

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

Выпуск 673

2020 г.

Издатель:

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

Редакционный совет

Председатель:

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

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

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

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

Главный редактор:

доктор техн. наук, проф. Ю.В. Кулешов

Редколлегия:

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

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

ответственный секретарь **А.Л. Федер**, *доктор воен. наук, доц.*;

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

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

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

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

И.Ю. Еремеев, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Н. Калинин**, *доктор техн. наук, проф.*;

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

В.В. Козлов, *доктор техн. наук, проф.*; **Н.С. Кужекин**, *кандидат филос. наук, проф.*;

В.Н. Кузьмин, *доктор воен. наук, проф.*; **Н.Б. Кунтурова**, *доктор пед. наук, доц.*;

Е.Л. Лебедев, *доктор техн. наук, проф.*; **А.Г. Ломако**, *доктор техн. наук, проф.*;

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

Т.О. Мысливцев, *доктор техн. наук, доц.*; **А.Н. Павлов**, *доктор техн. наук, проф.*;

А.В. Паршуткин, *доктор техн. наук, проф.*; **Н.А. Репях**, *кандидат филос. наук, доц.*;

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

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

А.В. Чарушников, *доктор воен. наук, проф.*

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

Ответственный за выпуск:
начальник РИО **С.В. Чернышев**
Выпускающий редактор: *А.В. Головина*
Технический редактор
и компьютерная верстка: *О.В. Филиппова*
Техническая поддержка:
К.И. Чувирова

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

Подписано к печ. 25.06.2020.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 78,00. Уч.-изд. л. 38,5
Тираж 26 экз. Заказ 3800/61.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Воротягин В.Н., Гончаров А.М., Павлов А.Н.* Методология гиперграфового моделирования структурно-технологических возможностей бортовых систем малых космических аппаратов 7
- Гончаров А.М., Самойлов Е.Б., Шмелёв В.В.* Синтез оптимальной по достоверности программы классификации телеметрируемых параметров при идентификации бортовых систем ракетно-космической техники 18
- Калюжный А.В., Тимофеев В.В.* Методика решения задачи оптимального резервирования в вычислительных комплексах автоматизированных систем военного назначения с использованием показателя надежности невосстанавливаемой системы..... 36

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Астахов Е.Н., Косяков Е.Н.* Оперативное резервирование каналов как средство борьбы с перегрузками направлений связи..... 42
- Афонин Г.И., Кошкарров А.С., Мальцев Г.Н.* Адаптивная коррекция атмосферных фазовых искажений с использованием ортогональных преобразований измерений датчика волнового фронта..... 48
- Бакурский К.В., Мысливцев Т.О., Никифоров С.В.* Использование радиотехнических систем сверхдлинноволнового диапазона для передачи частотно-временной информации..... 61
- Бурлаков С.О., Смирнов А.А., Цветков К.Ю.* Научно-технические предложения по реализации методики распределения частотно-энергетического ресурса земных станций и бортовых радиотехнических комплексов высокоскоростных систем спутниковой связи..... 68
- Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Попов А.С.* Методика расчета помехоустойчивости приема сигнала с четырехпозиционной квадратурной фазовой манипуляцией при воздействии гармонической когерентной помехи..... 79
- Карев М.С., Скворцов Д.В.* Модель формирования статической ошибки системы управления движением космического аппарата наблюдения..... 90
- Скоробогатова О.А.* Методика оценивания технических характеристик излучающих элементов двухполяризационной вибраторной антенной решетки широкоугольного сканирования в УНФ-диапазоне..... 132

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Алексеев В.Ф., Хайруллин Р.Р. Метод автоматизированной оценки маскирующих свойств растительного покрова недоступной территории на основе данных дистанционного зондирования Земли 106

Готюр И.А., Мешков А.Н., Рудь М.Ю., Яременко И.А. Перспективы развития автоматизированных систем гидрометеорологического обеспечения 117

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Мальцев Г.Н., Матвеев С.А. Математические модели процесса преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации 126

РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Абдурахимов А.А., Авксентьев А.А., Сасункевич А.А. Методика расчета координат места утечки теплоносителя из системы терморегулирования космического аппарата 136

Абсалямов Д.Р., Хальметов Р.Р., Шаповалов Д.В. Совершенствование схемных решений гелиосистем, применяемых в составе энергокомплекса специальных технических систем объектов наземной космической инфраструктуры 145

Аверкиев Н.Ф., Кульвиц А.В., Хасанов А.Ю. Оценивание процесса развития опасной ситуации при разрушении космического аппарата на геостационарной орбите 152

Антропова А.В., Баталов А.В., Козлов В.В., Лагун А.В. Математическая модель оценивания динамических характеристик транспортировки ракетных блоков железнодорожным транспортом 159

Аневалова И.А., Груздев Н.В., Пирогов С.Ю., Прокопенко Е.А. Модифицированная энергомассовая модель ракеты-носителя компоновочной схемы «тандем» с системой спасения ракетных блоков первой ступени 169

Баранов Д.А., Казаков Р.Р., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Формирование состава свойств и показателей технического совершенства космического ракетного комплекса 176

Бубликов М.А., Завьялова Г.М., Лебедев Е.Л. Теплоаккумулирующий материал на основе галлия в решении задач термостабилизации бортовых систем космический аппаратов 183

Герасименко Е.Ю., Постищенко В.И., Прокопенко Е.А. Экспериментальный стенд для разработки и совершенствования перспективных методов контроля функционирования и испытаний жидкостных ракетных двигателей 190

Гончаров П.С., Мартынов В.В., Скутницкий В.М., Цыбин О.Ю., Шуневич Н.А. Высоковольтный источник питания для проведения огневых испытаний электрических ракетных двигателей при наземной экспериментальной отработке 198

Казимиров А.В., Молостов А.В., Наумчик Е.Е., Прилуцкий И.К. Система хранения перспективных ракетных топлив на базе сжиженного природного газа ... 206

Перфильев А.С., Султанов А.Э. Подходы к оцениванию динамических параметров корпуса ракеты-носителя в полете по данным телеметрических измерений ... 212

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

Богук Ю.М., Маненок И.И., Осипов Г.К., Хиленко В.В. Методика интегральной оценки сформированности профессиональных компетенций у курсантов 222

Воронков И.Ю., Зиновьев В.Г., Кужекин Н.С. Методика оценивания результатов конкурса на лучшую лекцию среди преподавателей академии 232

Гузенко В.Л., Дулишкин Р.М., Касавцев М.Ю. Методика совершенствования работы командира подразделения по формированию командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы у курсантов при повседневной деятельности 247

Ерофеев А.В., Кацик В.О., Покидов Л.В. Методические и организационные аспекты использования информационных технологий при проведении тактико-специального учения с курсантами 255

Кунтурова Н.Б. Оценивание вариативности методического подхода к формированию требуемого уровня образования у курсантов военного вуза на основе реализации образовательной траектории 263

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

Огородников В.П. Связь исторического и логического в формировании идеалов и норм научного исследования 270

ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. Влияние метеоусловий на характер динамических воздействий на стартовое сооружение при пуске ракеты-носителя 279

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

<i>Казахов Б.Д., Попов Д.М. Методика обоснования рационального способа маневренных действий тактического воинского формирования</i>	285
Рефераты статей	292
Сведения об авторах	301
Сведения о рецензентах	309

В.Н. Воротягин;
А.М. Гончаров,
кандидат техн. наук;
А.Н. Павлов,
доктор техн. наук, профессор

МЕТОДОЛОГИЯ ГИПЕРГРАФОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования структурной (структурно-технологической) живучести бортовых систем малых космических аппаратов. В статье предлагается методологический подход, основанный на гиперграфовом формальном представлении технологических операций управления малыми космическими аппаратами, в котором ребра соединяют функциональные элементы бортовой системы, входящие в тот или иной технологический процесс управления. При использовании операции дифференцирования гиперграфа для построения его производной формируется нечеткий граф технологической независимости функциональных элементов бортовой системы, что позволяет ввести показатели структурно-технологической живучести как функциональных элементов, так и в целом всей бортовой системы малого космического аппарата. Проведен анализ критичности влияния функциональных элементов на бортовую систему малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли при реализации технологических режимов функционирования космического аппарата в условиях возникновения аварийных полетных ситуаций.

Ключевые слова: технологические режимы функционирования, производная гиперграф, структурно-технологическая живучесть.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение круга функциональных задач, решаемых современными малыми космическими аппаратами (МКА), и увеличение сроков их активного существования можно реализовать путем обеспечения эффективного и качественного функционирования бортовых систем МКА, причем как в номинальных условиях работы, так и при возникновении расчетных и нерасчетных нештатных ситуаций. Выполнение целевых функций МКА при возникновении аномальных полетных ситуаций можно осуществить путем обеспечения живучести бортовых систем (БС) МКА. Как правило, методология управления полетом МКА реализуется через множество управлений, использующих структурные внутренние резервы, построенные на избыточности ресурсов отдельных систем. В основе организации данного управления лежит концепция повышения надежности работы БС МКА за счет обеспечения свойств безотказности, сохраняемости, долговечности и ремонтпригодности в номинальных условиях эксплуатации и в расчетных нештатных ситуациях.

Процесс оценивания живучести функционирования БС МКА зависит от многих факторов, условий применения БС МКА и управления такими средствами. При этом следует учитывать и случайные факторы, и частичные отказы функциональных элементов (ФЭ) и подсистем БС. При возникновении расчетных нештатных ситуаций или «нормальных» условий полета для оценивания живучести БС МКА, как правило, применяют [1–3] имитационные модели орбитального движения МКА и его функционирования по целевому назначению с использованием статистической обработки результатов эксплуатации уже созданных и эксплуатирующихся МКА. При проектировании новых МКА, существенно отличающихся от ранее созданных, такой подход не всегда приемлем, особенно в условиях нерасчетных нештатных ситуаций. В этом случае модели и методы, применяемые в теории надежности, становятся не

применимы для обеспечения живучести БС МКА. В результате требуется разработка новой методологии оценивания живучести БС МКА.

Смена структурных состояний БС МКА связана как с отказами компонент (ФЭ) БС, так и с выполнением программы полета. Очевидно, что значения частных показателей качества функционирования БС МКА в каждом состоянии зависят от множества отказавших, работоспособных, частично работоспособных ФЭ; распределения технологических операций; перераспределения этих операций между работоспособными или частично работоспособными ФЭ.

Важным и неотъемлемым условием изучения возможностей БС МКА [4–7] является проведение анализа и оценивания архитектуры его структурных состояний, отражающих как функциональные, так и технологические особенности управления МКА. Различные ФЭ БС МКА играют далеко не одинаковые роли, их отказы могут приводить к разным по степени влияния на состояние системы последствиям. Это обусловлено и различиями технического характера (пропускная способность, производительность и т. д.), и различиями технологии управления объектами.

С целью определения роли конкретных компонентов БС в обеспечении работоспособности МКА в целом следует проводить анализ показателей структурно-технологической живучести МКА при участии ФЭ БС в различных сценариях реализации программы полета МКА. Под структурно-технологической живучестью в данной статье будем понимать способность структуры ФЭ БС выполнять технологические режимы функционирования, позволяющие достичь цели управления при целеустремленных воздействиях среды (противника) и стихийных воздействиях катастрофического характера.

Так, например, типовая технология управления МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «АИСТ-2Д», представленная в работе [8], при штатном его функционировании включает, как правило, следующие технологические режимы (операции) функционирования МКА (рис. 1, табл. 1): режим «Приведение МКА в ориентированное в ОСК положение» (ОСК – орбитальная система координат) – «грубая ориентация», режим «Приведение МКА в ориентированное в ОСК положение» – «точная ориентация», режим «Приведение МКА в ориентированное на Солнце положение». Для выполнения указанных режимов используются различные чувствительные элементы (ЧЭ) и исполнительные органы (ИО), включающие отдельные измерители угловой скорости (ОИУС), управляющие двигатели-маховики (УДМ), систему спутниковой навигации (ССН), приборы ориентации по Земле (ПОЗ), оптические звездные датчики (ОЗД), магнитометры (МА), электромагниты (ЭМ).

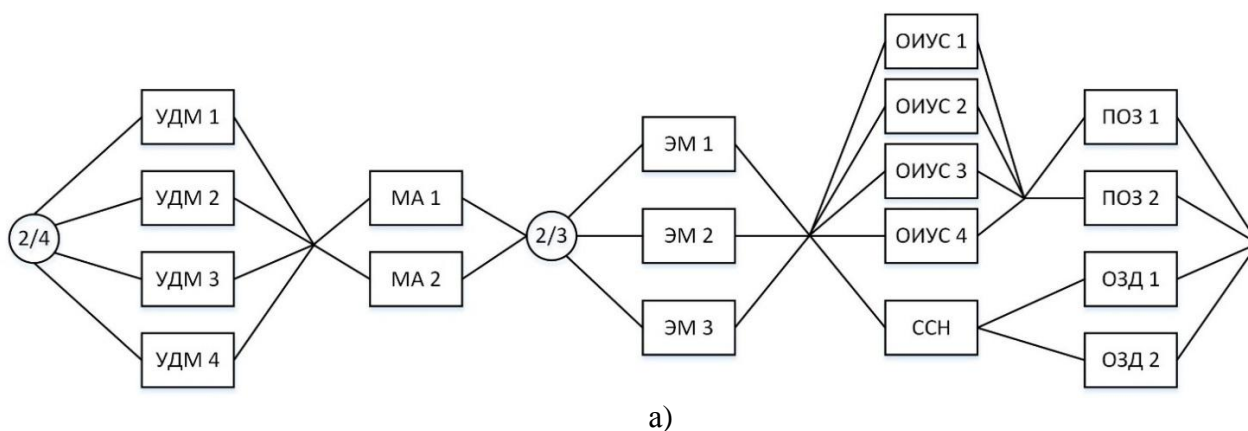


Рис. 1. Режимы функционирования МКА (начало):
 а – «грубая» ориентация; б – «точная» ориентация;
 в – «ориентация на Солнце»

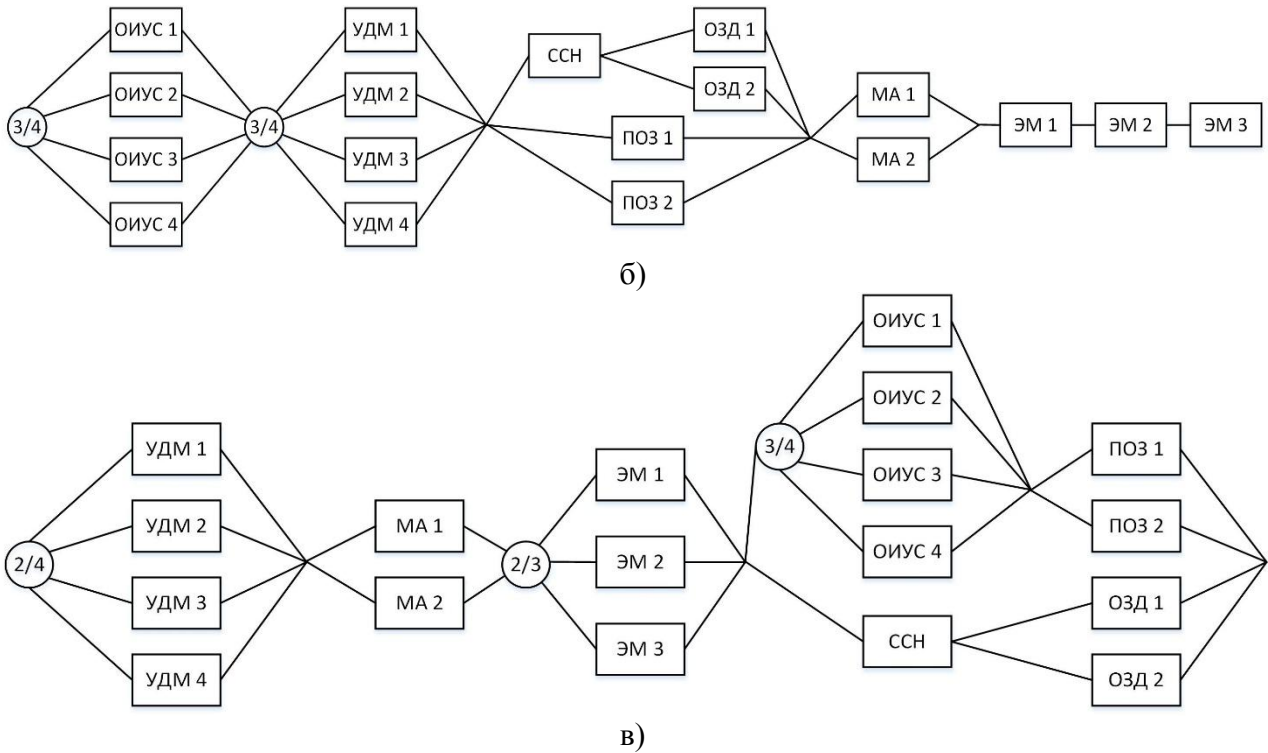


Рис. 1. Режимы функционирования МКА (окончание):
 а – «грубая» ориентация; б – «точная» ориентация;
 в – «ориентация на Солнце»

ГИПЕРГРАФ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МКА И ОПЕРАЦИЯ ЕГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ

Обозначим гиперграф технологических режимов функционирования МКА через $H = \langle X, U, \chi \rangle$, где $X = \{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ – множество типовых ФЭ БС (в частности, элементов системы управления движением МКА: ОИУС, УДМ, ССН, ПОЗ, ОЗД, МА, ЭМ), $U = \{u_l \subseteq X, l = 1, 2, \dots, m\}$ – множество ребер гиперграфа (технологических режимов), $\chi: X \times U \rightarrow \{0, 1\}$ – характеристическая функция задействия ФЭ при проведении той или иной технологической операции. Гиперграф H удобно обозначать матрицей инцидентности $Q = \|q_{li}\|_{m \times n}$, $q_{li} \in \{0, 1\}$, где $q_{li} = 1$ ($\chi(x_i, u_l) = 1$) – задействие i -го ФЭ при выполнении l -го технологического режима. Тогда обобщенное задействие ФЭ в технологическом цикле управления (ТЦУ) МКА можно обозначить вектором $\vec{v}_i = (q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{mi})$. Данный вектор характеризует направление активности ФЭ БС и интенсивность этой активности $|\vec{v}_i|^2$. Для вычисления интенсивности совместного задействия двух произвольных ФЭ в ТЦУ с учетом направления их активности можно использовать скалярное произведение векторов обобщенного задействия: (\vec{v}_i, \vec{v}_j) , $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Для проведения анализа структурно-технологической живучести БС МКА введем понятие матрицы интенсивности задействия ФЭ в ТЦУ $F = \|f_{ij}\|_{n \times n}$, элементы которой f_{ij} ($\forall i \neq j$) равны интенсивности совместного задействия ФЭ в ТЦУ, а $f_{ii} = |\vec{v}_i|^2$ – интенсивность собственного задействия ФЭ в ТЦУ. При этом следует отметить, что

максимальная интенсивность собственного задействия ФЭ в ТЦУ составляет $f_{\max} = m$. Матрица F может быть получена с использованием матрицы инцидентности Q по формуле $F = Q^T \times Q$, где Q^T – транспонированная матрица инцидентности.

Производной $\partial H / \partial U$ гиперграфа H по событию U (под событием понимается ребро, связывающее элементы гиперграфа) называется граф [9, 10], каждая пара вершин которого (v_i, v_j) взвешена отношением интенсивности $(f_{ii} - f_{ij}) + (f_{jj} - f_{ji})$ их несовместного участия в событии U (интенсивность несовместного задействия ФЭ) к интенсивности f_{ij} совместного задействия ФЭ в событии U :
$$\frac{\partial H}{\partial U}(v_i, v_j) = \frac{f_{ii} - 2f_{ij} + f_{jj}}{f_{ij}}$$
.

