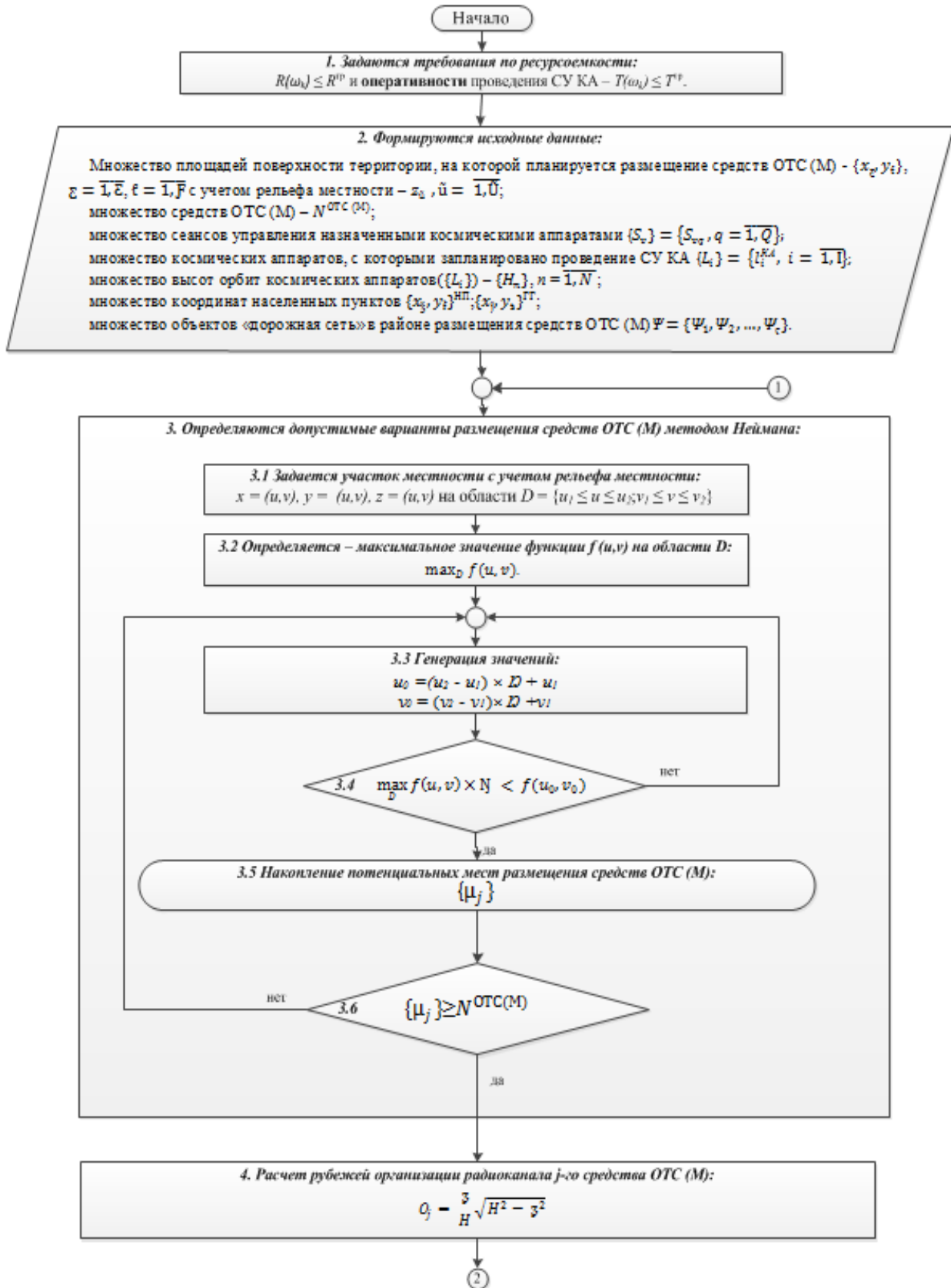


Рис. 1. Методика выбора рационального способа размещения средств ОТС (М) (начало)