Другими словами, на элементах графа H происходят события U – технологический режим функционирования, а производная $\partial H / \partial U$ будет характеризовать степень интенсивности и равномерности совместного задействия ФЭ в ТЦУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БС МКА

Рассмотрим пример применения технологических режимов функционирования МКА при выполнении типовых операций по приему (передаче) различной информации в течение ТЦУ МКА «АИСТ-2Д». Известно, что значения частоты применения технологических режимов функционирования МКА при выполнении типовых операций по приему (передаче) различной информации (специальной, телеметрической, баллистической, командно-программной), циркулирующей в контурах управления АСУ КА, в течение типового ТЦУ МКА [8] составят: режим «грубой» ориентации используется в 40%, режим «точной» ориентации – в 50%, режим «ориентации на Солнце» – в 10%.

Таблица 1

Режимы функционирования МКА

Режимы ориентации	Тип элемента								
	ОИУС	УДМ	ССН	ПОЗ	ОЗД	МА	ЭМ		
Режим «грубая» ориентация		2 из 4-х	1		1 из 2-х	1 из 2-х	2 из 3-х		
	1 из 4-х			1 из 2-х					
Режим «точная» ориентация	3 из 4-х	3 из 4-х		1 из 2-х		1 из 2-х	1	1	1
			1		1 из 2-х				
Режим «ориентация на Солнце»	3 из 4-х	2 из 4-х		1 из 2-х		1 из 2-х	2 из 3-х		
			1		1 из 2-х				

Пусть ТЦУ МКА включает в себя 40 режимов ориентации, из них режим «грубой» ориентации задействуется 16 раз (40%), «точной» ориентации – 20 раз (50%), а режим «ориентация на Солнце» – 4 раза (10%).

Тогда матрица инцидентности данного гиперграфа принимает следующий вид:

	ОИУС 1	ОИУС 2	ОИУС 3	ОИУС 4	УДМ 1	УДМ 2	УДМ 3	УДМ 4	ССН	ПОЗ 1	ПОЗ 2	ОЗД 1	ОЗД 2	МА 1	МА 2	ЭМ 1	ЭМ 2	ЭМ 3
X_1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0
X_2	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
X_3	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1
X_4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0
X_5	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
X_6	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
X_7	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0
X_8	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
X_9	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
X_{10}	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
X_{11}	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
X_{12}	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
X_{13}	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
X_{14}	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
X_{15}	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
X_{16}	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
X_{17}	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1
X_{18}	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
X_{19}	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1
X_{20}	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
X_{21}	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1
X_{22}	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
X_{23}	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1
X_{24}	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
X_{25}	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1
X_{26}	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
X_{27}	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
X_{28}	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
X_{29}	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
X_{30}	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
X_{31}	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
X_{32}	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
X_{33}	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
X_{34}	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
X_{35}	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
X_{36}	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
X_{37}	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
X_{38}	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
X_{39}	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1
X_{40}	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1

В свою очередь, матрица интенсивности задействования ФЭ в ТЦУ $F = \|f_{ij}\|_{18 \times 18}$ будет иметь следующий вид:

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈
X ₁	19	11	12	10	18	14	10	11	7	9	3	5	2	14	5	17	19	17
X ₂	11	19	12	11	14	16	13	10	7	4	8	2	5	6	13	19	17	17
X ₃	12	12	19	11	12	13	16	12	8	8	3	5	3	13	6	18	17	18
X ₄	10	11	11	18	11	10	13	17	8	2	8	3	5	5	13	17	17	17
X ₅	18	14	12	11	25	15	15	10	11	8	6	7	4	15	10	23	21	21
X ₆	14	16	13	10	15	25	10	15	12	8	5	7	5	15	10	21	23	21
X ₇	10	13	16	13	15	10	25	15	13	5	7	5	8	10	15	22	20	22
X ₈	11	10	12	17	10	15	15	25	14	4	7	6	8	10	15	20	22	22
X ₉	7	7	8	8	11	12	13	14	20	0	0	10	10	10	10	16	16	17
X ₁₀	9	4	8	2	8	8	5	4	0	10	0	0	0	10	0	8	9	8
X ₁₁	3	8	3	8	6	5	7	7	0	0	10	0	0	0	10	9	8	8
X ₁₂	5	2	5	3	7	7	5	6	10	0	0	10	0	10	0	8	9	8
X ₁₃	2	5	3	5	4	5	8	8	10	0	0	0	10	0	10	8	7	9
X ₁₄	14	6	13	5	15	15	10	10	10	10	0	10	0	20	0	16	18	16
X ₁₅	5	13	6	13	10	10	15	15	10	0	10	0	10	0	20	17	15	17
X ₁₆	17	19	18	17	23	21	22	20	16	8	9	8	8	16	17	33	27	26
X ₁₇	19	17	17	17	21	23	20	22	16	9	8	9	7	18	15	27	33	26
X ₁₈	17	17	18	17	21	21	22	22	17	8	8	8	9	16	17	26	26	33

Произведем вычисление производной нечеткого гиперграфа:

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈
X ₁	0,00	1,45	1,17	1,70	0,44	1,14	2,40	2,00	3,57	1,22	7,67	3,80	12,50	0,79	5,80	1,06	0,74	1,06
X ₂	1,45	0,00	1,17	1,36	1,00	0,75	1,38	2,40	3,57	5,25	1,63	12,50	3,80	4,50	1,00	0,74	1,06	1,06
X ₃	1,17	1,17	0,00	1,36	1,67	1,38	0,75	1,67	2,88	1,63	7,67	3,80	7,67	1,00	4,50	0,89	1,06	0,89
X ₄	1,70	1,36	1,36	0,00	1,91	2,30	1,31	0,53	2,75	12,00	1,50	7,33	3,60	5,60	0,92	1,00	1,00	1,00
X ₅	0,44	1,14	1,67	1,91	0,00	1,33	1,33	3,00	2,09	2,38	3,83	3,00	6,75	1,00	2,50	0,52	0,76	0,76
X ₆	1,14	0,75	1,38	2,30	1,33	0,00	3,00	1,33	1,75	2,38	5,00	3,00	5,00	1,00	2,50	0,76	0,52	0,76
X ₇	2,40	1,38	0,75	1,31	1,33	3,00	0,00	1,33	1,46	5,00	3,00	5,00	2,38	2,50	1,00	0,64	0,90	0,64
X ₈	2,00	2,40	1,67	0,53	3,00	1,33	1,33	0,00	1,21	6,75	3,00	3,83	2,38	2,50	1,00	0,90	0,64	0,64
X ₉	3,57	3,57	2,88	2,75	2,09	1,75	1,46	1,21	0,00	∞	∞	1,00	1,00	2,00	2,00	1,31	1,31	1,12
X ₁₀	1,22	5,25	1,63	12,0	2,38	2,38	5,00	6,75	∞	0,00	∞	∞	∞	1,00	∞	3,38	2,78	3,38
X ₁₁	7,67	1,63	7,67	1,50	3,83	5,00	3,00	3,00	∞	∞	0,00	∞	∞	∞	0,90	1,05	1,19	1,19
X ₁₂	3,80	12,50	3,80	7,33	3,00	3,00	5,00	3,83	1,00	∞	∞	0,00	∞	1,00	∞	3,38	2,78	3,38
X ₁₃	12,50	3,80	7,67	3,60	6,75	5,00	2,38	2,38	1,00	∞	∞	∞	0,00	∞	1,00	3,38	4,14	2,78
X ₁₄	0,79	4,50	1,00	5,60	1,00	1,00	2,50	2,50	2,00	1,00	∞	1,00	∞	0,00	∞	1,31	0,94	1,31
X ₁₅	5,80	1,00	4,50	0,92	2,50	2,50	1,00	1,00	2,00	∞	1,00	∞	1,00	∞	0,00	1,12	1,53	1,12
X ₁₆	1,06	0,74	0,89	1,00	0,52	0,76	0,64	0,90	1,31	3,38	2,78	3,38	3,38	1,31	1,12	0,00	0,44	0,54
X ₁₇	0,74	1,06	1,06	1,00	0,76	0,52	0,90	0,64	1,31	2,78	3,38	2,78	4,14	0,94	1,53	0,44	0,00	0,54
X ₁₈	1,06	1,06	0,89	1,00	0,76	0,76	0,64	0,64	1,12	3,38	3,38	3,38	2,78	1,31	1,12	0,54	0,54	0,00

Если

$$\frac{\partial H}{\partial U}(v_i, v_j) = \infty,$$

то функциональные элементы совместно не задействуются при выполнении ТЦУ (отсутствует взаимосвязь между ними).

Если же

$$\frac{\partial H}{\partial U}(v_i, v_j) = 0,$$

то интенсивности задействования двух функциональных элементов в проведении ТЦУ полностью совпадают, т. е. данные ФЭ всегда только совместно участвуют в ТЦУ МКА. В этом случае на графе производной таких двух ФЭ можно представлять одной вершиной, следовательно, число вершин графа производной может быть меньше числа вершин исходного гиперграфа режимов функционирования МКА. В рассматриваемом примере число вершин графа производной совпадает с числом вершин исходного гиперграфа режимов функционирования МКА.

Кроме того, при увеличении значения $\frac{\partial H}{\partial U}(v_i, v_j)$ интенсивность совместного задействования ФЭ БС при проведении ТЦУ МКА уменьшается. Другими словами, чем меньше совместное задействование ФЭ БС при проведении ТЦУ, тем меньше зависят от него другие ФЭ. Определим, какое максимальное значение, отличное от ∞ , могут принимать элементы матрицы $\frac{\partial H}{\partial U}$.

Очевидно, что максимальное значение

$$\beta_{\max} = \max_{i \neq j} \frac{f_{ii} - 2f_{ij} + f_{jj}}{f_{ij}} = \frac{f_{i_0} + \max_{i \neq i_0} f_{ii} - 2 \min_{i \neq j, f_{ij} \neq 0} f_{ij}}{\min_{i \neq j, f_{ij} \neq 0} f_{ij}},$$

где $f_{i_0} = \max_i f_{ii}$.

Для рассматриваемого примера такое максимальное значение составит $\frac{33+33-2 \cdot 2}{2} = 31$.

Произведя нормировку значений матрицы смежности $\frac{\partial H}{\partial U}$ производной гиперграфа, можно построить нечеткое отношение технологической независимости ФЭ БС при проведении ТЦУ МКА $Z = \|z_{ij}\|_{k \times k}$ (где k – число вершин графа производной, z_{ij} – независимость вершин графа производной при выполнении технологических режимов функционирования МКА) следующим образом.

Шаг 0. В начале все v_i соответствуют вершинам x_i нечеткого гиперграфа.

Шаг 1. Если элемент матрицы $\frac{\partial H}{\partial U}(v_i, v_j) = 0$ ($i \neq j$), то вершины v_i, v_j объединяются в одну вершину графа.

Шаг 2. Если элемент матрицы $0 < \frac{\partial H}{\partial U}(v_i, v_j) < \infty$, то $z_{ij} = 1 - \frac{\frac{\partial H}{\partial U}(v_i, v_j)}{\beta_{\max}}$.

Шаг 3. Если элемент матрицы $\frac{\partial H}{\partial U}(v_i, v_j) = \infty$ ($i \neq j$), то $z_{ij} = 0$.

Для рассматриваемого примера нечеткое отношение технологической независимости ФЭ БС имеет вид

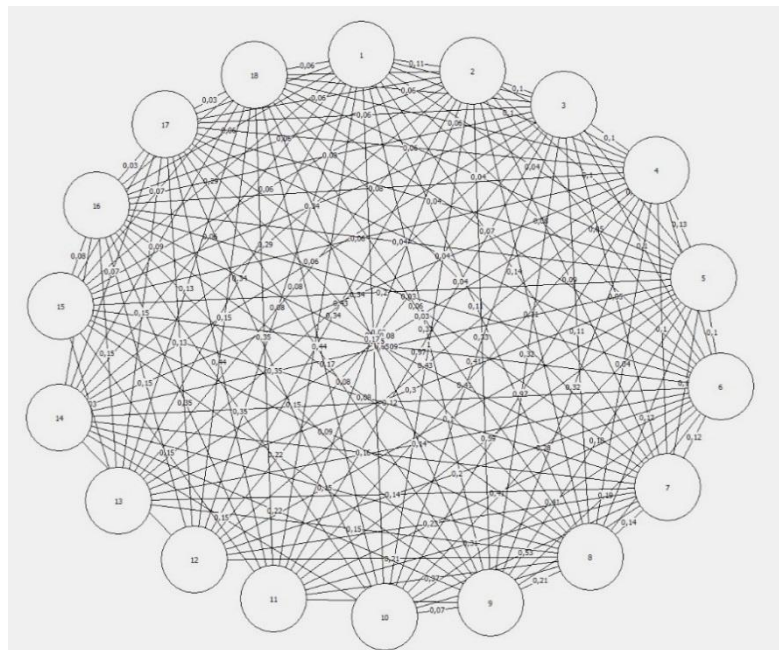
$$Z = \begin{array}{c|cccccccccccccccccccc} & X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} & X_{17} & X_{18} \\ \hline X_1 & 0,00 & 0,05 & 0,04 & 0,05 & 0,01 & 0,04 & 0,08 & 0,06 & 0,12 & 0,04 & 0,25 & 0,12 & 0,40 & 0,03 & 0,19 & 0,03 & 0,02 & 0,03 \\ X_2 & 0,05 & 0,00 & 0,04 & 0,04 & 0,03 & 0,02 & 0,04 & 0,08 & 0,12 & 0,17 & 0,05 & 0,40 & 0,12 & 0,15 & 0,03 & 0,02 & 0,03 & 0,03 \\ X_3 & 0,04 & 0,04 & 0,00 & 0,04 & 0,05 & 0,04 & 0,02 & 0,05 & 0,09 & 0,05 & 0,25 & 0,12 & 0,25 & 0,03 & 0,15 & 0,03 & 0,03 & 0,03 \\ X_4 & 0,05 & 0,04 & 0,04 & 0,00 & 0,06 & 0,07 & 0,04 & 0,02 & 0,09 & 0,39 & 0,05 & 0,24 & 0,12 & 0,18 & 0,03 & 0,03 & 0,03 & 0,03 \\ X_5 & 0,01 & 0,04 & 0,05 & 0,06 & 0,00 & 0,04 & 0,04 & 0,10 & 0,07 & 0,08 & 0,12 & 0,10 & 0,22 & 0,03 & 0,08 & 0,02 & 0,02 & 0,02 \\ X_6 & 0,04 & 0,02 & 0,04 & 0,07 & 0,04 & 0,00 & 0,10 & 0,04 & 0,06 & 0,08 & 0,16 & 0,10 & 0,16 & 0,03 & 0,08 & 0,02 & 0,02 & 0,02 \\ X_7 & 0,08 & 0,04 & 0,02 & 0,04 & 0,04 & 0,10 & 0,00 & 0,04 & 0,05 & 0,16 & 0,10 & 0,16 & 0,08 & 0,08 & 0,03 & 0,02 & 0,03 & 0,02 \\ X_8 & 0,06 & 0,08 & 0,05 & 0,02 & 0,10 & 0,04 & 0,04 & 0,00 & 0,04 & 0,22 & 0,10 & 0,12 & 0,08 & 0,08 & 0,03 & 0,03 & 0,02 & 0,02 \\ X_9 & 0,12 & 0,12 & 0,09 & 0,09 & 0,07 & 0,06 & 0,05 & 0,04 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,03 & 0,03 & 0,06 & 0,06 & 0,04 & 0,04 & 0,04 \\ X_{10} & 0,04 & 0,17 & 0,05 & 0,39 & 0,08 & 0,08 & 0,16 & 0,22 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,03 & 0,00 & 0,11 & 0,09 & 0,11 \\ X_{11} & 0,25 & 0,05 & 0,25 & 0,05 & 0,12 & 0,16 & 0,10 & 0,10 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,03 & 0,03 & 0,03 & 0,04 & 0,04 \\ X_{12} & 0,12 & 0,40 & 0,12 & 0,24 & 0,10 & 0,10 & 0,16 & 0,12 & 0,03 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,03 & 0,00 & 0,11 & 0,09 & 0,11 \\ X_{13} & 0,40 & 0,12 & 0,25 & 0,12 & 0,22 & 0,16 & 0,08 & 0,08 & 0,03 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,03 & 0,00 & 0,11 & 0,13 & 0,09 \\ X_{14} & 0,03 & 0,15 & 0,03 & 0,18 & 0,03 & 0,03 & 0,08 & 0,08 & 0,06 & 0,03 & 0,00 & 0,03 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,04 & 0,03 & 0,04 \\ X_{15} & 0,19 & 0,03 & 0,15 & 0,03 & 0,08 & 0,08 & 0,03 & 0,03 & 0,06 & 0,00 & 0,03 & 0,00 & 0,03 & 0,00 & 0,00 & 0,04 & 0,05 & 0,04 \\ X_{16} & 0,03 & 0,02 & 0,03 & 0,03 & 0,02 & 0,02 & 0,02 & 0,03 & 0,04 & 0,11 & 0,09 & 0,11 & 0,11 & 0,04 & 0,04 & 0,00 & 0,01 & 0,02 \\ X_{17} & 0,02 & 0,03 & 0,03 & 0,03 & 0,02 & 0,02 & 0,03 & 0,02 & 0,04 & 0,09 & 0,11 & 0,09 & 0,13 & 0,03 & 0,05 & 0,01 & 0,00 & 0,02 \\ X_{18} & 0,03 & 0,03 & 0,03 & 0,03 & 0,02 & 0,02 & 0,02 & 0,02 & 0,04 & 0,11 & 0,11 & 0,11 & 0,09 & 0,04 & 0,04 & 0,02 & 0,02 & 0,00 \end{array}$$


Рис. 2. Нечеткий граф технологической независимости ФЭ БС МКА

Нечеткий граф технологической независимости ФЭ БС МКА представлен на рис. 2

Таким образом, описав задействование ФЭ в ТЦУ МКА нечетким графом технологической независимости, можно проводить исследования структурно-технологических, ресурсных, динамических свойств БС МКА с использованием мощного содержательного и формального аппарата теории графов [7].

Так, например, для вычисления показателя структурно-технологической живучести (технологической независимости) отдельно взятого ФЭ БС (ОИУС, УДМ и т. д.) предлагается

использовать показатель $c(v_i) = \frac{\sum_{j=1}^k z_{ij}}{\sum_{p=1}^k \sum_{l=1}^k z_{pl}}$, отражающий нормированное значение суммарной

технологической независимости ФЭ от других ФЭ БС. Тогда для определения структурно-технологической живучести в целом всей БС МКА с учетом собственной интенсивности за-

действия ФЭ в ТЦУ предлагается воспользоваться выражением $C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k c(v_i) \cdot d_i \cdot f_{ii}}{\max\{d_i\} \cdot f_{\max}}$.

При этом следует отметить, что, если вершина производной гиперграфа содержит несколько ФЭ БС, то интенсивность задействования в ТЦУ такой вершины соответственно удваивается, утраивается и т. д. в соответствии с количеством включенных в нее ФЭ. Так, для рассматриваемого примера $d_1 = 1, d_2 = 1, d_3 = 1, \dots, d_{18} = 1$, а результаты вычисления предложенных показателей будут следующими:

$$\begin{aligned} c(v_1) &= 0,059731, c(v_2) = 0,060217, c(v_3) = 0,060652, c(v_4) = 0,059897, c(v_5) = 0,061489, \\ c(v_6) &= 0,061553, c(v_7) = 0,06154, c(v_8) = 0,061404, c(v_9) = 0,054424, c(v_{10}) = 0,040555, \\ c(v_{11}) &= 0,041741, c(v_{12}) = 0,043592, c(v_{13}) = 0,043272, c(v_{14}) = 0,050875, c(v_{15}) = 0,050875, \\ c(v_{16}) &= 0,062774, c(v_{17}) = 0,062726, c(v_{18}) = 0,06275, C = 0,45787. \end{aligned}$$

Используя данные показатели, проведем анализ изменения структурно-технологической живучести БС МКА при росте интенсивности задействования ФЭ в ТЦУ, вызванном отказом некоторых элементов БС. Пусть отказ отдельных измерителей угловой скорости (v_4) и управляющих двигателей-маховиков (v_8) привел к максимальной интенсивности задействования этих ФЭ при проведении ТЦУ МКА. Нечеткий граф технологической независимости ФЭ БС МКА рассматриваемой ситуации представлен на рис. 3.

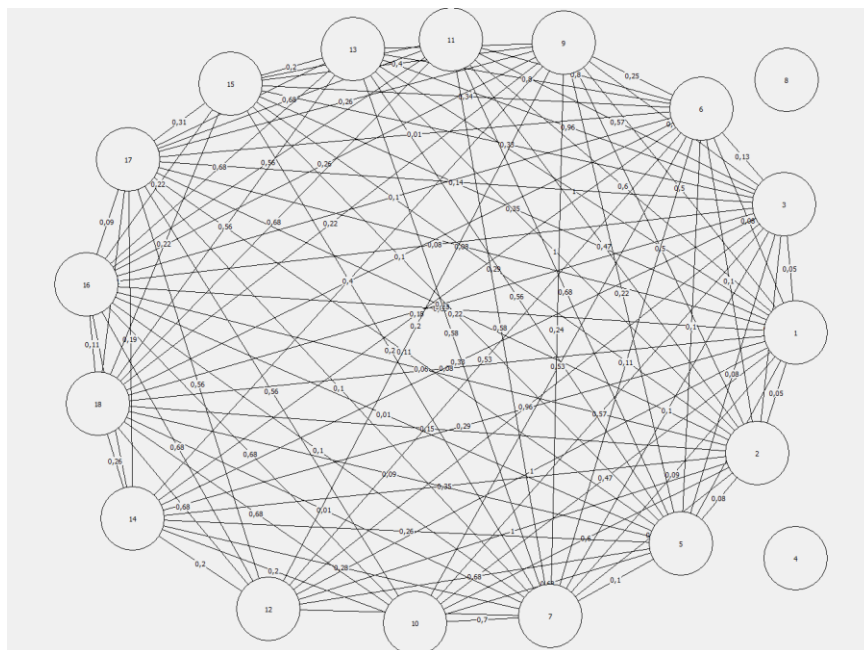


Рис. 3. Нечеткий граф технологической независимости ФЭ БС МКА при отказе одного ОИУС и одного УДМ

При этом показатели структурно-технологической живучести примут следующие значения:

$$\begin{aligned}c(v_1) &= 0,070845, \quad c(v_2) = 0,070771, \quad c(v_3) = 0,070794, \quad c(v_4) = 0, \quad c(v_5) = 0,07308, \\c(v_6) &= 0,072659, \quad c(v_7) = 0,073032, \quad c(v_8) = 0, \quad c(v_9) = 0,061675, \quad c(v_{10}) = 0,04145, \\c(v_{11}) &= 0,044099, \quad c(v_{12}) = 0,043303, \quad c(v_{13}) = 0,042872, \quad c(v_{14}) = 0,058416, \quad c(v_{15}) = 0,058196, \\c(v_{16}) &= 0,073033, \quad c(v_{17}) = 0,072819, \quad c(v_{18}) = 0,072957, \quad C = 0,375926.\end{aligned}$$

Анализируя полученные результаты, становится понятным, что снижение показателя структурно-технологической живучести в целом БС МКА с 0,45787 до 0,375926 вызвано, с одной стороны, увеличением технологической независимости отдельных ФЭ из-за повышения их совместного участия в проведении технологических режимов функционирования МКА, а с другой стороны, – увеличением интенсивности собственного задействования ФЭ в ТЦУ МКА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе предлагаемого в данной работе подхода лежит гиперграфовое формальное представление технологических операций управления МКА. Для оценивания и анализа структурно-технологической живучести БС МКА предложена операция дифференцирования гиперграфа путем построения частотной матрицы интенсивности совместного задействования ФЭ в проведении технологических режимов управления МКА.

Причем при использовании производной гиперграфа формируется нечеткое отношение технологической независимости ФЭ БС МКА.

Предложенные показатели структурно-технологической живучести БС МКА в случае расчетных, а особенно в нерасчетных аварийных полетных ситуациях на борту МКА позволят проанализировать и оценить живучесть той или иной конфигурации БС МКА.

Список используемых источников

1. *Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В.* Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полетных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – № 4(44). – С. 9–21.
2. *Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В.* Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
3. *Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А.* Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 296 с.
4. *Кравец В.Г. Любинский В.Е.* Основы управления космическими полетами. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.
5. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник / Ю.С. Мануйлов, Е.А. Новиков, А.Н. Павлов и др.; под общ. ред. Ю.С. Мануйлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 266 с.
6. *Павлов А.Н.* Нечетко-возможностный подход к анализу и оцениванию безопасности сложных организационно-технических систем // Материалы XI Санкт-Петербургской международной конференции РИ-2008 (РФ, г. Санкт-Петербург, 22–24 октября 2008 года). – СПб.: СПОИСУ, 2008. – С. 48–49
7. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник / Е.Н. Алёшин, С.В. Зиновьев, Е.В. Копкин и др.; под общ. ред. А.Н. Павлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 370 с.

8. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов и др. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
9. Павлов А.Н., Осипенко С.А. Методика оценивания технического состояния средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. – Вып. 27. – С. 159–169.
10. Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатова М.В. Дискретная математика: учебник для студентов вузов. – М.: АСТ «Астрель», 2003. – 447 с.

А.М. Гончаров,
кандидат техн. наук;
Е.Б. Самойлов,
кандидат техн. наук;
В.В. Шмелёв,
доктор техн. наук

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГРАММЫ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Рассматривается процесс идентификации типа бортовых систем ракетно-космической техники по телеметрической информации, получаемой национальными техническими средствами контроля. Непосредственно совершенствуется методическое обеспечение определения семантического содержания телеметрических данных объектов контроля. Предложен набор из 29 классификационных признаков с прикладным обоснованием составляющих. Для классификации использован последовательный условный детерминированный метод распознавания, адаптированный к особенностям решаемой задачи; в качестве оптимизируемого показателя качества предлагается использовать достоверность получаемого результата классификации. Приводится пример.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, телеметрическая информация, достоверность классификации телеметрируемых параметров, динамическое программирование.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день между ведущими мировыми державами заключен ряд договоров и соглашений, направленных на сокращение и ограничения вооружений, как обычных (ДОВСЕ, Венские соглашения), так и стратегических (ОСВ-1, 2, 3, РСМД, СНВ и СНП) [1]. При этом осуществляется обмен результатами телеизмерений объектов испытаний для контроля выполнения взятых обязательств.

Кроме непосредственного контроля по телеметрии выполнения договорных обязательств постоянно решается более широкая задача идентификации типа бортовых систем ракетно-космической техники (ОРКТ) с целью определения направлений модернизации объектов испытаний. Однако в настоящее время не определена перспектива пролонгации Договора о СНВ и комплекса сопутствующих ему документов. В случае прекращения обмена результатами телеизмерений одним из основных методов получения телеметрируемых параметров (ТМП) ракетно-космической техники станет использование национальных технических средств контроля (НТСК) различных видов базирования (морского, космического, воздушного и наземного).

Идентификация типа бортовых систем объектов ОРКТ по ТМИ требует знания семантического значения измерений ТМП. Для этого необходимо наличие исходной информации: программы телеизмерений, тарифовочных характеристик, что невозможно в случае получения информации от НТСК. Определение семантического значения ТМП, полученных из ТМИ НТСК, является нетривиальной задачей при отсутствии указанной исходной информации.

В настоящее время за достаточно продолжительный период обмена телеметрической информацией (ТМИ) между участниками договорных отношений накоплен значительный программно-методический и организационно-технический потенциал по обработке и анализу ТМП бортовых систем ОРКТ с целью вскрытия либо подтверждения значений летно-технических характеристик, реализованных при испытаниях ОРКТ. В условиях возможного

прекращения обмена ТМИ задача разработки подходов к формированию эталонов ТМП и автоматизированной классификации ТМП, полученных от НТСК, по базе указанных эталонов становится актуальной. При этом результат классификации должен обладать максимальной достоверностью при удовлетворительной оперативности получения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ

Задача классификации вновь полученных ТМП по базе эталонов формулируется в рамках моделей M_O объекта и M_{Π} процесса классификации, которые представляются в виде следующих множеств:

$$M_O = \{S, \Pi, L, \Phi\}; M_{\Pi} = \{Y, \Omega, P, \Pi, \mathfrak{R}\},$$

где S – множество типов ТМП, $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$, при этом S_0 – изображение гипотетического неизвестного типа ТМП;

Π – множество признаков классификации, как будет показано далее, $n = 29$, $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$;

L – множество интервалов значений признаков, установленных опытным или статистическим путем, каждый из которых определяет границы изменения признака $\pi_j \in \Pi$ в изображении классифицируемого типа $S_i \in S$, $L = \{l_{ij} | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$;

Φ – отображение, устанавливающее связь между множествами $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ и $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$, с одной стороны, и множеством $L = \{l_{ij} | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ – с другой, такое, что $l_{ij} = \Phi(S_i, \pi_j)$, $l_{ij} \in L$, $S_i \in S$, $\pi_j \in \Pi$, $\Phi: S \times \Pi \rightarrow L$;

Y – множество, элементами которого являются векторы классификации типов – векторы значений признаков $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$, $Y = \left\{ Y \mid Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T \right\}$;

Ω – алгебра событий, заданная на множестве $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$, в которой элементы R – это фазовые состояния (ФС) процесса классификации, определяющие степень текущей неопределенности в нашем знании типа анализируемого ТМП, $\Omega = \{R | R \subseteq S\}$;

P – вероятностная мера, заданная на $\Omega = \{R | R \subseteq S\}$, $P = \{P(R) | R \in \Omega\}$;

Π – множество процессов вычисления признаков $\pi_j \in \Pi$ и реализации отображения $\Phi: S \times \Pi \rightarrow L$, $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$, где процесс π_j – это комплекс вычислений, составляющих процессы оценивания элемента y_j вектора $Y \in Y$ и сопоставления (классификации) y_j с соответствующим интервалом $l_{ij} = \Phi(S_i, \pi_j)$, $l_{ij} \in L$, $S_i \in S$, $\pi_j \in \Pi$;

\mathfrak{R} – множество решений о типе S_i классифицируемых ТМП, $\mathfrak{R} = \{R_i | i = \overline{0, m}\}$.

Требуется при заданных исходных данных построить в виде орграфа G программу, определяющую состав и последовательность вычисления признаков $\pi_j \in \Pi$ для классификации ТМП по множеству изображений $S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$ типов ТМП, причем такую, что

$$\forall R_i \in \mathfrak{R}, \forall R_f \in \mathfrak{R} \setminus \{R_i\}, \forall S_i \in S, \forall S_f \in S \setminus \{S_i\}, R_i \neq R_f \Rightarrow S_i \neq S_f,$$

$$G = \arg \max_{x \in X} \{\overline{D}(G_x)\},$$

где $\overline{D}(G_x)$ – средняя достоверность в правильности принятого x -м вариантом синтезируемой программы G решения.

ПРИЗНАКИ КЛАССИФИКАЦИИ ТМП

Рассмотрим порядок формирования множества признаков классификации $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$.

Практические результаты идентификации смыслового значения ТМП при априорной недоступности программы телеизмерений бортовых систем ОРКТ позволили сформировать набор классификационных признаков. Набор охватывает параметрические и статистические признаки, характеризует первую и вторую производные ТМП и огибающие. Набор разбит на группы, в каждую группу входит несколько признаков.

Группа признаков №1. Группа содержит следующие признаки: ошибку аппроксимации измерений одного ТМП полиномом нулевой степени (признак №1), первой (признак №2) и второй (признак №3) степенями. Коэффициенты полинома рассчитываются по методу наименьших квадратов. Значение ошибки для признаков данной группы определяется по следующей формуле:

$$Pr_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \left(y(t_j)^{(\text{ТМП})} - y(t_j)^{(\text{МНК})} \right)^2}{N-1}}, \quad (1)$$

где $y(t_j)^{(\text{ТМП})}$ – исходное измерение ТМП;

$y(t_j)^{(\text{МНК})}$ – результат его аппроксимации полиномом соответствующей степени;

N – количество значений отсчетов ТМП;

j – номер значения;

i – номер признака классификации.

Основанием для использования данных признаков является необходимость учитывать при классификации временную запись ТМП. При этом отсутствует зависимость результата классификации от конкретной реализации телеметрируемого процесса, рассматривается только степень точности аппроксимации измерений ТМП функциями нулевой, первой и второй степеней. Это позволяет адаптировать процесс классификации к конкретной (заранее непредсказуемой) реализации результатов телеизмерений.

Группа признаков №2. Группа содержит следующие признаки: ошибку аппроксимации ранжированного множества значений ТМП полиномом нулевой степени (признак №4), первой (признак №5) и второй (признак №6) степенями. Ранжированным множеством значений является двумерный массив, первый столбец которого содержит значения исходного параметра, второй – частоту соответствующих значений параметра. Массив ранжируется по значениям первого столбца. Значение ошибки рассчитывает по формуле, аналогичной выражению (1). Основанием использования признаков данной группы является необходи-

мость отдельного учета при классификации интервала значений ТМП без учета поведения временной записи параметра.

Группа признаков № 3. Группа содержит следующие признаки: ошибку аппроксимации производной ТМП полиномом нулевой степени (признак № 7), первой (признак № 8) и второй (признак № 9) степенями. Значение ошибки рассчитывает по формуле, аналогичной выражению (1). Основанием использования признаков данной группы является необходимость учета вида изменения значений ТМП и постоянной составляющей.

Группа признаков № 4. Группа содержит следующие признаки: ошибку аппроксимации нижней огибающей ТМП полиномом нулевой степени (признак № 10), первой (признак № 11) и второй (признак № 12) степенями, ошибку аппроксимации верхней огибающей ТМП полиномом нулевой степени (признак № 13), первой (признак № 14) и второй (признак № 15) степенями. Нижняя огибающая параметра формируется путем включения в выходной массив локальных минимумов исходного параметра. Нижняя огибающая на момент времени первого измерения исходного параметра принимает значение первого минимума, на момент времени последнего измерения – значение последнего минимума. Тем самым обеспечивается равная длительность огибающих и исходных измерений. Верхняя огибающая параметра формируется путем включения в выходной массив локальных максимумов исходного параметра. Значение ошибки рассчитывает по формуле, аналогичной соотношению (1).

Группа признаков № 5. Группа содержит следующие признаки: дисперсию нижней (признак № 16) и верхней (признак № 17) огибающих. Основанием использования признаков групп № 4 и 5 является необходимость учета низкочастотной составляющей ТМП.

Группа признаков № 6. Группа содержит следующие признаки: ошибку аппроксимации длины кривой ТМП полиномом первой (признак № 18) и второй (признак № 19) степенями. Длиной кривой ТМП является двумерный массив, первый столбец которого содержит моменты времени значений измерений, второй – приращение евклидова расстояния относительно предыдущей точки траектории результатов измерений, которое вычисляется по формуле для гипотенузы прямоугольного треугольника. Элементы второго столбца $u_{\text{дл.крив}}(t_j)$ рассчитываются как

$$u_{\text{дл.крив}}(t_j) = u_{\text{дл.крив}}(t_{j-1}) + \sqrt{(y(t_j) - y(t_{j-1}))^2 + (t_j - t_{j-1})^2}, \quad u_{\text{дл.крив}}(t_0) = 0.$$

Значение ошибки рассчитывает по формуле, аналогичной выражению (1). Основанием использования признаков данной группы является необходимость учета высокочастотной составляющей параметра.

Группа признаков № 7. Группа содержит следующие статистические характеристики временного ряда измерений ТМП: среднее (признак № 20), медиану (признак № 21), моду (признак № 22), размах (признак № 23), энтропию (признак № 24), среднеквадратическое отклонение (признак № 25), коэффициент вариации (признак № 26), дисперсию (признак № 27), асимметрию (признак № 28), эксцесс (признак № 29). Здесь энтропия вычисляется по следующей формуле:

$$\Theta = - \sum_{j=1}^N P[y(t_j)] \log_2 P[y(t_j)],$$

где $P(y(t_j))$ – вероятность значения $y(t_j)$, определяемого как отношение частоты встречи данного значения к общему числу измерений.

Основанием использования признаков данной группы является необходимость учета статистических характеристик временного ряда значений ТМП.

Нормировка признаков. Для соблюдения корректности учета при классификации различных по размерности признаков необходимо провести их нормировку. Порядок расчета нормировочного коэффициента индивидуален для каждого признака. Признаки группы № 1

нормируются максимальным числом, кодируемым введенной (или определенной автоматически) разрядностью телеметрического слова (далее – максимальное кодируемое число). Признаки группы № 2 – общим числом измерений. Признаки группы № 3 – частным от деления максимального кодируемого числа на интервал дискретизации измерений параметра. Признаки групп № 4 и 5 – максимальным кодируемым числом. Признаки группы № 6 – квадратом максимального кодируемого числа. Признаки группы № 7 – произведением числа измерений и максимального кодируемого числа. Признаки группы № 7, а именно: среднее, медиана, мода, размах, СКО и коэффициент вариации, нормируются максимальным кодируемым числом. Энтропия нормируется количеством измерений. Дисперсия – квадратом максимального кодируемого числа. Асимметрия и эксцесс нормируются в пределах от 0 до 10.

Эталоны. Для проведения классификации необходимо сформировать изображения эталонов типов ТМП в виде интервалов возможных значений каждого признака классификации для каждого классифицируемого типа ТМП. В качестве эталонных ТМП необходимо использовать параметры бортовых систем ОРКТ.

Анализ динамики поведения ТМП ОРКТ позволяет сделать вывод об оправданности введения рассмотренного набора классификационных признаков, для ТМП различной динамики и вариации (в изменении от испытания к испытанию ОРКТ) целесообразно применять различные группы признаков. Так как признаки классификации дают результат с различной вероятностью ошибки, то процесс классификации может быть организован таким образом, чтобы конечный результат классификации обладал максимальной достоверностью. Данный показатель является важнейшим, особенно в рассматриваемой предметной области.

Таким образом, рассмотрен порядок формирования множества признаков классификации $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$.

МЕТОДИКА КЛАССИФИКАЦИИ

Рассмотрим порядок непосредственно классификации ТМП, т. е. нахождения программы G , определяющей последовательность вычисления признаков $\pi_j \in \Pi$ для классификации ТМП по множеству изображений $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ типов ТМП.

Очевидно, что использование визуальной классификации (с помощью эксперта) является неэффективным по причине большой трудоемкости задачи. Количество элементов данных, подлежащих классификации по многим ОРКТ, превышает тысячи, поэтому необходима автоматизация решения данной задачи.