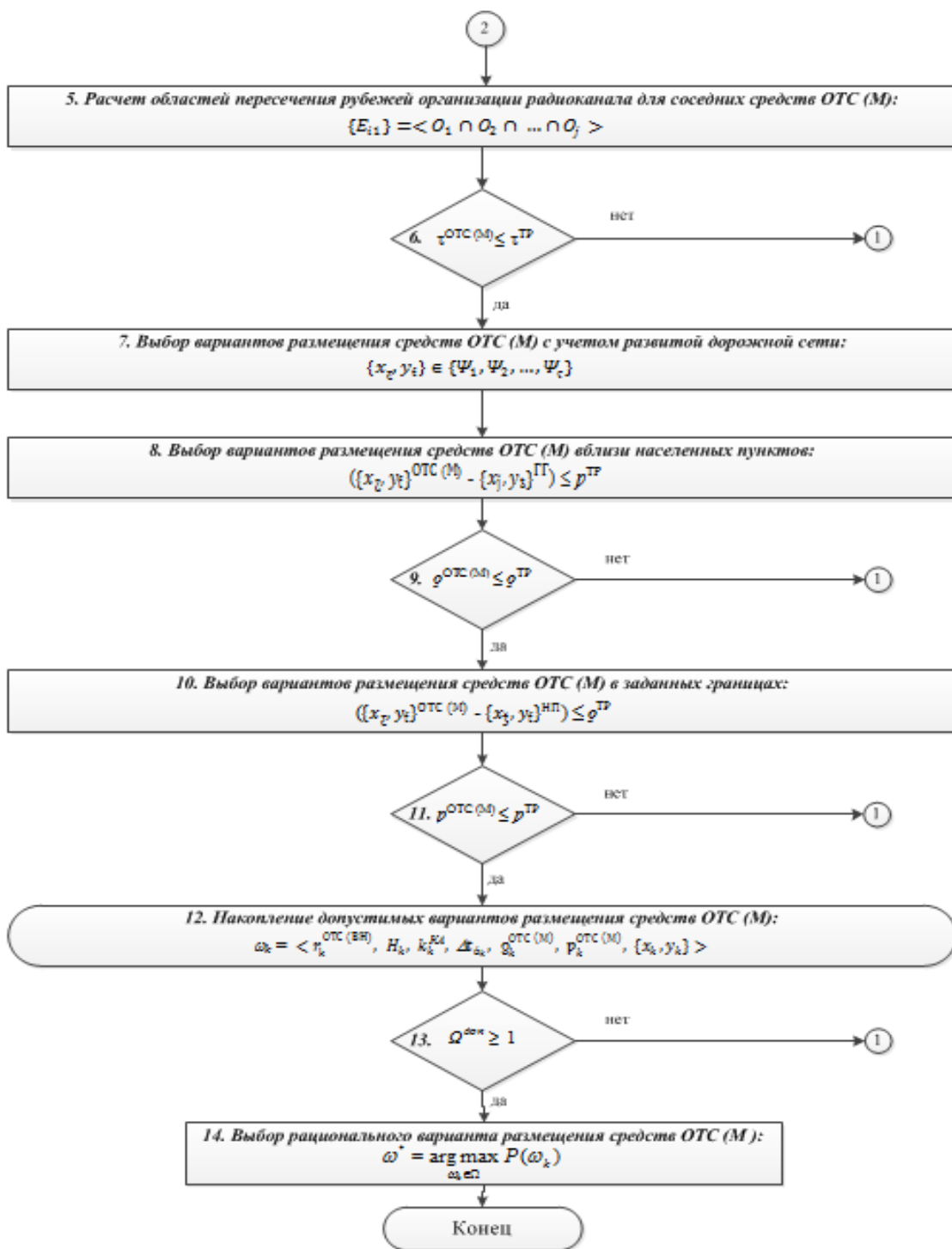


Рис. 1. Методика выбора рационального способа размещения средств ОТС (M) (окончание)

3.3 Генерируются числа $u_0 = (u_2 - u_1) \times D + u_1$, $v_0 = (v_2 - v_1) \times D + v_1$, где D – эталонный генератор случайного числа с равномерным распределением на интервале (0,1).

3.4 Повторяются действия 3-4 раза, и осуществляется накопление множества потенциальных мест размещения – $\{\mu_j\}$.

3.5 Происходит проверка соотношения числа мест размещения средств ОТС (М) – $\{x_e, y_f\}$ с количеством средств ОТС (М) – $N^{\text{ОТС (М)}} - N^{\{x_e, y_f\}} \geq N^{\text{ОТС (М)}}$. В случае выполнения условия переходим на шаг 4, в противном случае – на шаг 3.3 и продолжаем генерировать варианты.

Шаг 4. Осуществляется расчет районов организации радиоканала для КА, функционирующих в ближней операционной космической области (O_j), для каждого места размещения средств ОТС (М):

$$O_j = \frac{3}{H} \sqrt{H^2 - \xi^2}, \quad (4)$$

где ξ – радиус Земли;

H – высота орбиты КА.

Шаг 5. Рассчитываются области пересечения зон радиовидимости для соседних средств ОТС (М):

$$\{E_{i1}\} = \langle O_1 \cap O_2 \cap \dots \cap O_j \rangle. \quad (5)$$

Шаг 6. Проверяется условие соответствия возможности управления для всех средств ОТС (М) всеми назначенными КА ДЗЗ – $\tau^{\text{ОТС (М)}} \leq \tau^{\text{ТР}}$. В случае невыполнения условия возвращаемся на шаг 3 для поиска новых потенциальных мест размещения средств ОТС (М). При выполнении условия переходим к шагу 7.

Шаг 7. Определяются варианты размещения средств ОТС (М) с учетом наличия развитой дорожной сети:

$$\{x_e, y_f\} \in \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_\zeta\}. \quad (6)$$

Шаг 8. Определяются варианты размещения средств ОТС (М) вблизи населенных пунктов, в которых развита инфраструктура жизнедеятельности:

$$\{\{x_e, y_f\}^{\text{ОТС (М)}} - \{x_\zeta, y_\zeta\}^{\text{НП}}\} \leq \rho^{\text{ТР}}, \quad (7)$$

где $\{x_e, y_f\}^{\text{ОТС (М)}}$ – множество координат потенциальных мест размещения средств ОТС (М);

$\{x_\zeta, y_\zeta\}^{\text{НП}}$ – множество координат населенных пунктов.

Шаг 9. Проверяется условие $\rho^{\text{ОТС (М)}} \leq \rho^{\text{ТР}}$ (все средства размещены вблизи населенных пунктов?). В случае его выполнения переходим на шаг 10. В противном случае – возвращаемся на шаг 3.