Для классификации предлагается использовать подход на основе синтеза оптимальных информационно-поисковых систем, нашедших широкое применение при контроле и диагностировании бортовых систем космических средств [2–6]. Необходима модификация указанного подхода, обеспечивающая применимость разрабатываемой методики в условиях значительной неопределенности, свойственной предметной области, рассматриваемой в данной статье. В случае недоступности значительного количества априорной информации об испытанном (эксплуатируемом) ОРКТ, а именно программы телеизмерений, невозможно составить такое множество типов ТМП, которое включало бы все возможные типы. В такой ситуации проводить классификацию необходимо с условием ее правильного функционирования в случае принадлежности классифицируемого параметра к новому, заранее неизвестному типу. Новым типом будем называть тип, к которому ранее не относился ни один из классифицированных ТМП [7, 8]. Синтез программы классификации включает три этапа.

Этап 1. Оценивание погрешностей вычисления признака. Данный этап заключался в построении множества $\Sigma = \{\sigma(y_j) | j = \overline{1, n}\}$ среднеквадратических отклонений погрешности вы-

числения признаков из множества $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$. Для расчета среднеквадратического отклонения использован инструмент частных производных [9], максимальная ошибка оценивания значения ТМП принималась равной половине интервала квантования параметра.

Этап 2. Кластеризация и формирование изображений $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ типов ТМП в виде множества $L = \{l_{ij} | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$. Для расчета границ интервалов возможных (модельных) значений признаков классификации для каждого типа ТМП применялось правило (3) среднеквадратических отклонений. При вычислениях использовались данные статистической базы 20 ранее классифицированных экспертным способом реализаций ТМП.

Этап 3. Непосредственно построение условной, оптимальной по достоверности принимаемого решения программы G классификации типа ТМП. Данная программа определит порядок и условия вычисления признаков классификации π_j и сопоставления (классификации) результата вычисления y_j с соответствующим интервалом $l_{ij} = \Phi(S_i, \pi_j)$.

Для экономии объема статьи рассмотрим подробно только этап 3, схема этапа представлена на рис. 1 и состоит из шести шагов.



Рис. 1. Схема построения условной, оптимальной по достоверности принимаемого решения программы G классификации типа ТМП

Шаг 1. Построение алгебры событий $\Omega = \{R | R \subseteq S\}$, содержащей ФС процесса классификации.

Оценивание значения каждого признака π_j будет сопровождаться выполнением вычислительных операций. Вследствие выполнения таких операций появляется инструментальная и методическая погрешности вычисления реализации случайной величины y_j . Требуется синтезировать гибкую программу классификации типа ТМП, задающую состав признаков и последовательность их вычисления для распознавания каждого из изображений типов $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ с максимальной достоверностью. Синтезируемая программа должна правильно функционировать и в случае непринадлежности классифицируемого ТМП ни к одно-

му из изображений кластеризованных ранее типов $S = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$, т. е. она должна определять гипотетическое изображение нового типа объекта – S_0 .

Подмножество допустимых для вычисления признаков в фазовом состоянии R_k обозначается через Π_k и определяется из условия

$$\pi_j \in \Pi_k, \text{ если } (\exists S_i, S_f \in R_k) : (l_{ij} \cap l_{fj}) = \emptyset. \quad (2)$$

Исходом вычисления π_j в ФС R_k называется событие, заключающееся в определении принадлежности записанной реализации случайной величины y_j одному из выделенных интервалов Δ_{kj} на вещественном одномерном пространстве, соответствующему при пересечении нескольким $l_{ij}, i : S_i \in R_k$. Символом $(\omega_{kj} + 1)$ обозначается число возможных исходов вычисления, равное числу выделенных интервалов. Каждому интервалу Δ_{kj} присваивается порядковый номер ν , т. е. вводится обозначение Δ_{kj}^ν , причем примем положение, по которому $\nu = 0$ обозначает исход, соответствующий неизвестному типу ТМП S_0 . Соответственно, ν -й исход вычисления π_j обозначим через π_j^ν , определив его как событие $y_j \in \Delta_{kj}^\nu, \nu = \overline{0, \omega_{kj}}$.

Вычисление $\pi_j \in \Pi_k$ представляется как отображение, действующее по правилу

$$\pi_j : R_k \rightarrow R_{kj}^\nu, \text{ если } y_j \in \Delta_{kj}^\nu, \nu = \overline{0, \omega_{kj}}, \quad (3)$$

где $R_{kj}^\nu \subset R_k$ – подмножество, содержащее изображения $S_i \in R_k$ только таких типов ТМП, которым соответствуют пересекающиеся интервалы $l_{ij} \in L$ в выделенном подынтервале Δ_{kj}^ν , т. е.

$$R_{kj}^\nu = \left\{ S_i \in R_k \mid i : \bigcap_{\{i\}} l_{ij} \neq \emptyset \right\} \text{ и } \Delta_{kj}^\nu = \bigcap_{\{i : S_i \in R_{kj}^\nu\}} l_{ij}.$$

Следует отметить, что $l_{0j} \cap l_{ij} = \emptyset, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$.

Вероятность события $y_j \in \Delta_{kj}^\nu, \nu = \overline{0, \omega_{kj}}$ определяется по формуле

$$P_k \left(\pi_j^\nu \right) = P \left(y_j \in \Delta_{kj}^\nu \right) = \frac{|\Delta_{kj}^\nu|}{|\nabla_j|}, \quad (4)$$

где $\Delta_{kj}^\nu = \bigcap_{\{i : S_i \in R_{kj}^\nu\}} l_{ij}$, $\nabla_j = \bigcup_{\{i : S_i \in S\}} l_{ij}$, а знак $|\cdot|$ – размер соответствующего интервала, т. е. отношение (4) определяет вероятность попадания вычисленной реализации признака y_j в интервал Δ_{kj}^ν .

При ν -м исходе вычисления π_j из фазового состояния R_k образуется новое состояние R_{kj}^ν , содержащее меньшее число изображений $S_i \in R_{kj}^\nu$ подозреваемых типов ТМП, но в нем всегда присутствует изображение S_0 неизвестного типа. Данное изображение с очередным

вычислением $\pi_j \in \Pi_k$ будет изменять свои размеры за счет включения в себя исключенных после предыдущих вычислений изображений S_i .

Таким образом, при вычислении вероятности какого-либо исхода по формуле (4) знаменатель будет постоянным, т. е. при выполнении любой проверки количество элементов $S_i, i = \overline{0, m}$ в фазовом состоянии R_k будет уменьшаться, однако значение гиперобъема, соответствующего вершине любой подпрограммы, будет неизменным и равным ∇_j .

Общая формула для вычисления параметров изображения неизвестного типа ТМП S_0 в фазовом состоянии R_k будет следующей:

$$S_0 : \Delta_{kj}^0 = \nabla_j \setminus \left| \bigcap_{\substack{i: S_i \in R_k \\ i=1, m}} l_{ij} \right| : \Delta_{kj}^0 = |\nabla_j| - \left| \bigcap_{\substack{i: S_i \in R_k \\ i=1, m}} l_{ij} \right|,$$

т. е. при вычислении в ФС R_k значения признака π_j исходом, приводящим в неизвестное состояние S_0 , является тот исход, который приводит в интервал, не вошедший в подынтервалы, объединение которых соответствует R_k .

Чтобы реализовать рекуррентную процедуру выбора оптимальных признаков, необходимо определить множество $\Omega = \{R_k | R_k \subset S\}$ всех промежуточных фазовых состояний, которые могут возникнуть при различных исходах вычислений значений допустимых признаков $\pi_j \in \Pi_k$. Для этого осуществляется отображение каждого допустимого признака π_j на начальное фазовое состояние $R_k = S$, в результате чего согласно правилу (3) получим новое фазовое состояние $R_{kj}^v \subset R_k$ (среди них могут быть и конечные). Начальное фазовое состояние и полученные из него промежуточные состояния включаются в искомое множество Ω . Для каждого состояния $R_{kj}^v \subset \Omega$ определяется по формуле (2) подмножество допустимых признаков. Затем, заново осуществляя отображение вычислений допустимых признаков на соответствующее состояние R_{kj}^v по правилу (3), получим ряд новых фазовых состояний, которые также фиксируются как элементы множества Ω . Аналогичным образом вычислительный процесс продолжается до получения состояний, включающих не более двух элементов.

В результате выполнения описанной процедуры найдем все необходимые фазовые состояния $R_k \subseteq S$ и соответствующие им подмножества $\Pi_k \subseteq \Pi$ допустимых признаков.

Шаг 2. Вычисление безусловной вероятности ошибочности исходов проверки каждого допустимого признака во всех ФС.

Из-за инструментальных и методических погрешностей вычисленная реализация признака классификации y_j может быть отнесена к интервалу $\Delta_{kj}^u, u = \overline{0, \omega_{kj}}$, когда фактически она принадлежит интервалу $\Delta_{kj}^v, v = \overline{0, \omega_{kj}}, u \neq v$. В этом случае будет зафиксировано фазовое состояние R_{kj}^u , т. е. произойдет ошибка.

Определим условную вероятность того, что в итоге классификации будет зафиксировано именно фазовое состояние R_{kj}^v , когда измеренная реализация находится в соответствующем интервале Δ_{kj}^v для $v = \overline{0, \omega_{kj}}$:

$$d_{kj}^v = P \left[\frac{R_{kj}^v}{(y_j \in \Delta_{kj}^v)} \right].$$

Условная вероятность того, что будет зафиксировано фазовое состояние R_{kj}^u , в то время как фактическое значение y_j принадлежит интервалу Δ_{kj}^v , будет составлять

$$\eta_{kj}^{vu} = P \left[\frac{R_{kj}^u}{(y_j \in \Delta_{kj}^v)} \right].$$

Вероятность d_{kj}^v является достоверностью исхода классификации в фазовом состоянии R_k , а η_{kj}^{vu} – условной вероятностью ошибочного решения (ошибок первого и второго рода) при вычислении π_j в R_k . Тогда в соответствии с полученными выражениями

$$d_{kj}^v = 1 - \sum_{\substack{u=0 \\ u \neq v}}^{\omega_{kj}} \eta_{kj}^{vu}, \quad v = \overline{0, \omega_{kj}}. \quad (5)$$

Для определения условной вероятности ошибочного решения η_{kj}^{vu} примем следующее утверждение. Пусть в упрощенном виде наблюдаемое значение y представляет собой аддитивную смесь истинного значения параметра y^* и погрешности вычисления δ :

$$y = y^* + \delta.$$

Значение признака классификации y для каждого типа ТМП описывается в целях упрощения расчетов без принципиального снижения адекватности равномерной плотностью распределения $f(y)$, вероятность ошибки вычисления значения y – нормальной (гауссовой) плотностью $f(e)$. Ошибки не произойдет в том случае, если истинное значение параметра y^* находится в пределах заданного интервала $[y_n; y_b]$. Однако вычисленное значение признака y может находиться как внутри, так и за границами этого интервала (рис. 2). Возникающая при этом ошибка является ошибкой первого рода α (рис. 2,а, б). Аналогично можно проиллюстрировать ошибку второго рода β (рис. 2,в).

Для определения достоверности исхода классификации выдвинем две гипотезы: основную H_v – вычисленное значение y_j находится в интервале, соответствующем рассматриваемому исходу Δ_{kj}^v , и альтернативную H_f – y_j находится вне этого интервала. Предположение о том, какая из гипотез верна, делается на основании вероятности попадания значения y_j в интервал Δ_{kj}^v по формуле

$$P(y_j \in \Delta_{kj}^v) = \int_{\Delta_{kj}^v} f(y_j) dy_j.$$

Если данная вероятность – наибольшая из вероятностей попадания значения y_j в интервалы, соответствующие исходам $\hat{\pi}_j: S_i \in R_{kj}^v$, то верна гипотеза H_v , в ином случае – альтернативная H_f . В случае, если верна основная гипотеза H_v , а по результатам вычислений признака π_j принимается альтернативная гипотеза H_f , допускается ошибка первого рода,

вероятность которой обозначим $\eta_{kj}^{uv} = \alpha_j^v$, в противном случае – ошибка второго рода, вероятность которой обозначим $\eta_{kj}^{uv} = \beta_j^v$.

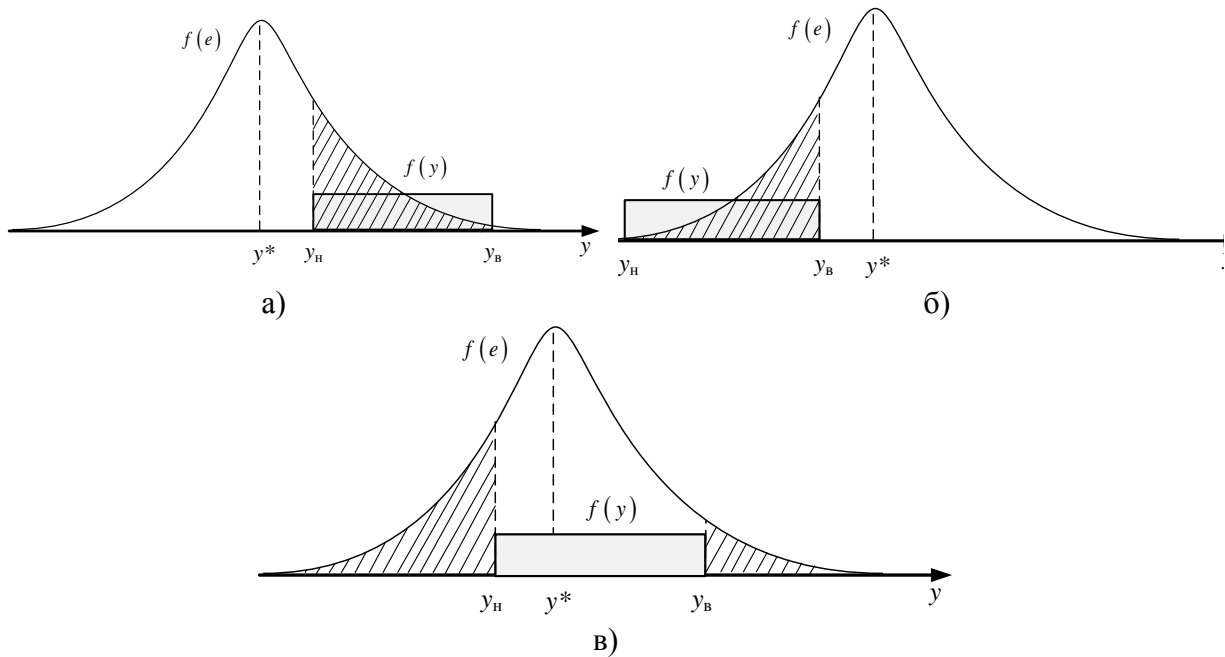


Рис. 2. Графическая интерпретация вычисления ошибки первого (а, б) и второго рода (в)

Искомые значения вероятностей α_j^v и β_j^v ошибок вычисления значения j -го признака π_j первого и второго рода могут быть формально получены следующим образом:

$$\alpha_j^v = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \left(\frac{1}{(y_H - y_H^*)} \int_{y_H^*}^{y_H} \int_{y_H}^{y_B} e^{-\frac{(y-y^*)^2}{2\sigma_j^2}} dy dy^* + \frac{1}{(y_B^* - y_B)} \int_{y_B^*}^{y_B} \int_{y_H}^{y_B} e^{-\frac{(y-y^*)^2}{2\sigma_j^2}} dy dy^* \right); \quad (6)$$

$$\beta_j^v = \frac{1}{(y_B - y_H)} \int_{y_H}^{y_B} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \int_{y_H}^{y_B} e^{-\frac{(y-y^*)^2}{2\sigma_j^2}} dy \right) dy^*. \quad (7)$$

В данных формулах:

– множители перед знаками интеграла являются нормировочными и введены для усредне-

ния значения вероятности $\int_{y_H}^{y_B} e^{-\frac{(y-y^*)^2}{2\sigma_j^2}} dy$ по переменной y на интервалах $[y_H^*; y_H]$, $[y_B; y_B^*]$ в

формуле (6) и $[y_H; y_B]$ в формуле (7). Основанием введения множителей является известная формула вероятности $F(x)$ равномерно распределенной на интервале $[a; b]$ случайной вели-

чины x : $F(x) = \int_a^b f(x) dx$, где $f(x)$ – плотность распределения величины x ,

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)} \text{ при } x \in [a; b];$$

– величины y_H и y_B соответствуют значениям левой и правой границ интервала $\Delta_{kj}^v, v = \overline{0, \omega_{kj}}$;

– величины y_H^* и y_B^* соответствуют значениям левой и правой границ области усреднения. Точное задание указанных величин необходимо по причине численного вычисления формул (6) и (7). При прикладных расчетах целесообразно выбирать $y_H^* = y^* - 3\sigma_j$ и $y_B^* = y^* + 3\sigma_j$.

Формулы (6) и (7) позволяют вычислить средние значения вероятностей ошибок первого и второго рода при всевозможных результатах вычислений π_j . Их решение осуществляется в приближенном виде численным методом.

Поскольку в результате вычислений π_j возможны $(\omega_{kj} + 1)$ исходов или гипотез, то число ошибочных гипотез равно ω_{kj} , причем их вероятность $P_k \left(\pi_j^v \right)$ неодинакова.

Пусть вычисленная реализация y_j принадлежит интервалу $\Delta_{kj}^v, v = \overline{0, \omega_{kj}}$. Обозначим через H_v гипотезу, подтверждающую это событие. Все ошибочные гипотезы сведем к одной – H_f . Гипотеза H_f означает ошибочное решение о принадлежности y_j интервалу

$$\Delta_{kj}^f = \bigcup_{\{f=\overline{0, \omega_{kj}}, v \neq f\}} U_{ij}.$$

Рассмотрим гипотезу H_v одновременно с гипотезой H_f . Если выполняется условие

$$P_k \left(\pi_j^v \right) \geq \sum_{\substack{f=0 \\ f \neq v}}^{\omega_{kj}} P_k \left(\pi_j^f \right), \text{ то гипотезу } H_v \text{ будем считать основной, а гипотезу } H_f \text{ – альтерна-}$$

тивной. В противном случае основной будем считать гипотезу H_f .

Безусловная вероятность ошибок вычисляется по следующей формуле:

$$\eta_{kj}^f = \sum_{\substack{u=0 \\ u \neq v}}^{\omega_{kj}} \eta_{kj}^{uv}, \quad (8)$$

где η_{kj}^{uv} вычисляется или по формуле (6), или по формуле (7) в зависимости от того, какая гипотеза основная, а какая – альтернативная. По формуле (5) вычисляется достоверность v -го исхода проверки. Аналогичным образом рассматриваются все остальные исходы вычислений π_j , и определяется достоверность каждого из них.

Шаг 3. Вычисление достоверности проверки каждого допустимого признака во всех ФС.

Для оценивания средней достоверности всех исходов вычислений π_j находится взвешенная сумма достоверностей отдельных исходов, где в качестве весового коэффициента выступает вероятность каждого исхода

$$\bar{d}_k \left(\pi_j \right) = \sum_{v=0}^{\omega_{kj}} d_{kj}^v P_k \left(\pi_j^v \right). \quad (9)$$

Синтезируемую программу необходимо представить в виде ориентированного графа G , вершинам которого соответствуют фазовые состояния, а дуги – исходам π_j^v вычислений признаков. Начальная вершина графа обозначает начальное фазовое состояние $R = S$, а тупиковые вершины – конечные фазовые состояния $R_i = \{S_i\}, i = \overline{0, m}$. Общее число ветвей в синтезируемой программе при использовании в качестве признаков классификации ТМП интервальных оценок может значительно превосходить число $(m+1)$ распознаваемых типов ТМП, поскольку в одно и то же фазовое состояние R_i могут приводить несколько ветвей.

Выделим в графе G любую вершину R_k вместе с выходящими из нее путями и областью достижимости. Выделенную часть G_k графа назовем R_k -подпрограммой, в которой вершина R_k будет соответствовать начальному фазовому состоянию, а выходящие из нее пути – ветвям этой подпрограммы. Каждая ветвь R_k -подпрограммы есть продолжение одной из ветвей всей программы, проходящей через вершину R_k .

Количество изображений $S_i \in S$ типов ТМП, входящих в фазовое состояние R_k , обозначим через $\tau = 2, 3, \dots, m+1$. Через $\overline{D}_k^{(\tau)}(\pi_j)$ обозначим достоверность $R_k^{(\tau)}$ -подпрограммы, начинающейся вычислением признака $\pi_j \in \Pi_k$.

Поскольку в конечных фазовых состояниях $R_i = \{S_i\}, i = \overline{0, m}$, проверки уже не выполняются, тогда

$$\overline{D}_r^{(1)} = \overline{D}_r^{(1)}(\pi_j) = 1, r = \overline{0, m}, j = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Любое из вычислений $\pi_j \in \Pi_k$ в фазовом состоянии $R_k^{(2)}$ переводит это состояние в два конечных состояния $R_i \in \mathfrak{R}$, которые соответствуют принимаемому решению о типе испытанного объекта. Тогда с учетом формул (9) и (10) для достоверности $R_k^{(2)}$ -подпрограммы получаем

$$\overline{D}_k^{(2)}(\pi_j) = \sum_{v=0}^{\omega_{kj}} d_{kj}^v P_k(\pi_j^v) \overline{D}_r^{(1)}. \quad (11)$$

В общем случае для любой $R_k^{(\tau)}$ -подпрограммы, $\tau = \overline{2, m+1}$, справедливо выражение

$$\overline{D}_k^{(\tau)}(\pi_j) = \sum_{v=0}^{\omega_{kj}} d_{kj}^v P_k(\pi_j^v) \overline{D}_r^{(s)}(\pi_f), \tau = \overline{2, m+1}, s < \tau. \quad (12)$$

Формула (12) представляет собой рекуррентное выражение для вычисления достоверности $R_k^{(\tau)}$ -подпрограммы по принципу динамического программирования. Для вычисления в фазовом состоянии $R_k^{(\tau)}$ на каждом шаге расчета выбирается оптимальный по достоверности признак классификации π_j из условия

$$\pi_j = \arg \max_{\pi_j \in \Pi_k} \left\{ \overline{D}_k^{(\tau)}(\pi_j) \right\}, \tau = \overline{2, m+1}. \quad (13)$$

Шаг 4. Формирование основной части искомой программы.

На первом шаге реализации рекуррентной процедуры рассмотрим фазовое состояние $R_k^{(3)}$, мощность равна трем, так как добавляется S_0 . Промежуточное состояние мощностью в три

конечных состояний, одно из которых S_0 – это минимальное по мощности промежуточное фазовое состояние. Состояние S_0 присутствует в каждом неконечном состоянии, оно включается независимо от исхода предыдущей проверки. При вычислении любого признака $\pi_j \in \Pi_k$ из состояния $R_k^{(3)}$ образуются только конечные состояния $R_i, i: S_i \in R_k^{(3)}$, причем одно $S_i = S_0$, для которых $\bar{D}_k^{(3)} = 1$. В соответствии с формулой (11) определяется по каждому из признаков $\pi_j \in \Pi_k$ достоверность $\bar{D}_k^{(3)}(\pi_j)$, а по условию (13) выбирается оптимальный для вычисления признак. Таким образом, достоверность $R_k^{(3)}$ -подпрограммы зависит лишь от достоверностей d_{kj}^V исходов и от их вероятностей. Далее переходим ко второму шагу – выбору оптимальных признаков в состояниях $R_k^{(4)} \in \Omega$.

Для каждого из ФС $R_k^{(4)}$ определяются состояния, которые образуются при различных исходах вычислений $\pi_j \in \Pi_k$. Среди них не может быть состояний, содержащих более двух элементов. А для каждого из ФС $R_k^{(3)}$ уже определены оптимальная проверка и соответствующее значение средней достоверности $\bar{D}_k^{(3)}(\pi_j)$. Рассчитаем, используя выражения (6) и (7), значения достоверности исходов вычислений $\pi_j \in \Pi_k$ и вероятностей ошибок. Определив по формуле (12) значения $\bar{D}_k^{(4)}(\pi_j)$ для всех $\pi_j \in \Pi_k$, выберем оптимальный для проверки признак π_j по условию (13).

Изложенный порядок выбора оптимальных признаков сохраняется и на последующих шагах, причем на каждом из них рекуррентно используются результаты вычислений, полученные на предшествующих шагах.

На последнем шаге выбирается оптимальный признак π_j для начального фазового состояния $R_k^{(m+1)} = S$, которому соответствует значение $\bar{D}_k^{(m+1)}(\pi_j)$ достоверности $R_k^{(m+1)}$ -подпрограммы. Этот признак является первым вычисляемым признаком синтезируемой программы. Затем определяются новые фазовые состояния, количество которых равно числу исходов выбранной проверки. Соответствующие найденным состояниям оптимальные признаки так же включаются в синтезируемую программу. По ним определяются последующие фазовые состояния, и в аналогичном порядке процесс продолжается до получения всех конечных состояний $R_i \in \mathfrak{R}, i = \overline{0, m}$.

Обозначим множество всех возможных ветвей основной части программы через U , а каждую отдельную ветвь – через $G_r^{(c_r)} \in U$, где r – ее порядковый номер, c_r – количество вычислений в ветви. Таким образом, U – основная часть искомой программы.

Шаг 5. Формирование множества и расчет достоверности проверок признаков для дополнительной части искомой программы.

Каждая ветвь синтезируемой программы должна состоять из n элементов – вычислений $\pi_j, j = \overline{1, n}$. Поэтому необходимо дополнить каждую ветвь проверками неиспользованных в данной ветви признаков классификации. Решение $R_0 \in \mathfrak{R}$ после очередных вычислений исключает необходимость дальнейших действий.

Каждая ветвь $G_r^{(c_r)} \in U$ есть последовательность случайных исходов π_j^v соответствующих вычислений π_j , выполняемых при реализации данной ветви, а поэтому сама ветвь – также случайное событие, она характеризуется вероятностью $P(G_r^{(n)})$.

Обозначим через $\Pi_r^{(c_r)} \subseteq \Pi, c_r \in [1, n]$ упорядоченное множество признаков классификации, входящих в ветвь $G_r^{(c_r)}$ и выбранных по правилу (3). Обозначим через $\Pi_r^{(n-c_r)} \subset \Pi$ множество признаков, не вошедших в ветвь $G_r^{(c_r)}$ графа. Исходы таких вычислений образуют продолжение ветви $G_r^{(c_r)}$, обозначаемое через $G_r^{(n-c_r)}$, причем $G_r^{(c_r)} + G_r^{(n-c_r)} = G_r^{(n)}$, $j = \overline{1, n}$. Проверка признаков $\Pi_r^{(n-c_r)} \subset \Pi$ составит дополнительную часть искомой программы.

Анализируя реализовавшуюся при классификации типа ТМП ветвь $G_r^{(c_r)}$, можно сделать предположение, что по признакам $\{\pi_j | \pi_j \in \Pi_r^{(c_r)}\}$, входящим в эту ветвь, анализируемый ТМП принадлежит типу, соответствующему принятому решению $R_i \in \mathfrak{R}, i = \overline{0, m}$. Далее необходимо выполнять вычисления признаков из множества $\Pi_r^{(n-c_r)}$.

Таким образом, $\{\pi_j | \pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}\} = \Pi \setminus \{\pi_j | \pi_j \in \Pi_r^{(c_r)}\}$, $j = \overline{1, n}$.

Вычисления признаков классификации $\pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}$ необходимо выполнять в начальном фазовом состоянии $S_r^{(i)}$, которое состоит из двух элементов: S_{i_r} , соответствующего принятому решению $R_i \in \mathfrak{R}$ в результате реализации r -й ветви $G_r^{(c_r)}$ орграфа G , и S_0 , объединяющего изображения всех типов за исключением S_{i_r} , т. е.

$$S_r^{(i)} = \{S_{i_r}, S_0\}, \quad (14)$$

где $S_0 = \left(\bigcup_{f=0, m} S_{f_r} \right) \setminus S_{i_r}, i = \overline{1, m}$.

При этом длины подынтервалов определяются для приводящего в S_{i_r} исхода по формуле $|\Delta_{i_r, j}^1| = |I_{i_r, j}|$ и для приводящего в S_0 исхода по формуле $|\Delta_{i_r, j}^0| = |\nabla_j| - |\Delta_{i_r, j}^1|$. Порядок вычислений $\pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}$ не имеет значения, так как они выполняются в одном фазовом состоянии $S_r^{(i)}$. Все получаемые в результате вычислений $\pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}$ исходы π_j^v должны подтверждать полученное по орграфу G решение $R_i \in \mathfrak{R}$, т. е. исходы $\pi_j^v, \left\{ \pi_j | \pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)} \right\}$ должны приводить в S_{i_r} . Если хотя бы один исход $\pi_j^v, \left\{ \pi_j | \pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)} \right\}$ не приводит в конечное фазовое состояние орграфа $R_i = \{S_{i_r}\}, i = \overline{1, m}$, а приводит к решению $R_0 = S_0$, то следует сделать вывод о том, что по соответствующему признаку классификации π_j анализируемый

ТМП не принадлежит к типу с изображением $R_i = \{S_i\}, i = \overline{1, m}$, т. е. не удовлетворяет требованиям к типу ТМП – конечному фазовому состоянию орграфа G .

В результате будут определены упорядоченные множества $\Pi_r^{(n)}$ признаков $\pi_j \in \Pi$, задающие очередность их вычисления для классификации любого типа ТМП $S_i \in S, i = \overline{0, m}$.

Шаг 6. Оценивание достоверности принимаемого искомой программой решения.

Достоверность подпрограммы, начинающейся в начальном фазовом состоянии $S_r^{(i)}$ с вычисления π_j из множества $\Pi_r^{(n-c_r)}$, определяется по формуле

$$\overline{D}_{(i_r)}^{(2)}(\pi_j) = \sum_{v=0}^1 d_{(i_r)j}^v P_{(i_r)}(\pi_j^v), \pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}, \quad (15)$$

где $d_{(i_r)j}^v$ – достоверность v -го исхода j -го вычисления признака $\pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}$ в начальном фазовом состоянии $S_r^{(i)}$;

$P_{(i_r)}(\pi_j^v)$ – вероятность данного исхода.

Оценим достоверность синтезированной программы полностью. Поскольку исходы π_j^v , входящие в ветвь $G_r^{(n)} = G_r^{(c_r)} + G_r^{(n-c_r)}$, являются статистически независимыми событиями, то они обладают свойствами марковского процесса, поэтому

$$P(G_r^{(c_r)}) = \prod_{\pi_j \in \Pi_r^{(n)}} P_k(\pi_j^v), v = \overline{0, \omega_{kj}},$$

где $\Pi_r^{(c_r)}$ – множество вычислений признаков π_j , входящих в r -ю ветвь $G_r^{(c_r)}$ программы.

Тогда по формуле о математическом ожидании дискретной случайной величины для средней достоверности \overline{D} принимаемого синтезируемой программой решения $R_i \in \mathfrak{R}$ о типе ТМП получим

$$\overline{D} = \sum_{r=1}^{h_{\text{тр}}} \left(P(G_r^{(c_r)}) \left(\prod_{\pi_j \in \Pi_r^{(c_r)}} d_{kj}^v \right) \prod_{\pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}} \overline{D}_{(i_r)}^{(2)}(\pi_j) \right), \quad (16)$$

где $h_{\text{тр}}$ – количество ветвей в синтезированном по правилу (13) орграфе.

Раскрывая слагаемые в формуле (16), получим

$$\overline{D} = \sum_{r=1}^{h_{\text{тр}}} \left(P(G_r^{(c_r)}) \left(\prod_{\pi_j \in \Pi_r^{(c_r)}} d_{kj}^v \right) \prod_{\pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}} \left(\sum_{v=0}^1 d_{(i_r)j}^v P_{(i_r)}(\pi_j^v) \right) \right). \quad (17)$$

Формулу (17) можно преобразовать в вид

$$\overline{D} = \sum_{r=1}^{h_{\text{тр}}} P(G_r^{(c_r)}) \left(\prod_{\pi_j \in \Pi_r^{(c_r)}} d_{kj}^v \right) \prod_{\pi_j \in \Pi_r^{(n-c_r)}} \overline{D}_{(i_r)}^{(2)}(\pi_j). \quad (18)$$

Если множество $\Pi_r^{(n-c_r)}$ пустое, то соответствующая по r достоверность $\overline{D}_{(i_r)}^{(2)}(\pi_j)$ будет равна 1.

Синтезированная условная программа G является оптимальной по выбранному критерию, а именно, она задает последовательность вычислений признаков классификации $\pi_j \in \Pi$ для определения типа ТМП $S_i \in S, i = \overline{0, m}$ с максимальной достоверностью \overline{D} при представлении признаков в виде оценок на множестве интервалов $L = \{l_{ij} \mid i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ

Реализация данной методики проводилась на основе реальных ТМП. Статистическая база расчетов при формировании эталонов ТМП содержала ранее классифицированные экспертным способом реализации параметров следующих наиболее важных типов:

- 1) давление в камере двигательной установки первой ступени ОРКТ;
- 2) давление второй ступени;
- 3) давление третьей ступени;
- 4) угловая скорость в плоскости тангажа;
- 5) угловая скорость в плоскости крена;
- 6) угловая скорость в плоскости рыскания;
- 7) модуль линейного ускорения в инерциальной системе координат;
- 8) модуль линейной скорости в инерциальной системе координат;
- 9) модуль линейного перемещения в инерциальной системе координат.

Таким образом, множества исходных данных приняли следующий вид: $S = \{S_i \mid i = \overline{0, 9}\}$ и $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, 29}\}$, где S_0 содержит ТМП, не относящийся ни к одному из $S_i \mid i = \overline{1, 9}$, которые, в свою очередь, соответствуют эталонным типам ТМП (см. выше). Классификационные признаки множества Π – классификационные признаки № 1 – 29 групп № 1–7.

Графический вид фрагмента синтезированной программы $G = \arg \max_{x \in X} \{\overline{D}(G_x)\}$ представлен на рис. 3,а. Целесообразно отметить, что принципиальным отличием рассматриваемой в статье методики от предложенной в работах [3] А.К. Дмитриева является учет возможности классификации ранее не наблюдавшегося типа ТМП S_0 . На рис. 3,б показан фрагмент программы классификации ТМП по известной методике синтеза условной программы диагностирования технической системы, оптимальной по достоверности принимаемого решения.

Анализ рис. 3,а и б позволяет сделать вывод о том, что указанная возможность достигается введением в каждое фазовое состояние, и в начальное, и в промежуточные, гипотетического типа ТМП S_0 , а также учетом достоверности отнесения классифицируемого ТМП к нему в вычислениях, что показано «жирными» линиями на рис. 3,а.

Расчеты по формуле (18) показывают, что достоверность \overline{D} принимаемого решения о типе классифицируемого ТМП по предложенной в статье методике составляет около 0,90, достоверность принимаемого решения о типе классифицируемого ТМП с использованием применяемого на практике в настоящее время методического аппарата безусловной «жесткой» классификации составляет величину 0,82. Таким образом, повышение показателя качества классификации составляет величину порядка 8%.

Следует отметить, что достоверность принимаемого решения по программе, синтезированной по известной методике [3], составляет величину 0,93. Однако напомним, что особенности решаемой задачи требуют предусматривать возможность классификации ТМП нового типа, ранее не наблюдавшегося.

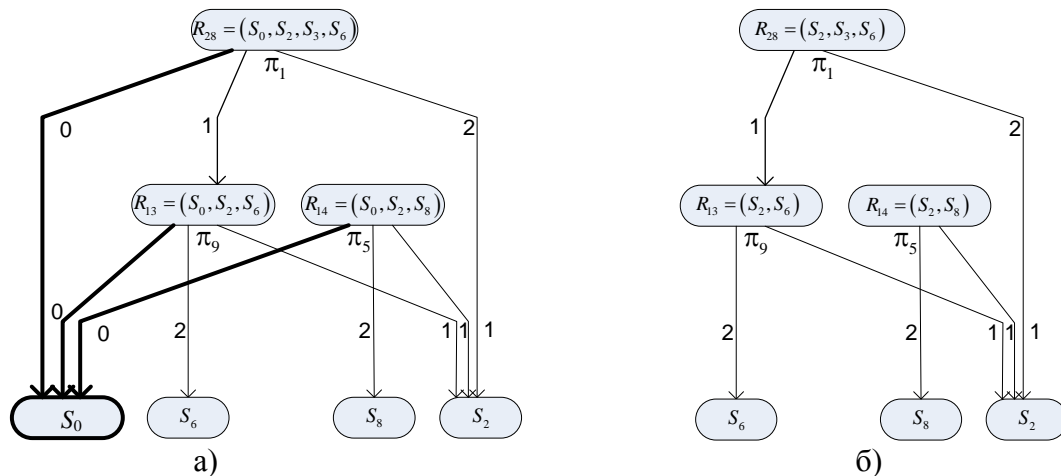


Рис. 3. Граф фрагмента синтезированной программы G , созданный по предложенной методике (а) и по известной методике (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в статье методический аппарат позволяет проводить классификацию ТМП по базе эталонов с максимальной достоверностью принимаемого решения. Прикладное применение аппарат находит в задачах подготовки исходных данных для идентификации типа бортовых систем ОРКТ, для которых по объективным причинам является недоступной программа телеметрических измерений. В таких случаях возникает необходимость проводить классификацию большого количества ТМП по типам параметров, характеризующих движение объекта измерений, функционирование его бортовых систем, выполнение целевых задач.

Принципиальной особенностью рассмотренного методического аппарата является возможность его использования в случаях, когда множество подозреваемых эталонов ТМП не является полным. В процессе классификации существует возможность получения для классификации параметра, не относящегося ни к одному из ранее сформированных типов. Данное свойство аппарата является отличием от известной методики А.К. Дмитриева синтеза условных, гибких программ диагностирования технических систем, оптимальных по достоверности принимаемого решения.

Практическая реализация показала повышение достоверности результата классификации ТМП на 8% по сравнению с применяемым в настоящее время подходом на основе «жесткого» безусловного порядка классификации.

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на разработке гибкой программы классификации ТМП, оптимальной по критерию оперативности принимаемого решения, учитывающей особенности предметной области решаемой задачи.

Список используемых источников

1. Договор между Российской Федерацией и Соединенными Штатами Америки о мерах по дальнейшему сокращению и ограничению стратегических наступательных вооружений. – URL: <http://kremlin.ru/supplement/512> (дата обращения: 05.11.2019).

2. Дмитриев А.К., Копкин Е.В. Оценка достоверности проверок непрерывных признаков при диагностировании технических объектов // Известия вузов. Приборостроение. – 1999. – Т. 42, № 9. – С. 3–10.

3. *Дмитриев А.К., Копкин Е.В.* Синтез гибкой оптимальной по достоверности программы диагностирования технического объекта // Известия вузов. Приборостроение. – 2000. – Т. 43, № 7. – С. 16–27.

4. *Копкин Е.В., Кобзарев И.М.* Оптимальный алгоритм анализа технического состояния объекта на основе меры ценности диагностической информации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 661. – С.15–32.

5. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем / Е.В. Копкин и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 303 с.

6. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В.* Новые информационные технологии мониторинга и управления состояниями сложных технических объектов в реальном масштабе времени // Труды СПИИРАН. – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 249–265.