Шаг 10. Определяются варианты размещения средств ОТС (М) с учетом особенностей размещения на территории одного государства, с целью обеспечения электромагнитной совместимости:

$$\{\{x_e, y_f\}^{\text{ОТС (М)}} - \{x_j, y_s\}^{\text{ГГ}}\} \leq \rho^{\text{ТР}}, \quad (8)$$

где $\{x_e, y_f\}^{\text{ОТС (М)}}$ – множество координат потенциальных мест размещения средств ОТС (М);

$\{x_j, y_s\}^{\text{ГГ}}$ – множество координат, описывающих координаты предельно возможной территории одного государства, предназначенной для размещения ОТС (М).

Шаг 11. Проверяется условие: соблюдение требуемого расстояния нахождения средств ОТС (М) до границ одного государства, предназначенного для размещения ОТС (М) – $\rho^{\text{ОТС (М)}} \leq \rho^{\text{ТР}}$.

Шаг 12. Происходит накопление допустимых вариантов размещения средств ОТС (М) для выполнения задач по предназначению – $\Omega_{\text{доп}} = \{\omega_k | k = \overline{1, K}\}$, где каждый k -й способ включает $\omega_k = \langle r_k^{\text{ОТС (ВН)}}, H_k, k_k^{\text{КА}}, \Delta t_{\text{ок}}, g_k^{\text{ОТС (М)}}, p_k^{\text{ОТС (М)}}, \{x_k, y_k\} \rangle$.

Шаг 13. Проверяется условие ($\Omega_{\text{доп}} \geq 1$) – получилось ли сформировать хотя бы один удовлетворяющий критерию вариант размещения всех средств ОТС (М). В случае невыполне-

ния условия производится изменение исходных данных – переход на шаг 3, в случае выполнения – переход на шаг 14.

Шаг 14. Происходит выбор рационального варианта размещения средств ОТС (М), соответствующего максимальному значению результативности применения средств ОТС (М) – количеству выполненных сеансов управления в заданный интервал времени

$$\omega^* = \operatorname{argmax}_{\omega_k \in \Omega} P(\omega_k).$$

С помощью предложенного математического аппарата проведено оценивание целевого показателя (P) – количества проведенных сеансов управления ОТС (М) в зависимости от количества средств ОТС (М) – $N^{\text{ОТС (ВН)}}$, с учетом выбранных вариантов размещения средств мобильных организационно-технических систем – (ω_k), что представлено на рис. 2.

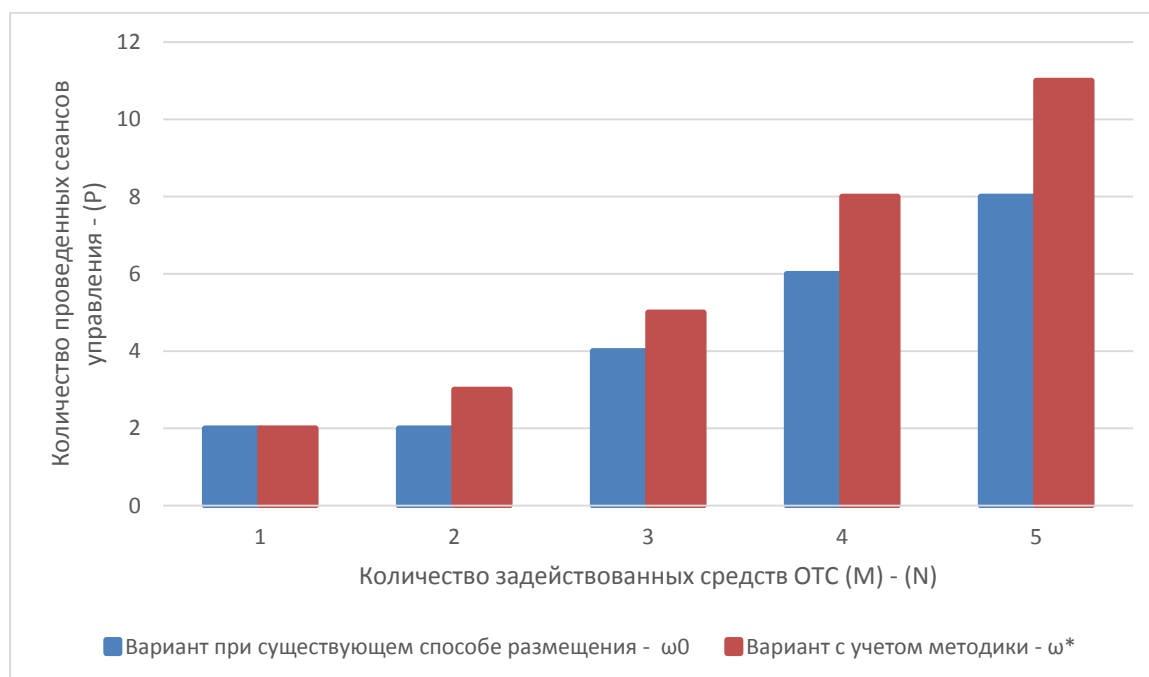


Рис. 2. Зависимость количества проведенных сеансов управления от задействованных средств ОТС (М) с учетом выбранных вариантов размещения средств ОТС (М)

Представленная на рис. 2 зависимость показывает, что у вариантов размещения средств мобильных организационно-технических систем, полученных с применением представленного авторами математического аппарата, целевой показатель – количество проведенных сеансов управления – выше, чем у вариантов, где предлагаемая методика не применялась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение представленного авторами методического подхода позволяет получить рациональные варианты размещения средств ОТС (М) с целью обеспечения максимальной эффективности их применения. Это позволит лицам, принимающим решение, получить научно обоснованные рекомендации по организации выполнения целевых задач мобильными средствами ОТС (М) управления космическими аппаратами.