7. *Шмелев В.В., Дмитриев А.К., Каргин В.А.* Подготовка данных для идентификации состояния объектов ракетно-космических комплексов в условиях неопределенности исходной информации // Сборник алгоритмов и программ типовых задач / под ред. И.А. Кудряшова. – 2006. – Вып. 25. – С. 3–23.

8. *Шмелев В.В., Дмитриев А.К., Каргин В.А.* Синтез оптимальной по достоверности программы идентификации состояния объектов ракетно-космических комплексов в условиях неопределенности исходной информации // Сборник алгоритмов и программ типовых задач / под ред. И.А. Кудряшова. – 2006. – Вып. 25. – С. 24–42.

9. *Новицкий П.В., Зоограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1999.

А.В. Калюжный;
В.В. Тимофеев,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ

Предложен подход к упрощению целевой функции для решения задач оптимального резервирования восстанавливаемых вычислительных комплексов, позволяющий уменьшить объем вычислений в задачах оптимального резервирования восстанавливаемых систем за счет использования в качестве целевой функции показателя надежности восстанавливаемой системы. В результате его применения в большинстве практических задач оптимального резервирования можно получать аналитические выражения для целевых функций, что особенно важно для динамически перестраиваемых вычислительных комплексов, функционирующих в режиме реального времени.

Ключевые слова: вычислительный комплекс, задача оптимального резервирования, упрощение целевой функции, надежность.

ВВЕДЕНИЕ

Повышению надежности вычислительных комплексов (ВК) автоматизированных систем (АС) военного назначения (ВН) на этапе эксплуатации всегда уделяется большое внимание, поскольку ВК являются их основным информационным звеном. Одним из наиболее результативных способов повышения надежности ВК можно считать резервирование. При этом резервироваться может как аппаратная составляющая ВК, так и их программное обеспечение. В случае аппаратного резервирования на этапе эксплуатации создаются многомашинные комплексы, допускающие отказ одной или нескольких вычислительных машин. При резервировании программного обеспечения копии программных приложений размещаются в вычислительных машинах многомашинного комплекса.

С математической точки зрения задача оптимального резервирования сводится к задаче целочисленной оптимизации по одному или нескольким критериям с множеством ограничений. В задачах целочисленной оптимизации большое значение имеет вычислительная сложность целевой функции, поскольку в процессе решения задачи целевая функция вычисляется многократно. Поэтому упрощение целевой функции можно отнести к одной из проблем целочисленной оптимизации.

По специфике функционирования ВК АС ВН являются восстанавливаемыми системами, так как в процессе эксплуатации отказавшие аппаратные элементы заменяются новыми или восстанавливаются в процессе ремонта, а работоспособность отказавших программных приложений восстанавливается их перезапуском. В связи с этим логично было бы в качестве целевой функции в задачах оптимального резервирования ВК использовать один из показателей для восстанавливаемых систем, например коэффициент готовности. Однако получение аналитических выражений для показателей надежности восстанавливаемых систем, в том числе и для коэффициента готовности, довольно затруднительно и связано с решением систем дифференциальных или алгебраических уравнений каждый раз, когда меняется структура резервированной системы. Использование для целевой функции имитационной модели вряд ли упростит ее вычислительную сложность, но добавит проблему определения

ее точности. Возможным способом упрощения целевой функции в задачах оптимального резервирования ВК может быть использование выражений для показателей надежности систем, работающих до первого отказа, например, вероятность безотказной работы.

УПРОЩЕНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ВК

Утверждение. Пусть нерезервированная система имеет надежностную структуру C_0 . С целью повышения надежности ее функционирования в структуру C_0 по некоторой схеме введены резервные элементы так, что структура изменилась на C_1 . По другой схеме в эту же нерезервированную структуру C_0 также введены резервные элементы так, что структура изменилась на C_2 . Если надежностные характеристики структуры C_2 лучше характеристик структуры C_1 в режиме до первого отказа системы (без восстановления отказавших элементов), то это справедливо и для режима с восстановлением отказавших элементов системы.

Покажем справедливость данного утверждения.

Плотность распределения времени до отказа (частота отказов) объекта $f(t)$, являющаяся показателем надежности его функционирования в режиме до первого отказа, связана с параметром потока отказов $\omega(t)$, который является показателем надежности его функционирования в режиме с восстановлением, уравнением Вольтера второго рода [1, 3, 4]

$$f(t) = \omega(t) - \int_0^t f(t-x)\omega(x)dx. \quad (1)$$

Так как функция $f(x)$ для законов распределения времени до отказа, используемых в теории надежности, непрерывна на интервале $[0, \infty)$, то уравнение имеет единственное решение. Для вычисления интеграла в выражении (1) применим метод трапеций. Тогда для моментов времени $t_i = i\Delta t$ получим следующие уравнения [2, 5, 6]:

$$\begin{aligned} i = 0: f(0) &= \omega(0); \\ i = 1: f(\Delta t) &= A\omega(\Delta t); \\ i \geq 2: f(i\Delta t) &= A\omega(i\Delta t) - AB \sum_{j=1}^{i-1} f((i-j)\Delta t)\omega(j\Delta t); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } A = \frac{2 - \Delta t f(0)}{2 + \Delta t f(0)}, B = \frac{2\Delta t}{2 + \Delta t f(0)}.$$

Из выражений (2) видно, что плотность распределения времени до отказа $f(t)$ объекта, работающего в режиме до первого отказа, пропорциональна параметру потока отказов $\omega(t)$ этого же объекта, работающего в режиме с восстановлением, что подтверждает справедливость *утверждения*.

ПРИМЕР ПОСТАНОВКИ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ВК

Задача оптимального резервирования аппаратной составляющей ВК может быть сформулирована в следующем виде.

Пусть ВК состоит из n вычислительных машин $C_j (j=1, 2, \dots, n)$ с параметрами $C_j \{\lambda_j, \mu\}$, где λ_j – интенсивность отказа вычислительной машины, μ – интенсивность ее восстановления после отказа. С целью повышения надежности ВК основные вычислительные машины C_j резервируются такими же резервными машинами C_j^* , работающими в том же режиме, что и основные. Необходимо так распределить резервные машины C_j^* между основными машинами C_j , чтобы надежность ВК была максимальной при ограничении на общее число резервных машин m .

С целью наглядности и простоты изложения рассмотрим решение поставленной задачи для $n = 2$ и $m = 1$. Надежностная структурная схема такого ВК показана на рис. 1.

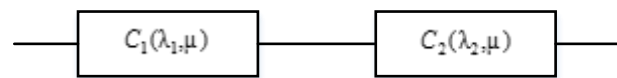


Рис. 1. Надежностная структурная схема нерезервированного ВК

При общем числе резервных машин, равном единице ($m = 1$), возможны два варианта резервирования данного ВК. В первом варианте зарезервирована машина C_1 (рис. 2, а), а во втором – вторая C_2 (рис. 2, б).

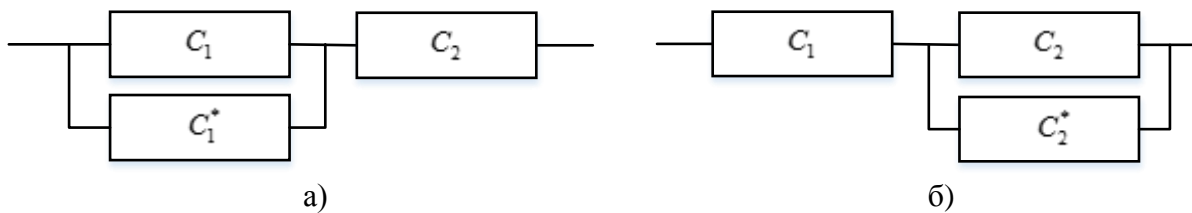


Рис. 2. Варианты резервирования ВК

По специфике функционирования ВК являются восстанавливаемой системой, но с целью упрощения решения задачи оптимального резервирования в качестве целевой функции выберем показатель надежности невозстанавливаемой системы, например среднее время до отказа.

Найдем средние времена до отказа для обоих вариантов резервирования ВК при условии, что время безотказной работы всех машин подчинено экспоненциальному закону. Значит,

$$T_a = 2 \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} dt - \int_0^{\infty} e^{-(2\lambda_1 + \lambda_2)t} dt = \frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (3)$$

$$T_b = 2 \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} dt - \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + 2\lambda_2)t} dt = \frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + 2\lambda_2}. \quad (4)$$

Пусть $\lambda_1 = 2\lambda_2$, тогда $T_a > T_b$, т. е. оптимальным является вариант резервирования ВК, представленный на рис. 2, а.

Покажем, что при выборе в качестве целевой функции показателя надежности восстанавливаемой системы, например среднего времени между отказами, решением поставленной

задачи оптимального резервирования также будет вариант резервирования ВК, представленный на рис. 2,а.

Найдем средние времена между отказами для этих же вариантов резервирования ВК в режиме с восстановлением отказавших машин при условии простейшего потока отказов и экспоненциального закона распределения времени их восстановления.

Графы состояний для обоих вариантов резервирования представлены на рис. 3. Здесь μ – интенсивность восстановления отказавшего элемента, состояния 0 и 1 являются работоспособными, а 2, 3 и 4 соответствуют отказам ВК. Предполагается, что в состояниях отказа ВК работоспособные машины находятся в выключенном состоянии и потому не отказывают.

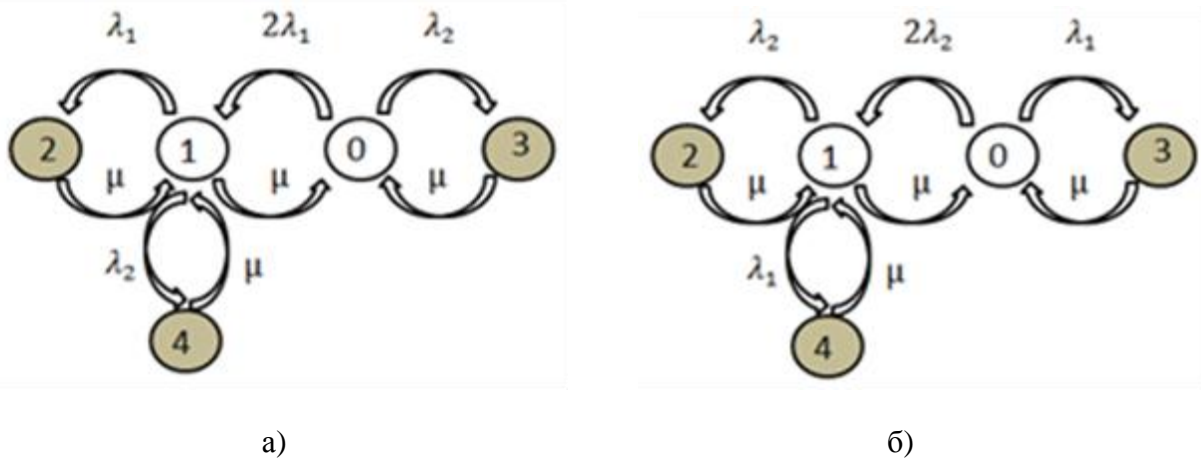


Рис. 3. Графы состояний для двух вариантов резервирования ВК

Среднее время между отказами T системы определяется из следующих выражений:

$$T = T_B \frac{K_\Gamma}{1 - K_\Gamma}; \quad T_B = \frac{1}{\mu}; \quad K_\Gamma = P_0 + P_1, \quad (5)$$

- где T_B – среднее время восстановления ВК после отказа;
 K_Γ – коэффициент готовности ВК;
 P_0 – вероятность состояния 0;
 P_1 – вероятность состояния 1.

Для определения вероятностей состояний графа системы используем метод, основанный на теории марковских процессов [1, 3, 7]. Тогда графу состояний на рис. 3,а будет соответствовать система алгебраических уравнений (6), а графу состояний на рис. 3,б – система алгебраических уравнений (7):

$$\begin{cases} \mu(P_1 + P_3) - (2\lambda_1 + \lambda_2)P_0 = 0 \\ \lambda_1 P_1 - \mu P_2 = 0 \\ \lambda_2 P_0 - \mu P_3 = 0 \\ \lambda_2 P_1 - \mu P_4 = 0 \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mu(P_1 + P_3) - (2\lambda_2 + \lambda_1)P_0 = 0 \\ \lambda_2 P_1 - \mu P_2 = 0 \\ \lambda_1 P_0 - \mu P_3 = 0 \\ \lambda_1 P_1 - \mu P_4 = 0 \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (6) при условии, что $\lambda_1 = 2\lambda_2$ и $\mu = 10\lambda_2$, получим: $P_0 = 0,625$ и $P_1 = 0,25$.

Для найденных значений P_0 и P_1 из выражения (5) получим выражение для среднего времени между отказами T_a для системы на рис. 2,а

$$T_a = \frac{0,7}{\lambda_2}. \quad (8)$$

Решая систему уравнений (7) при тех же условиях, получим: $P_0 = 0,6$ и $P_1 = 0,217$.

Также для найденных значений P_0 и P_1 из выражения (5) получим выражение для среднего времени между отказами T_6 для системы на рис.2,б

$$T_6 = \frac{0,45}{\lambda_2}. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) следует, что $T_a > T_6$, т. е. и в режиме с восстановления отказавших элементов первый вариант резервирования ВК (рис. 2,а) в смысле надежности лучше второго (рис. 2,б). Таким образом, оба подхода к выбору целевой функции дают аналогичные результаты, но сложность вычисления целевой функции при использовании первого подхода значительно ниже, чем – второго.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в статье подход к упрощению целевой функции для решения задачи оптимального резервирования вычислительного комплекса имеет, наряду с теоретическим значением, и прикладную значимость. Новизной подхода, позволяющего уменьшить объем вычислений в задачах оптимального резервирования восстанавливаемых систем, является использование в качестве целевой функции показателя надежности невозстанавливаемой системы. Это позволяет в большинстве практических задач оптимального резервирования получать аналитические выражения для целевых функций, что особенно важно для динамически перестраиваемых вычислительных комплексов, функционирующих в режиме реального времени.

Прикладной аспект полученных результатов заключается в том, что проблема обеспечения надежности космических средств приобретает большую актуальность и значимость в связи с тенденцией к широкому применению космических технологий в современных средствах вооружения. В свою очередь, без развитого инструментария для решения задач оптимального резервирования невозможно обеспечить высокую надежность компонент, составляющих космические средства, в частности ВК АС ВН. Предложенный подход к упрощению целевой функции применим как для оптимального резервирования аппаратной

составляющей ВК, так и для их программного обеспечения, когда копии программных приложений размещаются в вычислительных машинах многомашинного комплекса.

Список используемых источников

1. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. Надежность и испытания ЭВМ: руководство к лабораторным работам / сост.: В.А. Смагин, В.В. Кузнецов, К.А. Эсаулов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 85 с.
3. *Долгин В.П., Харченко А.О.* Надежность технических систем: учеб. пособие. – М.: Вузовский учебник, НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 167 с.
4. *Васильева А.Б., Тихонов Н.А.* Интегральные уравнения. – 2-е изд., стереотип. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 160 с.
5. *Асанов А., Кадырова Г.М.* Приближенное вычисление линейного интегрального уравнения Вольтерра – Стильтеса второго рода обобщенным методом трапеции // Молодой ученый. – 2014. – №6.
6. *Манжиров А.В., Полянин А.Д.* Справочник по интегральным уравнениям: Методы решения. – М.: изд-во «Факториал-Пресс», 2000. – 384 с.
7. *Гихман И.И., Скороход А.В.* Введение в теорию случайных процессов: учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1977. – 568 с.

Е.Н. Астахов;
Е.Н. Косяков,
кандидат техн. наук, доцент

ОПЕРАТИВНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ КАНАЛОВ КАК СРЕДСТВО БОРЬБЫ С ПЕРЕГРУЗКАМИ НАПРАВЛЕНИЙ СВЯЗИ

Рассматриваются научно-технические предложения по реализации оперативного резервирования каналов для обеспечения абонентов систем спутниковой связи необходимым набором телекоммуникационных услуг в условиях непредсказуемых колебаний информационного трафика и угрозы возникновения перегрузки направлений связи.

Ключевые слова: центральная земная станция, бортовой ретрансляционный комплекс, частотно-энергетический ресурс, спутниковая система связи, случайный поток, марковская цепь, трафик.

ВВЕДЕНИЕ

Применение систем спутниковой связи (ССС) становится необходимым, а иногда единственно возможным способом организации доступа к современным инфокоммуникационным услугам для абонентов, находящихся в труднодоступных и/или удаленных регионах России. Обширность обслуживаемых территорий с большой абонентской базой и принципиальная ограниченность частотно-энергетического ресурса спутников-ретрансляторов (СР) обуславливают актуальность задачи оперативного перераспределения резервных каналов СР между направлениями связи в зависимости от поступающей информационной нагрузки. Основными факторами, осложняющими решение этой задачи, являются высокие задержки распространения сигналов в спутниковых радиолиниях и, соответственно, запаздывание в управлении резервными каналами [1, 2]. Как правило, при распределении радиоресурса операторы связи ориентируются на пиковую нагрузку для каждого радионаправления для того, чтобы обеспечить требуемое качество обслуживания абонентов, особенно в часы наибольшей нагрузки. В работе предлагается альтернативный подход, состоящий в оперативном резервировании каналов для борьбы с неожиданно возникающими перегрузками в отдельных направлениях связи.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПЕРАТИВНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ КАНАЛОВ

При проектировании, планировании и организации новых направлений связи возникает задача обоснования требований к пропускной способности формируемых (арендуемых) каналов, определяющей максимальную скорость передачи информации в канале (C_k). Очевидно, что если прогнозируемый объем передаваемой в единицу времени информации составляет V_k , то скорость передачи информации в формируемом канале (C_k) должна быть не меньше: $C_k \geq V_k$.

С учетом неравномерности поступления потока сообщений на вход системы передачи информации (СПИ) задача обоснования скорости передачи информации в формируемом канале C_k сводится к задаче обоснования дополнительного резерва пропускной способности канала и, соответственно, и резерва скорости передачи информации в нем ΔC_k , способного компен-

сировать случайные колебания интенсивности трафика и/или неточность прогноза:
 $\Delta C_k = C_k - V_k$.

Также с целью компенсации незначительных пульсаций интенсивности трафика применяется буферизация сообщений в оперативной памяти портов коммутационного оборудования исходящих направлений связи. Однако емкость такого буфера, как правило, незначительна и ограничивается требованиями к задержке передаваемых сообщений.

Величина запаса по скорости ΔC_k определяется как степень неравномерности потока передаваемых сообщений, который обычно имеет стохастический характер, так и уровнем требований к величине допустимых потерь сообщений в случае, когда интенсивность поступления сообщений в течение некоторого периода времени превышает пропускную способность канала. Нередко при высокой степени неравномерности входного потока запас ΔC_k может достигать значительной величины и быть соизмерим с величиной V_k . Поэтому поддержание такого запаса на постоянной основе в условиях, когда колебания интенсивности трафика носят кратковременный характер, приводит к нерациональному использованию пропускной способности канала (за исключением особых случаев).

Альтернативой постоянному поддержанию запаса ΔC_k является формирование (аренда) канала, скорость которого соответствует прогнозируемой нагрузке $C_k \approx V_k$, но при этом предусмотрена возможность краткосрочной аренды на период перегрузки дополнительного (резервного) канала с идентичными характеристиками. Такой вариант оперативного переключения резервных каналов между направлениями связи наиболее приемлем для радиорелейных и спутниковых СПИ [2]. Однако, несмотря на кажущуюся привлекательность сформулированного выше решения, возникает ряд проблемных вопросов, касающихся возможности технической реализации оперативного подключения дополнительного (резервного) канала при угрозах перегрузки, основными из которых являются:

- задача формального определения момента возникновения угрозы перегрузки и момента запроса на подключение дополнительного канала;
- задача оценивания временных показателей подключения с учетом настройки резервного канала;
- задача исследования зависимости между задержкой на подключение резервного канала и качеством обслуживания трафика;
- задача технико-экономического анализа и поиск соотношения стоимостей долгосрочной и кратковременной аренды каналов, в процессе которого внедрение более сложных процедур управления связью становится целесообразным.