Список используемых источников

1. Методический подход к выработке решения командиром в ходе оперативного управления подвижными организационно-техническими системами военного назначения в условиях динамически изменяющейся обстановки / М. А. Кукушкин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 679. – С. 16–26.
2. *Казахов Б. Д., Попов Д. М.* Методика обоснования рационального способа маневренных действий тактического воинского формирования // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 673. – С. 285–291.
3. Методика расчета показателей эффективности системы управления полетом космических аппаратов / И. Н. Пантелеймонов [и др.] // Известия высших учебных заведений. – 2019. – № 11. – С. 55–65. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-11-55-65.
4. *Маслов В. П.* Методика определения маршрутов с учетом тактических свойств местности и времени начала движения по ним подразделений // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 676. – С. 324–335.
5. *Казахов Б. Д., Марченко М. В., Петухов А. М.* Особенности управления организационно-технической системой военного назначения при воздействии дестабилизирующих факторов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 678. – С. 17–22.
6. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/200083020> (дата обращения: 20.02.2023).
7. *Вентцель Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М. : Наука, 1988. – 208 с.
8. *Вентцель Е. С.* Исследование операций. – М. : Сов. радио, 1972. – 552 с.
9. *Rubinstein R.Y., Kroese D.P.* Simulation and the Monte Carlo methods. Second Edition. – Wiley-Intersciens, 2007. – 345 p.
10. *Tysmansa T., Adriaenssens S., Wastiels J.* Form finding methodology for force-modelled antitlastic shells in glass fibre textile reinforced cement composites // Engineering Structures. – 2011. – Vol. 33. – P. 2603–2611.

Increasing the resolution of the radar station by extrapolating the amplitude-phase distribution at the antenna opening by linear prediction method / A. P. Alyoshkin, V. V. Vladimirov, P. V. Savochkin, A. A. Strona, A. V. Chestnych // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 6–16.

A method for improving the technical characteristics of short-wave radar stations (radars) operating in a complex phono-target environment is considered. The possibility of using linear extrapolation of the amplitude-phase distribution on the antenna array in the problem of increasing the resolution of the radar in azimuth is shown. Statistical modeling was performed to illustrate the effectiveness of the proposed solution based on the presented expressions. The analysis of the obtained results is carried out on the example of situational group observation of air objects.

Key words: shortwave station, radiation pattern, antenna array, amplitude-phase distribution, resolution, azimuthal sweep, super-resolution method, complex amplitudes.

Voznuk V. V., Sirotin I. N. Method for determining the coordinates of sources of unintentional interference in outer space for ground subscriber terminals of satellite communication systems when solving electromagnetic compatibility problems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 17–26.

A method is proposed for determining the coordinates of sources of unintentional interference (SUI) in outer space for user terminals of domestic satellite communication systems. A satellite repeater with direct transfer of the signal spectrum is considered as an SUI. To implement the method, four transmitters are used, located on the earth's surface and emitting reference signals in the direction of the intended SUI, as well as a radio monitoring point for receiving reference signals re-radiated in the direction of the Earth. To determine the coordinates of the SUI, the difference-range-measuring method is used.

Simulation modeling and analysis of the accuracy of the considered method for determining the coordinates of the SUI in outer space for user terminals systems of domestic satellite communications were carried out for various options for the location of reference signal transmitters and radio monitoring point, taking into account inaccurate data on their location.

Key words: source of unintentional interference, radio monitoring, electromagnetic compatibility.

Prospects for the use of radio interferometric means in the interests of Earth remote sensing space systems / D. A. Gavrilov, K. K. Zubarev, I. V. Sahnov, I. F. Surkis // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 27–37.

The principles are considered and the possibility of using the technology based on radio interferometry with very-long baselines to improve the accuracy of navigation and ballistic support of Earth remote sensing space systems is evaluated.

Key words: radio interferometry with very-long baselines, Earth remote sensing.

Method of measuring the effective scattering area of radar objects with ultra-low reflection levels / V. S. Gribkov, S. V. Kovalev, S. M. Nesterov, I. A. Skorodumov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 38–43.

The process of formation and the principle of operation of linear equidistant and non-equidistant lattices are considered. A method is proposed for measuring the effective scattering area of radar objects with ultra-low reflection levels by increasing the signal-to-background ratio using linear non-equidistant arrays whose size is limited by the space of the measuring field. The method is suitable for practical use on polygon-type measuring complexes and anechoic chambers.

Key words: effective scattering area, linear non-equidistant array, radar object, high-precision measurements.

Evseev V. I., Lazutin R. Y., Shulzhenko A. V. Calculation of characteristics of antenna systems for earth remote sensing radar systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 44–51.

The article presents the basic requirements for the radiation characteristics of antenna systems of with a synthetic aperture radar. The principle of formation and control of the radiation pattern of active phased arrays is presented. The radiation characteristics were calculated for various amplitude-phase distributions at the antenna aperture, ensuring the achievement of the required target indicators under various radar observation conditions.

Key words: synthetic aperture radar, active phased array, antenna radiation pattern, amplitude-phase distribution, radiometric artifacts.

Koshkarov A. S., Maltsev G. N. Analysis of isoplanatism of ground-based optical systems using atmospheric models // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 52–59.

Using the Hafnagel-Valey model of the high-altitude profile of atmospheric refractive index fluctuations, the influence of various layers of atmospheric turbulence on the isoplanatism of terrestrial optical systems and the anisoplanatism error during adaptive correction of atmospheric phase distortions is investigated. It is shown that there is approximately the same effect of different layers of atmospheric turbulence on the magnitude of the isoplanatism angle of the optical system. The conditions for correcting the anisoplanatism error in multi-conjugate adaptive correction of atmospheric phase distortions in terrestrial optoelectronic systems are determined.

Key words: ground-based optical systems, adaptive correction of atmospheric distortions, isoplanatism, atmospheric model, high-altitude turbulence profile.

Parshin M. S., Shaldaev S. E. Correction of distortion of polarization measurements of a polarimetric broadband active phased array antenna // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 60–71.

A method is proposed for correcting polarization distortions of a polarimetric broadband active phased array antenna resulting from the imperfection of the vector amplitude-phase frequency response of each emitter, as well as errors in their position and orientation. When modeling the probing process, the transfer functions of elements and processes are presented in the form of block matrices. The use of block matrices allows you to store and use information about the polarization characteristics of the radio frequency path. Polarization calibration is carried out for each individual emitter from the FAR antenna module. When obtaining correction coefficient, the Moore-Penrose pseudo-circulation is applied over the matrices of partial calibration signals.

Key words: polarimetric measurements, radar, scattering matrix, active phased array antenna, polarization calibration.

Application of meteorological radiosonde shells with suspended vision equipment / M. I. Andreichenko, A. V. Bessalov, D. V. Kushnarev, A. S. Timoshchuk // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 72–80.

The article presents the results of studies of the possibility of using radiosonde shells to lift the vision equipment into the atmosphere to the required height using the example of a course camera (FPV) for observing the underlying surface. Recommendations are given on the use of technical means from the composition of radar mobile meteorological complexes for launching radiosonde shells equipped with vision equipment.

Key words: meteorological radiosonde shells, vision equipment, radar mobile meteorological complex.

Astapovich A. V., Kunichkin D. A. A model of coordinate transformation in a local area based on multiple regression of differential distortions of coordinate space 1942 // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 81–89.

The article, from the perspective of multivariate regression of coordinate discrepancies of combined points, describes a model of transformation between the global and reference coordinate systems. The necessary formulas are given for calculating the parameters of the multivariate regression model of differential distortions of the SK-42 coordinate space and estimating residual coordinate discrepancies in the local region. The algorithm for estimating differential coordinate distortions was tested for the territory of Yakutia using data from catalogs of geodetic points SK-42 and materials from engineering geodetic surveys to create a frame geodetic network using satellite methods of space geodesy in a local area. Experimental testing showed that the use of a multivariate regression model of coordinate residuals makes it possible to take into account differential distortions of the SK-42 coordinate space with the accuracy required for troops.

Key words: global transformation parameters, differential coordinate distortions, multivariate regression, orthogonal coordinate transformations.

Galkin F. A., Philippskikh E. E. Radar images of typical vegetation in the centimeter wavelength range calculating model in relation to sensors with high resolution // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 90–102.

The article describes a radar images of typical vegetation in the centimeter wavelength range (3.4 cm) calculating model in relation to sensors with high resolution (1.4 x 2.1 m). Within the framework of the model developed by the authors, based on the results of the analysis of full-scale (experimental) data of the synthesized aperture radar station «Compact-100» (JSC «Science research institute of precision instruments») in terms of determining the statistical and correlation properties of typical vegetation in the microwave range, a generator of fluctuation matrices of readings of the brightness of the radar of vegetation covers (low-growing meadow, mixed forest) is proposed for practical use.

Key words: calculation model, radar images, typical vegetation, fluctuations of reflected signals, statistical and correlation properties of brightness readings.

Pilkevich S. V. Classification of computer attacks using machine learning models // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 103–120.

The analysis of publications on stealing machine learning models and defences. The problem of terminological disunity characteristic of the subject area under consideration is touched upon. The classification of model theft attacks is presented with a sufficiently detailed description of the measures implemented by the violator, which constitute the essence of destructive actions aimed at stealing the artificial intelligence (machine learning) model. The article concludes with a comprehensive taxonomy of model stealing defences, in the form of a "guide for the violator". This makes it possible to predict possible illegal actions and build an architecture of a layered protection system that blocks the violator's access to the protected information and ensures the safety of the machine learning model.

Key words: artificial intelligence, attack, machine learning, model extraction, model stealing, neural networks.

Modeling of heat reuse of exhaust gases of diesel engines of autonomous power supply sources of military infrastructure facilities / D. R. Absalyamov, R. A. Mosyagin, R. R. Halmetov, A. N. Shiyan // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 121–128.

The features of modeling the reuse of heat from exhaust gases of diesel engines from autonomous power supply sources are considered. An analysis of a number of models of diesel subsystems involved in the repeated conversion and utilization of exhaust gas heat was carried out. The results of numerical modeling were used in the design of an external recycling system for heating the equipment compartment and office premises of the JVI command post with 12CHN18/20. At the same time, the design of the recovery heat exchanger was optimized for heat transfer and hydraulic resistance, and its performance was tested in laboratory conditions on a stationary engine. The developed mathematical model and numerical modeling method allow, in the described range of parameters, to calculate with a sufficient degree of accuracy the heat transfer and resistance of the cooled section of the engine exhaust system and determine the required utilization heating surface of the heat exchanger

Key words: mathematical modeling, heat recovery, exhaust gases, diesel engines, autonomous power supply sources, military infrastructure facilities.