В работе предпринята попытка поиска возможных решений сформулированных задач путем построения математической модели канала передачи случайного потока сообщений, в котором предусмотрена возможность подключения дополнительного резервного канала при возникновении угрозы переполнения буфера.

Для сравнения в качестве исходной модели-прототипа рассматривается одноканальная система массового обслуживания с ограниченным буфером без резервирования, но с дополнительным «запасом» по скорости ΔC_k для поддержания требуемого качества обслуживания. Качество обслуживания в обоих случаях характеризуется вероятностью потери сообщения при переполнении буфера вследствие перегрузки, емкость буфера R для обеих моделей полагается одинаковой для сохранения соизмеримых условий по задержке сообщений. Входящий поток в обоих случаях полагается простейшим с интенсивностью λ сообщений в единицу времени. Средний объем передаваемых сообщений составляет ν бит, тогда $V_{ke} = \lambda \cdot \nu$ [бит/с].

При скорости передачи в канале C_k время передачи (обслуживания) сообщения в среднем составит $b = \nu / C_k$ [с].

Если допустить, что время передачи отдельного сообщения является величиной случайной с экспоненциальным законом распределения, то модель канала передачи с ограниченным буфером может быть представлена в виде конечной марковской цепи (КМЦ) [3] с числом состояний $R+2$, граф которой изображен на рис. 1, где $\mu = 1/b$ – интенсивность обслуживания (передачи) сообщений.

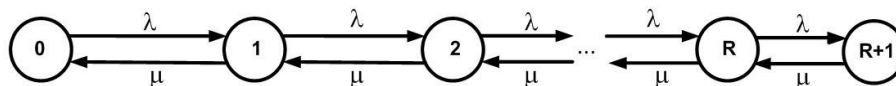


Рис. 1. Граф состояний КМЦ для одноканальной системы с буфером R

Стационарные вероятности состояний ($p_k, k = 0, \dots, R+1$) представленной КМЦ рассчитываются элементарно по известной методике [3]. При этом вероятность потери сообщений соответствует вероятности полного заполнения буфера, т. е. вероятности состояния $R+1$. Тогда, исходя из требуемого качества обслуживания (вероятность потерь и время задержки), можно определить требуемую интенсивность обслуживания μ (соответственно, скорость передачи $C_k = \mu \cdot v$ [бит/с]) и предельную емкость буфера R . При этом «запас» по скорости (дополнительно арендуемая пропускная способность канала) составит $\Delta C_k = C_k - V_k$.

Таким образом, если принять издержки в единицу времени для передачи регулярного трафика объемом V_k за 100%, то для компенсации неравномерности потока сообщения для сохранения требуемого качества обслуживания придется дополнительно заплатить $\frac{\Delta C_k}{\Delta V_k} 100\%$.

Эффективность данного решения (\mathcal{E}_1) можно оценить относительным увеличением стоимости издержек на содержание такого канала по сравнению с каналом для регулярного трафика со скоростью V_k : $\mathcal{E}_1 = \frac{(V_k + \Delta C_k)}{V_k} 100\%$.

При использовании альтернативного варианта (с краткосрочной арендой дополнительного канала) будем полагать, что скорость передачи по каналу соответствует поступающему трафику (прогнозу): $C_k \approx V_k$. Далее, предположим, что при заполнении буфера сообщениями до уровня L ($1 < L < R$) посылается запрос в центр управления связью на выделение дополнительного канала с той же производительностью $\mu = C_k / v$. Дополнительный канал выделяется не мгновенно, а через некоторое случайное время T_3 . Допустим, что эта величина также имеет экспоненциальное распределение со средним значением z .

После того как все сообщения из буфера переданы, арендованный канал возвращается диспетчеру в пул резервных каналов и система переходит в исходный режим. В этом случае процесс обслуживания может быть представлен в виде двумерной КМЦ, граф которой показан на рис. 2.

Верхний ярус КМЦ [состояния с индексами $(1, i)$] соответствует одноканальному режиму функционирования СПИ, а нижний ярус [состояния с индексами $(2, i)$] – двухканальному режиму. Переход в двухканальный режим осуществляется с интенсивностью $\gamma = 1/z$ при заполнении буфера сообщениями до уровня L , т. е. из состояний с индексами, начиная с $(1, L)$ и заканчивая $(1, R+1)$. Очевидно, что чем раньше будет передан запрос (т. е. чем меньше будет значение L), тем быстрее система перейдет в двухканальный режим во избежание пере-

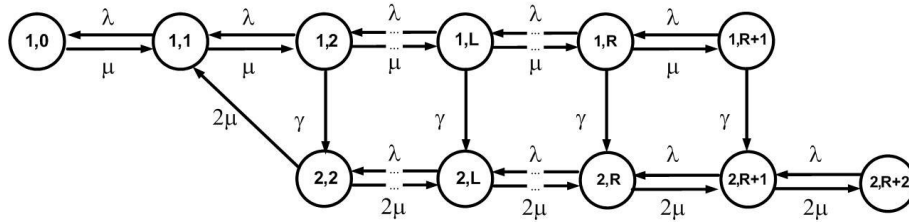


Рис. 2. Граф двумерной КМЦ с подключением дополнительного канала

грузки. Однако при этом увеличивается период и, соответственно, стоимость аренды резервного канала. Учитывая, что стоимость краткосрочной аренды, как правило, заметно выше стоимости постоянного владения каналом, следует стремиться увеличить порог наполненности буфера L , при котором формируется запрос на дополнительный канал. Понятно, что величина L в первую очередь зависит от задержки подключения дополнительного канала z , а во вторую очередь – от емкости буфера. Поэтому представляется необходимым исследовать, как влияет задержка z на эффективность схемы с подключением дополнительного канала.

Для двумерной КМЦ, представленной на рис. 2, в силу ее однородности и неприводимости, существует установившийся режим равновесия [3]. Для этого режима могут быть рассчитаны стационарные вероятности состояний p_{ij} , $i=1,2$, $j=0, \dots, R+1$. В установившемся режиме КМЦ для стационарных вероятностей состояний с учетом закона сохранения интенсивностей переходов между смежными состояниями [4] может быть составлена система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{aligned} \lambda p_{1,0} &= \mu p_{1,1}; \\ (\lambda + \mu) p_{1,1} &= \lambda p_{1,0} + \mu p_{1,2} + 2\mu p_{0,2}; \\ (\lambda + \mu) p_{1,j} &= \lambda p_{1,j-1} + \mu p_{1,j+1}; \quad j = 2, \dots, L-1; \\ (\lambda + \mu + \gamma) p_{1,j} &= \lambda p_{1,j-1} + \mu p_{1,j+1}; \quad j = L, \dots, R; \\ (\mu + \gamma) p_{1,R+1} &= \lambda p_{1,R}; \\ (\lambda + 2\mu) p_{2,2} &= 2\mu p_{2,3}; \\ (\lambda + 2\mu) p_{2,j} &= \lambda p_{2,j-1} + 2\mu p_{2,j+1}; \quad j = 3, L-1; \\ (\lambda + 2\mu) p_{2,j} &= \lambda p_{2,j-1} + 2\mu p_{2,j+1} + \gamma p_{1,j}; \quad j = L, \dots, R+1; \\ 2\mu p_{2,R+2} &= \lambda p_{2,R+1}. \end{aligned}$$

Особенностью данной СЛАУ является то, что вероятности всех состояний могут быть выражены через вероятность $p_{1,R+1}$:

$$\begin{aligned} p_{1,R} &= (\mu + \gamma) p_{1,R+1} / \lambda; \\ p_{1,j} &= [(\lambda + \mu + \gamma) p_{1,R+1} - \mu p_{1,j+2}] / \lambda; \quad j = L-1, \dots, R-1; \\ p_{1,j} &= [(\lambda + \mu) p_{1,j+1} - \mu p_{1,j+2}] / \lambda; \quad j = 1, \dots, L-2; \\ p_{1,0} &= \mu p_{1,1} / \lambda; \\ p_{2,2} &= \gamma (p_{1,L} + \dots + p_{1,R+1}) / 2\mu; \\ p_{2,3} &= (\lambda + 2\mu) p_{2,2} / 2\mu; \\ p_{2,j} &= [(\lambda + 2\mu) p_{2,j-1} - \lambda p_{2,j-2}] / 2\mu; \quad j = 4, L; \\ p_{2,j} &= [(\lambda + 2\mu) p_{2,j-1} - \lambda p_{2,j-2} - \gamma p_{1,j-1}] / 2\mu; \quad j = L+1, \dots, R+2. \end{aligned}$$

Тогда с учетом условия нормировки ($\sum p_{ij} = 1$) расчет указанных вероятностей удобно осуществлять рекуррентно по известной методике [5].

Вероятность потери сообщений вследствие переполнения буфера для данной модели будет составлять $P_0 = p_{1,R+1} + p_{2,R+2}$. Сумма вероятностей верхнего яруса $\sum p_{1j}$ показывает долю времени, в течение которого система работает в одноканальном режиме, а сумма вероятностей нижнего яруса $\sum p_{2j}$ – долю времени работы в двухканальном режиме.

Будем считать, как и ранее, стоимость постоянного владения каналом с пропускной способностью V_k за 100%. А стоимость экстренной аренды дополнительного резервного канала оценим на 50% дороже, т. е. работа в двухканальном режиме, когда одновременно работают основной и резервный каналы, обойдется в 2,5 раза дороже. Тогда эффективность (относительные издержки) работы СПИ в режиме резервирования с временной арендой дополнительного канала можно оценить соотношением $\mathcal{E}_2 = (\sum p_{1j} + 2,5 \sum p_{2j}) 100\%$.

В табл. 1 приведены данные моделирования обоих вариантов обеспечения устойчивости канала связи при возможных перегрузках при условии, что в каждом варианте поддерживается одинаковое качество обслуживания (вероятность потерь сообщений вследствие переполнения буфера нормируется на уровне 0,01, т. е. допускаются потери не более 1% сообщений). Емкость буфера для обоих вариантов совпадает, чтобы задержки ожидания сообщений в буфере были примерно одинаковы. При этом емкость буфера устанавливается на минимальном уровне, обеспечивающем допустимые потери.

Таблица 1

Данные моделирования для КМЦ для одноканальной системы с буфером R и двумерной КМЦ с подключением дополнительного канала

z_n	R	L	\mathcal{E}_1 (%)	\mathcal{E}_2 (%)	$K_B = \mathcal{E}_1 / \mathcal{E}_2$	K_3	w_1	w_2
1	6	4	171	133	1.29	0.22	0.73	1.08
2	7	4	158	130	1.21	0.20	0.91	1.30
3	8	4	151	129	1.17	0.19	1.17	1.42
4	8	3	146	130	1.13	0.20	1.27	1.47
5	9	4	140	126	1.10	0.18	1.55	1.81
6	10	5	135	124	1.09	0.16	1.83	2.08
7	10	4	134	125	1.07	0.16	1.88	2.16
8	11	5	130	122	1.06	0.15	2.14	2.41
9	12	6	127	121	1.06	0.14	2.42	2.75
10	12	6	126	120	1.05	0.13	2.55	2.84

Ключевым параметром таблицы является средняя задержка резервирования z_n , нормированная к среднему времени передачи сообщения b : $z_n = z/b$. Поскольку время передачи запроса на выделение резерва соизмеримо со временем передачи сообщения, то анализируемый диапазон изменения задержки z_n выбран от 1 до 10. Средние задержки ожидания сообщений в буфере для исходного варианта и варианта с резервированием обозначены соответственно w_1 и w_2 . Экономический выигрыш оценивается соотношением $K_B = \mathcal{E}_1 / \mathcal{E}_2$, которое показывает, во сколько раз удастся снизить затраты, применяя схему оперативного резервирования. Коэффициент K_3 показывает общую долю времени, в течение которого СПИ работает в двухканальном режиме, т. е. степень задействования резервного канала. Эта величина косвенно характеризует возможность совместного использования ре-

зервных каналов при кратковременном резервировании и других направлений связи в сетевых структурах. Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что во всех случаях оперативное резервирование дает положительный эффект по сравнению с постоянной арендой дополнительной емкости канала. Поскольку маневр резервом может быть использован и для других направлений связи, реализация представленного подхода позволит рациональнее распределить ограниченный частотно-временной ресурс, а также получить значительный экономический выигрыш, особенно для сетей с большим числом направлений связи.

Однако по мере снижения оперативности резервирования величина выигрыша стремительно снижается. Так, при увеличении значений относительной задержки z_n свыше шести, выигрыш составляет менее 10%. Кроме того, следует отметить, что увеличение задержки резервирования приводит к необходимости увеличения буфера и снижению порогового значения L , определяющего формальное начало перегрузки и момент передачи запроса. В свою очередь, увеличение буфера приводит к увеличению времени ожидания сообщений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оперативное перераспределение резервных каналов между перегруженными направлениями связи дает несомненный положительный эффект даже в условиях высоких задержек распространения сигналов, характерных для сетей спутниковой связи. Особенно заметным этот эффект ожидается при совместном управлении множеством направлений связи, например на центральных земных станциях спутниковой связи.

Приведенные оценки получены для элементарной модели M/M/1/R с простейшим входным потоком, который хотя и характеризуется высоким коэффициентом вариации, но все же является классической моделью стационарного потока. Поэтому следует ожидать, что для случаев, когда входные потоки в СПИ будут отличаться значительным уровнем нестационарности, например с учетом свойств «самоподобия» [6], характерных для сложного мультисервисного трафика, эффект от внедрения оперативного резервирования окажется еще более существенным.

Список используемых источников

1. *Ибрагимов Ф.М., Кузнецов В.Н.* TCP/IP в спутниковом канале // Технологии и средства связи. – 2001. – № 2. – С. 60–64.
2. *Косяков Е.Н., Квасов М.Н., Митряев Г.А.* Определение требований к оперативности резервирования при обслуживании телетрафика в ненадежном спутниковом канале // Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». – Серпухов, 2017. – С. 132–136.
3. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания: пер. с англ. / под ред. В.И. Наймана. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
4. *Рыжиков Ю.И.* Машинные методы расчета систем массового обслуживания. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979. – 177 с.
5. *Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д.* Итерационный метод расчета многоканальных систем с произвольным законом обслуживания // Проблемы управления и теории информации. – 1980. – Т. 9, № 3. – С. 203–213.
6. *Петров В. В.* Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ (ТУ), 2004. – 199 с.

Г.И. Афонин,
кандидат техн. наук;
А.С. Кошкаров,
кандидат техн. наук, доцент;
Г.Н. Мальцев,
доктор техн. наук, профессор

АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Рассмотрен алгоритм ортогональных преобразований измерений волнового фронта датчиком гартмановского типа в фазосопряженных системах адаптивной оптики, позволяющий восстановить фазу по измеренному датчиком волнового фронта градиенту фазы за одну итерацию расчетов. Корректирующее воздействие, поступающее на корректор волнового фронта зонального типа, формируется в виде суммы модальных составляющих, описываемых ортогональными полиномами Цернике. Представлены результаты исследования точности адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений при ортогональных преобразованиях измерений датчика волнового фронта, зависящей от числа субапертур корректора волнового фронта и числа полиномов Цернике, учитываемых при ортогональных преобразованиях. Показана важность совместного выбора параметров системы адаптивной оптики и выполняемых преобразований, от которых зависят составляющие остаточной ошибки адаптивной фазовой коррекции.

Ключевые слова: адаптивная оптика, атмосферные фазовые искажения, восстановление фазы по измеренному градиенту, зональная и модальная коррекция.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в нашей стране и за рубежом создаются наземные высокоразрешающие оптические системы для наблюдения астрономических и космических объектов с адаптивной коррекцией атмосферных фазовых искажений [1–4]. Адаптивная коррекция атмосферных фазовых искажений осуществляется системами адаптивной оптики [5–8] и позволяет преодолеть атмосферный предел разрешающей способности наземных оптических систем при превышении диаметра их телескопов радиуса пространственной когерентности действующих атмосферных фазовых искажений (радиуса Фрида), который в реальных условиях не превышает десятков сантиметров.

В качестве одной из наиболее перспективных технологий адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений в наземных оптических системах в настоящее время рассматривается фазосопряженная адаптация по искусственной «лазерной звезде» (LGS-AO – Laser Guide Star Adaptive Optics) [9, 10], уже реализованная в нескольких крупных наземных астрономических телескопах [3]. «Лазерная звезда» формируется в верхних слоях атмосферы с помощью специального лазера подсветки и используется в качестве опорного источника для измерения действующих атмосферных фазовых искажений оптического излучения датчиками волнового фронта.

Особенностью измерения фазовых искажений оптического излучения датчиками волнового фронта является то, что используемые в большинстве случаев датчики гартмановского типа измеряют локальные наклоны волнового фронта, по которым восстанавливаются средние фазы волнового фронта в пределах локальных зон измерения (субапертур). При этом коррекция действующих искажений должна быть выполнена в течение времени их «замороженности», а стандартный алгоритм восстановления фазы по результатам измерений волнового фронта датчиком гартмановского типа является итерационным [5, 8], и при его использова-

нии необходим запас по быстродействию адаптивного контура [11, 12]. В настоящей статье рассмотрен алгоритм ортогональных преобразований измерений волнового фронта датчиком гартмановского типа, позволяющий восстановить фазу по измеренному градиенту фазы за одну итерацию расчетов. В результате этого повышается быстродействие при формировании корректирующих воздействий, что может иметь существенное значение для обеспечения коррекции действующих фазовых искажений в течение времени их «замороженности».

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Сущность методов адаптивной оптики заключается в автоматической коррекции фазы оптического излучения в плоскости апертуры оптической системы на основании информации о действующих искажениях. При использовании метода фазового сопряжения действующие фазовые искажения измеряются датчиками волнового фронта по излучению некоторого опорного источника (при использовании технологии LGS-АО таким опорным источником является «лазерная звезда»). При этом получающие наибольшее распространение датчики волнового фронта гартмановского типа измеряют не непосредственно значения фазы анализируемого волнового фронта, а локальные наклоны волнового фронта в пределах субапертур [13, 14]. Восстановление фазы по результатам этих измерений представляет собой вычислительную задачу, требующую определенных преобразований и, следовательно, времени на их выполнение. В результате суммарное время формирования корректирующих воздействий, которое не должно превышать времени «замороженности» искажений, может в значительной степени зависеть от алгоритма обработки измерений.

Будем полагать, что действующие фазовые искажения описываются в пределах апертуры оптической системы функцией $\varphi(\bar{\rho})$, где $\bar{\rho}$ – координата точки в плоскости апертуры. Датчики волнового фронта измеряют действующие фазовые искажения в пределах субапертур, геометрия которых согласована с геометрией субапертур корректора волнового фронта. В общем случае измерения волнового фронта датчиком гартмановского типа на решетке из $N_x \times N_y$ субапертур представляют собой набор разностей фаз:

$$\begin{aligned}\phi_{x i,j} &= A_{ij} (\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}), \\ \phi_{y i,j} &= A_{ij} (\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}),\end{aligned}\tag{1}$$

где $\varphi_{i,j}$ – действительные значения средних фаз на субапертурах, подлежащие измерению;

A_{ij} – случайные коэффициенты, учитывающие шум измерений и амплитудные флуктуации принимаемых сигналов, $i=1, \dots, N_x, j=1, \dots, N_y$.