Thermal condition of the cylinder piston group of diesel engines of autonomous power supply sources of military infrastructure facilities at elevated ambient temperatures / D. R. Absalyamov, R. A. Mosyagin, R. R. Halmetov, A. N. Shiyan // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 129–135.

The results of studies on the influence of ambient temperature on the thermal state of the CPG of diesel engines carried out by the experimental and calculation method on diesel engines 12CHN 18/20 (M787B) and 8CHN 13/14 (YaMZ-7511.10) autonomous sources on factory test benches are presented. During the experimental study, along with thermomentering of the CPG parts, the engine operating process was indicated, the thermal balance was taken, etc. The results of the study made it possible to establish the amount of reduction in the rated power of the 12CHN 18/20 (M787B) diesel engine of an autonomous source of HVI when operating at elevated temperatures $T_a = 313$ K, provided that the temperature level at the bottom of the cylinder cover will not exceed the temperature level in mode $P_e = 883$ kW ($p = 750$ min⁻¹) at $T_a = 293$ K. The results of the studies performed can be used to calculate the temperature level in the walls of CPG parts of a wide class of both stationary and transport diesel engines, while ensuring satisfactory convergence of calculation results with experimental data.

Key words: thermal state, cylinder-piston group, autonomous power supply sources, diesel generator set, temperature.

Alekseev V. F., Morozov E. B. Methodology for constructing a test site for standardizing gravimetric instruments on a moving base // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 136–141.

Proposes a technique for creating a gravimetric test site for standardizing instruments and providing measurements of gravity, both on a static and moving base. The technique offers: an assessment of the spectral structure of the gravitational field in the area of the reference test site; a determination of the required discreteness of reference gravimetric network points; the procedure for performing measurements at points of a special test site; a method for mathematical processing of measurement results using a parametric adjustment method.

Key words: gravimetric test site, gravitational field, gravimetric measurements.

Assessment of the efficiency of the operation process of a space rocket complex by the method of hierarchical decomposition / A. V. Antropova, V. V. Kozlov, A. V. Lagun, V. A. Kharchenko // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 142–151.

The main provisions for the formation of a system for assessing the efficiency properties of the functioning processes of a space rocket complex and its efficiency indicator by the hierarchical decomposition method based on the theory of fractals, semantics, morphological analysis and dimensional analysis are presented. The proposed evaluation system basically contains a vector of efficiency properties, which has four vectors as arguments: a vector of indicators of the goals of the complex, a vector of indicators resource consumption, a vector of time indicators and a vector of indicators of information and intellectual support of the complex. The article also proposes another alternative to solve the problem of aggregating a vector indicator. This alternative is based on the results of scientifically substantiated solutions in the field of differentiable variety of vector spaces, which make it possible to obtain a unique differential structure of an assessment system for a multidimensional vector space.

Key words: conceptual model, assessment system, fractal hierarchy, semantics, convolution of indicators, vector of indicators, aggregation, appearance of the complex, space rocket complex.

Boldyrev K. B., Karchin A. Y., Petukhov A. I. Justification of alternative technical solutions to improve energy mass characteristics of ultra-light class launch rockets // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 152–158.

The article presents the results of a study of problematic issues of improving the energy and mass characteristics of ultra-light launch vehicles (ULG LV). Based on the result of the analysis, a list of technical and economic features that from the appearance of a promising ultra-light launch vehicle has been systematized. The main features are considered: salvage of launch vehicle elements, use of alternative fuel supply systems, use of modern materials and additive technologies. An analysis of possible technical solutions for each feature was carried out, key design solutions were identified parameters that determine the effectiveness of adopted technical solutions.

Key words: launch vehicle, recovery system for rocket block elements, payload, electric pump unit, displacement fuel supply system, additive technologies, carbon.

Boldyrev K. B., Karchin A. Y., Petukhov A. I. Substantiation of the requirements for the geometric parameters of the fins of the wafer shells of the carrier fuel tanks of rocket blocks // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 159–165.

The article presents a comparative analysis of the load-bearing capacity parameters of fuel tank shells in rocket stages, which are cylindrical, reinforced thin-walled shells. The study is dedicated to determining the optimal parameters of the reinforced shells of fuel tanks in design elements, with the aim of minimizing the passive mass of rocket stages that are part of space-bound rockets.

Key words: rocket stage, fuel tank, load-bearing capacity, structural assembly, mass optimality.

Method for prediction of zones of damage to space vehicles as a result of collision with space debris / M. Y. Bulekbaeva, P. S. Goncharov, M. V. Zhitnyy, L. P. Zozulya // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 166–172.

A method is presented for predicting spacecraft damage zones resulting from collisions with space debris. The method is based on a mathematical model for determining the coordinates of points of fragments formed as a result of the destruction of a man-made space object on a plane

perpendicular to the plane of the orbit for a given fragment of space debris and passing through the center of mass of a spacecraft with which a collision of the considered fragment is possible.

Key words: spacecraft, spherical segment, rotation matrix, technogenic fragment, space debris.

A problem has been identified in the need to find a solution that will increase the stability of the system for operating ground-based space infrastructure objects to resist disturbing factors / R. M. Vivchar, E. N. Esipov, A. V. Pachin, D. V. Reshetnikov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 173–186.

A methodology for substantiating a sustainable solution for managing the operation of the system for operating ground-based space infrastructure facilities, as well as its description, is presented. An approach is described for finding a solution that ensures the stability of the operation of the system for operating ground-based space infrastructure objects, which consists in finding the centroid of the region of acceptable values of the probability of promptly performing a given number of launches of space rockets at certain costs.

Key words: operation system, ground-based space infrastructure objects, solution, centroid, stability.

The method for calculating the control program of a spacecraft with power unit of limited traction for solving interorbital transfers / V. I. Gorbulin, P. V. Gorbulin, E. V. Kotyashov, V. A. Chernyavskiy // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 187–196.

In this study, an initial approximation obtained using an eighth-degree polynomial is used to find a solution for the interorbital transfer problem with limited thrust. Numerical investigations have shown that the method formed based on the obtained solution allows for reducing the spacecraft maneuver time, its characteristic velocity expenditure, and specifying the reachable region of the spacecraft.

Key words: spacecraft, interorbital transfers, limited traction.

Gorin V. A., Karagodin V. V., Homich I. V. Substantiation of the structure and optimization of the parameters of the automatic excitation controller a synchronous generator // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 197–201.

At present, the requirements for the reliability of power supply systems and the quality of electricity in all modes of their operation are increasingly increasing. Given the insufficient level of reliability of external power supply systems, it is not possible to guarantee the fulfillment of tasks by ground complexes for their intended purpose without the use of autonomous (backup) power supply systems. In this regard, the system for automatic control of the excitation of a generator operating in an autonomous power supply system must have high speed, must have adaptability properties and provide the required quality of electricity. Using a neural network model of the power supply system will solve this problem.

Key words: automatic excitation control system, autonomous power supply system, PID controller, parameter setting.

Kamchalov S. S., Karagodin V. V., Rybakov D. V. A systematic approach to substantiation of directions for improving the power supply systems for special objects of the space forces // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 202–207.

Power supply systems for special objects of the Space Forces are mostly operated in conditions of exceeding the established deadlines. Currently, at the state level, several scenarios for the development of the country's electric power industry are being considered, which are aimed at

increasing the observability and controllability of electric power systems based on the use of modern.

IT technologies. Under these conditions, it is necessary to justify the directions for improving the power supply systems of special facilities that are in operation, taking into account, on the one hand, modern trends in the development of electrical networks, and on the other hand, the features of the functioning of special facilities. Proceeding from the fact that the power supply systems of special objects are complex systems of the cybernetic type, the article considers the directions for their improvement, based on the application of a systematic approach.

Key words: special object, power supply system, development directions, system approach, system state management.

Karagodin V. V., Rybakov V. V., Rybakov D. V. Metod for controlling the operation mode of a transformer substation of the power supply system of an object with a sharply variable load // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 208–214.

One of the main indicators of the technical condition and level of operation of power supply systems is the level of reported losses of electricity in electrical networks. The article substantiates the relevance of their reduction, considers a method for controlling the operation mode of a transformer substation of an object with a sharply variable load. The method is based on the adaptation of the structure of transformer substations to the operating modes of consumers of such objects, which will significantly reduce the loss of electrical energy in existing power supply systems without changing the composition and type of equipment.

Key words: power supply systems, transformer substation, load factor, electrical energy losses.

Lebedev E. L., Savchuk S. P. Fatigue resistance of aluminum alloy D16 in the presence of a stress concentrator // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 215–225.

The results of mechanical tests of an aluminum heat – resistant alloy under alternating load conditions are presented. A feature of the research is the presence of a stress concentrator and different rates of deformation of the samples under study. It is shown that the process of fatigue failure under these conditions is explained by the competition of two processes: on the one hand, the formation of fracture surfaces, on the other, plastic deformation at the crack mouth (stress concentrator). As the strain rate increases, the formation of fracture surfaces predominates. This explains the intense branching of cracks and the higher value of the constant endurance of the alloy under study.

Key words: stress concentrator, fatigue test, aluminum alloy, strain rate.

Dyachenko V. N., Kazko A. A., Kuzmicheva I. V. Research of types of digital literacy among students in a military educational institution // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 226–233.

The article presents the results of a study conducted to determine the type and assess the levels of digital literacy of the Academy's cadets as competencies significant condition for the implementation of their educational and daily activities

Key words: military educational institution; educational activities; electronic information and educational environment; students; digital literacy.

Musienko S. A. Technology of development of the work program of the discipline: the unity of legal norms and creativity // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 234–240.

The publication discusses the current problems of developing technologies for designing the educational process. Attention is focused on the dialectical unity in this process of educational law, pedagogical norms and creativity. The author substantiates the ways of designing the work program, the content of the levels of training and the necessary time to achieve them. Special attention is paid to the teaching techniques, the definition of which determines the main types of training sessions, as well as methodological recommendations to teachers, instructions to students and evaluation procedures.

Key words: education, educational law, legal norms, creativity, work program of an academic discipline, methods of designing a work program, competencies, indicators of the level of training, learning technologies, lectures, practical orientation classes.

Solovjev D. A. Model of the professional development for a teacher undergone postgraduate training at military educational institution // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 241–244.

The article discusses problematic issues of professional development of teachers. A model for an additional professional program for adjuncts graduates is presented.

Key words: professional development of a teacher, training of teaching staff, model of professional development of teachers.

Justification for the choice of a rational option for placement of mobile organizational and technical systems for space vehicle control / S. M. Besedin, R. N. Galipanov, M. A. Kukushkin, E. A. Pozdeev // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 689. – P. 245–252.

The article proposes a methodological approach to the selection of areas for placing mobile organizational and technical systems (hereinafter referred to as OTS (M)) in order to increase the efficiency of their performance of their intended tasks.

The use of a methodological approach developed by the authors based on the selection of areas for placing mobile organizational and technical systems allows increasing the efficiency of application by choosing a rational option for placing OTS (M) funds in order to maximize the use of their capabilities.

Key words: location area, mobile organizational and technical systems.

Абсалямов Дамир Расимович, доктор технических наук, доцент; 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); e-mail: vka@mil.ru

Алёшкин Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Андрейченко Максим Игоревич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka@mil.ru

Антропова Александра Владимировна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Астапович Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Беседин Сергей Михайлович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-72, e-mail: vka@mil.ru

Бессалов Александр Витальевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Болдырев Константин Борисович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Булекбаева Марина Юрьевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8(812) 347-97-19; e-mail: vka@mil.ru

Вивчарь Роман Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Владимиров Владислав Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Вознюк Валерий Васильевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Гаврилов Денис Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-33, e-mail: vka@mil.ru

Галипанов Руслан Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-72, e-mail: vka@mil.ru

Галкин Федор Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21, e-mail: vka@mil.ru

Гончаров Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19; 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); e-mail: vka@mil.ru

Горбулин Павел Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Горин Вадим Александрович, 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

Грибков Виталий Сергеевич, кандидат технических наук; ЦНИИ ВКС Минобороны России (170026, Россия, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 32); тел.: 8 (482) 255-88-29, e-mail: nicpvotver@mil.ru

Дяченко Владимир Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-31, e-mail: vka@mil.ru

Евсеев Владимир Иванович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Есипов Евгений Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Житный Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Зозуля Людмила Петровна, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Зубарев Константин Константинович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-33, e-mail: vka@mil.ru

Казько Александр Анатольевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-31, e-mail: vka@mil.ru

Камчалов Сергей Сергеевич, 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

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

Карчин Александр Юрьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ковалев Сергей Владимирович, кандидат технических наук; ЦНИИ ВКС Минобороны России (170026, Россия, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 32); тел.: 8 (482) 255-88-29, e-mail: nicpvotver@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) 347-97-19, 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

Кошкарлов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кузьмичева Ирина Валентиновна, кандидат биологических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-31, e-mail: vka@mil.ru

Кукушкин Михаил Александрович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-72, e-mail: vka@mil.ru

Куничкин Дмитрий Анатольевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кушнарев Данил Васильевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.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) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Лазутин Роман Юрьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 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) 347-99-11, e-mail: vka@mil.ru

Мальцев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: vka@mil.ru

Морозов Егор Борисович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.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

Мусяенко Сергей Анатольевич, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Нестеров Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор; ЦНИИ ВКС Минобороны России (170026, Россия, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 32); тел.: 8 (482) 255-88-29, e-mail: nicpvotver@mil.ru

Паршин Михаил Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Пачин Андрей Владимирович, кандидат технических наук; 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

Пилькевич Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-96-54.

Поздеев Евгений Александрович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Решетников Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Рыбаков Вячеслав 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

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

Савочкин Павел Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Савчук Павел Николаевич, ФКП «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности» (141320, Россия, Московская область, Сергиево-Посадский городской округ, Пересвет, ул. Бабушкина, 9); тел.: 8 (495) 786-22-70.

Сахно Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21, e-mail: vka@mil.ru

Сиротин Илья Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Скородумов Иван Алексеевич, кандидат технических наук; ЦНИИ ВКС Минобороны России (170026, Россия, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 32); тел.: 8 (482) 255-88-29, e-mail: nicpvotver@mil.ru

Соловьев Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Строна Алексей Алексеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Суркис Игорь Феликсович, кандидат физико-математических наук; Институт прикладной астрономии Российской академии наук (191187, Россия, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10); тел.: 8 (812) 230-74-19, e-mail: surkis@iaaras.ru

Тимошук Александр Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Филиппских Евгений Эдуардович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21, e-mail: vka@mil.ru

Хальметов Рамиль Ряшидович, 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) 347-97-19, 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

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

Честных Александр Владимирович, Научно-тематический центр № 3 Акционерное общество «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи» (127083, Россия, Москва, ул. 8 марта, 10).

Шалдаев Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор; ЦНИИ ВКС Минобороны России (129345, Россия, Москва, ул. Осташковская, 12А); e-mail: nicpvotver@mil.ru

Шиян Александр Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Шульженко Андрей Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Абдурахимов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mil.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Башкирцев Виктор Павлович, кандидат педагогических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Болдырев Константин Борисович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ведерников Михаил Васильевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Грудинин Игорь Владимирович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Доронин Александр Павлович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka@mil.ru

Ерохин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Ефимов Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

Казимиров Артем Витальевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Каргу Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, 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, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Котяшов Евгений Валериевич, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Кравцов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Крыжановский Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Мионов Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-74.

Мысливцев Тимофей Олегович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Онуфрей Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Петренко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Разумов Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Семенюк Сергей Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Якимов Виктор Леонидович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).