Обработка результатов измерений волнового фронта вида (1) при формировании корректирующих воздействий на волновой фронт соответствует восстановлению фазы $\varphi(\bar{\rho})$ по измеренному градиенту фазы $\varphi(\bar{\rho}) = \nabla\varphi(\bar{\rho})$. Она заключается в определении средней фазы $\varphi_{i,j}$ для каждой ij -й субапертуры по измеренным разностям фаз $\phi_{x i,j}$, $\phi_{y i,j}$ с тем, чтобы внести на субапертурах корректирующие воздействия на волновой фронт, пропорциональные действующим искажениям.

При анализе систем адаптивной оптики, реализующих метод фазового сопряжения, первоначально наибольшее распространение получил итерационный алгоритм восстановления фазы по результатам измерений волнового фронта датчиками волнового фронта гартмановского типа. Этот алгоритм основан на том, что значение фазы в любой дискретной точке волнового фронта может быть представлено в виде суммы среднего арифметического значений фаз в соседних дискретных точках волнового фронта и среднего арифметического значений разностей фаз между этими точками. Соответствующее выражение для вычисления

значений фазы в дискретных точках волнового фронта имеет следующий вид [5, 8]:

$$\varphi_{i,j} = \frac{1}{Y} (\varphi_{i,j-1} + \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i,j+1} + \varphi_{i+1,j} + \varphi_{x i,j} + \varphi_{x i+1,j} + \varphi_{y i,j} + \varphi_{y i,j+1}), \quad (2)$$

где Y – масштабный коэффициент, значение которого для внутренних точек (субапертур) равно 4, а для крайних – 3 или 2.

Вычисления в соответствии с выражением (2) осуществляются итерационно. На каждой итерации для каждой ij -й субапертуры решается система уравнений вида (2), причем известными в них являются измеренные значения разностей фаз $\varphi_{x i,j}$ и $\varphi_{y i,j}$, а в качестве значений фаз $\varphi_{i,j}$ в правых частях уравнений используются результаты их расчета из предыдущей итерации. В ходе итераций алгоритм сходится к единственному решению для значений $\varphi_{i,j}$, при этом формируемые оценки средних фаз на субапертурах $\varphi_{i,j}$ соответствуют оценкам максимального правдоподобия. Однако данное выражение соответствует математическому методу простой итерации, свойством которой является медленная сходимость, и для формирования корректирующих воздействий с использованием итерационного алгоритма требуется большое количество итераций. Требуемое для достижения малой остаточной ошибки восстановления фазы число итераций расчетов составляет 10–20 [11, 12]. Это приводит к значительному увеличению времени отклика адаптивного контура, которое равно произведению времени одной итерации на число итераций, и связанной с временем отклика так называемой ошибки прогнозирования при формировании корректирующих воздействий.

В то же время при восстановлении фазы $\varphi(\bar{\rho})$ по измеренному градиенту фазы $\varphi(\bar{\rho})$ принципиально возможно непосредственное вычисление значений фаз $\varphi_{i,j}$ по измеренным значениям разностей фаз $\varphi_{x i,j}$ и $\varphi_{y i,j}$, что позволяет значительно снизить требования к быстродействию адаптивного контура, определяемому временем одной итерации вычислений. В работах [15, 16] показано, что непосредственное вычисление фазы $\varphi(\bar{\rho})$ по измеренному градиенту фазы $\varphi(\bar{\rho})$ возможно с использованием алгоритма ортогональных преобразований измерений волнового фронта датчиком гартмановского типа. Для этого фаза волнового фронта в пределах апертуры представляется в виде разложения на модальные составляющие (абберации), описываемые введенными в пределах апертуры ортогональными полиномами:

$$\varphi(\bar{\rho}) = \sum_{m=1}^M a_m V_m(\bar{\rho}), \quad (3)$$

где $V_m(\bar{\rho})$ – ортогональные полиномы, соответствующие определенным модальным составляющим волнового фронта;

a_m – весовые коэффициенты, определяющие вклад соответствующей составляющей $V_m(\bar{\rho})$ в разложение фазы $\varphi(\bar{\rho})$;

M – число учитываемых полиномов.

При представлении фазы волнового фронта в пределах апертуры в виде (3) определению по результатам измерений градиента фазы $\varphi(\bar{\rho})$ подлежат весовые коэффициенты разложения a_m , $m=1, \dots, M$. Можно показать, что они могут быть определены в результате ортогональных преобразований в соответствии с выражением

$$a_m = \int W_0(\bar{\rho}) \varphi(\bar{\rho}) \mathbf{G}_m^*(\bar{\rho}) d\bar{\rho}, \quad (4)$$

где $W_0(\bar{\rho})$ – апертурная функция, принимающая единичное значение в пределах апертуры оптической системы и нулевое – вне ее;

$\mathbf{G}_m(\bar{\rho})$ – векторные полиномы, ортогональные градиенту полиномов $V_m(\bar{\rho})$.

Выражение (4) позволяет определить коэффициенты a_m в разложении фазы волнового фронта $\varphi(\bar{\rho})$ на ортогональные полиномы в соответствии с выражением (3) на основании измеренного градиента фазы $\nabla\varphi(\bar{\rho})$ за одну итерацию расчетов. Условие ортогональности векторных полиномов $\mathbf{G}_m(\bar{\rho})$ градиенту полиномов $V_m(\bar{\rho})$ определяется выражением $\int W_0(\bar{\rho}) \nabla V_m(\bar{\rho}) \mathbf{G}_p^*(\bar{\rho}) d\bar{\rho} = \delta_{mp}$, где δ_{mp} – символ Кронекера.

При анализе систем адаптивной оптики широкое распространение получает представление атмосферных фазовых искажений и корректирующих воздействий в виде разложения на ортогональные полиномы Цернике в пределах апертуры оптической системы [6–8]. При описании атмосферных фазовых искажений такое разложение оказывается близким к оптимальному разложению Карунена – Лоэва. В полярных координатах полиномы Цернике записываются в виде

$$V_\mu^l(\rho, \theta) = \sqrt{\frac{\mu+1}{\pi}} R_\mu^l(\rho) e^{il\theta}, \quad (5)$$

$$R_\mu^l(\rho) = \sum_{s=0}^{\mu-l} a_\mu^l(s) \rho^{\mu-2s},$$

где $R_\mu^l(\rho)$ – радиальные полиномы, в которых $a_\mu^l(s) = (-1)^s ((\mu-s)/s! (\mu+l/2-s)! (\mu-l/2-s)!)$; (ρ, θ) – полярные координаты точки $\bar{\rho}$ в пределах апертуры;
 μ – радиальный индекс полиномов;
 l – азимутальный индекс полиномов.

Экспоненциальная функция азимутального угла $e^{il\theta}$ для каждого индекса l дает два полинома с синусоидальной $\sin(l\theta)$ (нечетные l) и косинусоидальной $\cos(l\theta)$ (четные l) функциями угла θ или единицу при $l=0$. Для полиномов Цернике $V_\mu^l(\rho, \theta)$ вида (5) выполняется условие ортогональности в пределах единичного круга (при $0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta < 2\pi$).

При записи полиномов Цернике в виде (5) осуществлен переход от однозначной к двузначной их индексации. Использование двузначной индексации полиномов Цернике $V_\mu^l(\rho, \theta)$ обусловлено формой их записи, включающей радиальный полином $R_\mu(\rho)$ и комплексную экспоненциальную функцию азимутального угла $e^{il\theta}$. При описании с помощью разложения вида (3) фазовых искажений или корректирующих воздействий пределы изменения индексов μ и l соответствуют числу учитываемых в разложении полиномов M . Существует также эквивалентная форма записи полиномов Цернике в виде $V_\mu^l(x, y)$ в прямоугольных координатах (x, y) точки $\bar{\rho}$ в плоскости апертуры.

Известны [17] векторные полиномы, ортогональные градиенту полиномов Цернике $V_\mu^l(\rho, \theta)$ и $V_\mu^l(x, y)$. Так, в полярных координатах полиномы $\mathbf{G}_\mu^l(\rho, \theta)$, ортогональные градиенту полиномов $V_\mu^l(\rho, \theta)$ вида (5), включают радиальную $K_\mu^l(\rho)$ и азимутальную $E_\mu^l(\rho)$ составляющие функции радиальной координаты и комплексную экспоненциальную функцию азимутального угла $e^{il\theta}$ и записываются в виде

$$\mathbf{G}_\mu^l(\rho, \theta) = \sqrt{\frac{\mu+1}{\pi}} [K_\mu^l(\rho) \mathbf{e}_\rho + lE_\mu^l(\rho) \mathbf{e}_\theta] e^{il\theta}, \quad (6)$$

где \mathbf{e}_ρ – единичный вектор координаты ρ ;
 \mathbf{e}_θ – единичный вектор координаты θ ;
 μ – радиальный индекс полиномов;
 l – азимутальный индекс полиномов.

Радиальная и азимутальная составляющие функции радиальной координаты векторных полиномов $\mathbf{G}_\mu^l(\rho, \theta)$ вида (8) определяются выражениями:

$$K_\mu^l(\rho) = \frac{1}{4} \sum_{s=0}^{\frac{\mu-1}{2}} a_\mu^l(s) \frac{(\mu-2s+2)}{\left(\frac{\mu+l}{2}-s+1\right)\left(\frac{\mu-l}{2}-s+1\right)} (\rho^{l-1} - \rho^{\mu-2s+1}),$$

$$E_\mu^l(\rho) = \frac{1}{4l} \sum_{s=0}^{\frac{\mu-1}{2}} \frac{a_\mu^l(s)}{\left(\frac{\mu+l}{2}-s+1\right)\left(\frac{\mu-l}{2}-s+1\right)} [(\mu-2s+2)\rho^{l-1} - l\rho^{\mu-2s+1}].$$

Как и в выражении (5), экспоненциальная функция азимутального угла $e^{il\theta}$ в выражении (6) для каждого индекса l дает два полинома с синусоидальной $\sin(l\theta)$ (нечетные l) и косинусоидальной $\cos(l\theta)$ (четные l) функциями угла θ или единицу при $l = 0$. При этом с учетом вида векторных полиномов $\mathbf{G}_\mu^l(\rho, \theta)$, определяемых выражением (6), интегральное выражение (4) для расчета коэффициентов разложения a_m представляет собой сумму двух интегралов – для радиальной и азимутальной составляющих каждого векторного полинома.

При выполнении ортогональных преобразований измерений градиента фазы $\phi(\bar{\rho})$ в соответствии с выражениями (4)–(6) распределение фазы в пределах апертуры $\phi(\bar{\rho})$ может быть определено в виде (3) с точностью до ее представления в виде разложения на M ортогональных полиномов Цернике, не прибегая к итерационному алгоритму вычислений. Существует также эквивалентная форма записи векторных полиномов, ортогональных градиенту полиномов Цернике, в виде $\mathbf{G}_\mu^l(x, y)$ в прямоугольных координатах (x, y) точки $\bar{\rho}$ в плоскости апертуры. В зависимости от используемой формы записи результатов измерения градиента фазы $\phi(\bar{\rho})$ и полиномов $V_\mu^l(\bar{\rho})$ и $\mathbf{G}_\mu^l(\bar{\rho})$ при расчете коэффициентов разложения a_m в выражении (4) выполняется интегрирование в полярных (ρ, θ) или в прямоугольных (x, y) координатах. Выбор системы координат зависит от геометрии расположения субапертур датчиков и корректоров волнового фронта. Представление функций $\phi(\bar{\rho})$, $\phi(\bar{\rho})$ и, соответственно, использование полиномов $V_m(\bar{\rho})$, $\mathbf{G}_m(\bar{\rho})$ в полярных координатах более предпочтительно при гексагональном расположении субапертур и в прямоугольных координатах – при их эквидистантном расположении.

Практически датчик волнового фронта измеряет не непрерывную функцию градиента фазы $\phi(\bar{\rho}) = \nabla\phi(\bar{\rho})$, а разности фаз между дискретными точками апертуры в пределах субапертур $\phi_{x_{i,j}}$ и $\phi_{y_{i,j}}$, определяемые выражениями (1). Поэтому интегральные выражения для расчета коэффициентов разложения (4) преобразуются в дискретный вид конечных сумм с числом слагаемых N , равным числу субапертур, на которых проводятся измерения разностей фаз. Для каждой ij -й субапертуры непрерывная функция градиента фазы $\phi(\bar{\rho})$ и непрерывные функции радиальной и азимутальной составляющих каждого векторного полинома $\mathbf{G}_\mu^{l*}(\rho, \theta)$ представляются их средними значениями на субапертурах, при этом среднее значение градиента фазы $\phi(\bar{\rho})$ для ij -й субапертуры Φ_{ij} определяется по результатам измерений разностей фаз $\phi_{x_{i,j}}$ и $\phi_{y_{i,j}}$ с учетом геометрии расположения и размера субапертур.

Вычисленные значения весовых коэффициентов a_m , $m = 1, \dots, M$ могут быть представлены в виде следующей дискретной функции:

$$a_m = \sum_{n=1}^N \int W_{0n}(\bar{\rho}) \Phi_n \mathbf{G}_m^*(\bar{\rho}) d\bar{\rho}, \quad (7)$$

где $W_{0n}(\bar{\rho})$ – апертурная функция n -й субапертуры, принимающая единичное значение в ее пределах и нулевое – вне ее;

Φ_n – найденные по результатам измерений разностей фаз вида (1) средние значения градиента фазы на n -й субапертуре;

$\mathbf{G}_m(\bar{\rho})$ – векторный полином, ортогональный градиенту m -го полинома $V_m(\bar{\rho})$ в разложении волнового фронта вида (3);

N – число субапертур.

В выражении (7) векторные полиномы $\mathbf{G}_m(\bar{\rho})$ определены в пределах апертурной функции оптической системы $W_0(\bar{\rho})$, суммирование происходит по числу N субапертур, интегрирование по координате $\bar{\rho}$ выполняется в пределах апертурных функций субапертур $W_{0n}(\bar{\rho})$, $n=1, \dots, N$, которые образуют заполнение апертурной функции оптической системы $W_0(\bar{\rho})$ в соответствии с геометрией расположения субапертур.

При формировании корректирующих воздействий на волновой фронт используемые зональные корректоры волнового фронта типа сплошных и составных адаптивных зеркал также формируют не непрерывную функцию корректирующей фазы $\varphi(\bar{\rho})$, а ее аппроксимацию в виде совокупности средних фаз на N субапертурах. При этом выражение для корректирующей фазы (3) может быть представлено в виде следующей дискретной функции:

$$\varphi(\bar{\rho}) = \sum_{n=1}^N \int W_{0n}(\bar{\rho}) \sum_{m=1}^M a_m V_m(\bar{\rho}) d\bar{\rho}, \quad (8)$$

где $W_{0n}(\bar{\rho})$ – апертурная функция n -й субапертуры;

a_m – найденные в соответствии с выражением (7) весовые коэффициенты разложения волнового фронта на абберации, описываемые ортогональными полиномами $V_m(\bar{\rho})$;

M – число учитываемых полиномов;

N – число субапертур.

В выражении (8) функция $\varphi(\bar{\rho})$ и ортогональные полиномы $V_m(\bar{\rho})$ определены в пределах апертурной функции оптической системы $W_0(\bar{\rho})$. Первое суммирование происходит по числу N субапертур, интегрирование по координате $\bar{\rho}$ выполняется в пределах апертурных функций субапертур $W_{0n}(\bar{\rho})$, $n = 1, \dots, N$, которые образуют заполнение апертурной функции оптической системы $W_0(\bar{\rho})$ в соответствии с геометрией расположения субапертур. Второе суммирование происходит по числу M полиномов $V_m(\bar{\rho})$, $m = 1, \dots, M$.

Усреднение измеряемой и корректирующей фазы на субапертурах определяет ошибку зональной пространственной аппроксимации действующих искажений, которая всегда имеет место при конечном числе субапертур зонального корректора волнового фронта системы адаптивной оптики. Эта составляющая ошибки определяет потенциальную точность зональной коррекции фазовых искажений при обеспечении достаточного быстродействия адаптивного контура – при коррекции действующих фазовых искажений в течение времени их «замороженности» в отсутствие ошибки прогнозирования. Использование в разложении (3) и в соответствующем ему разложении (7) конечного числа полиномов приводит к дополнительной ошибке коррекции фазовых искажений, обусловленной их представлением в виде разложения на конечное число модальных составляющих. Однако безытерационный расчет корректирующих воздействий с использованием ортогональных преобразований облегчает обеспечение достаточного быстродействия адаптивного контура по сравнению с итерационным расчетом корректирующих воздействий в виде (2).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Будем рассматривать вариант построения системы адаптивной оптики, при котором измерение и коррекция действующих атмосферных фазовых искажений осуществляются датчиком и корректором волнового фронта зонального типа, а формирование управляющих воздействий на субапертуры корректора волнового фронта (корректирующей фазы) осуществляется в виде суммы составляющих разложения действующих искажений на ортогональные полиномы Цернике. Данный вариант построения системы адаптивной оптики соответствует безытерационному формированию корректирующих воздействий с использованием рассмотренных ортогональных преобразований (3)–(6) в соответствии с выражениями в виде конечных сумм (7) и (8). Будем также полагать, что геометрия расположения субапертур датчика волнового фронта и корректора волнового фронта согласованы.

Точность адаптивной фазовой коррекции характеризуется величиной остаточных ошибок $\Delta\varphi(\bar{\rho}) = \varphi_a(\bar{\rho}) - \varphi_k(\bar{\rho})$, где $\varphi_a(\bar{\rho})$ – действующие атмосферные фазовые искажения, $\varphi_k(\bar{\rho})$ – корректирующая фаза, приведенные к плоскости апертуры оптической системы. При обеспечении достаточного быстродействия адаптивного контура величина остаточных ошибок коррекции $\Delta\varphi(\bar{\rho})$ определяется точностью пространственной аппроксимации действующих фазовых искажений $\varphi_a(\bar{\rho})$ корректором волнового фронта с конечным числом субапертур N при конечном числе полиномов Цернике M , учитываемых при формировании корректирующей фазы $\varphi_k(\bar{\rho})$ в виде (8).

В случае коррекции атмосферных искажений зональным корректором волнового фронта с конечным числом субапертур N остаточная ошибка коррекции определяется соотношением между размерами апертуры D и субапертуры d и радиусом когерентности атмосферных искажений r_0 . Известны статистические оценки остаточных ошибок пространственной аппроксимации атмосферных искажений волнового фронта при большом числе субапертур N и при большом числе полиномов Цернике M в виде среднеквадратических значений остаточных ошибок коррекции $\sigma_{\Delta\varphi}$ для заданного отношения D/r_0 между диаметром апертуры оптической системы D и радиусом когерентности атмосферных фазовых искажений r_0 . Они систематизированы в работах [7, 8]. Интерес к ошибкам коррекции искажений при большом числе субапертур N и большом числе компенсируемых аберраций M обусловлен тем, что в реальных условиях отношение D/r_0 , являющееся параметром действующих искажений, для средних и крупных наземных телескопов составляет от нескольких единиц до нескольких десятков, и для обеспечения малых остаточных ошибок коррекции в системе адаптивной оптики необходимо обеспечить большое число апертур и учет большого числа модальных составляющих при измерении и коррекции действующих атмосферных фазовых искажений.

Асимптотическое выражение для среднеквадратической ошибки зональной коррекции атмосферных фазовых искажений при большом числе субапертур ($N > 20$) дает оценка

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2(N) = 0,335N^{-5/6} (D/r_0)^{5/3}. \quad (9)$$

Выражение (9) соответствует известному [18] асимптотическому выражению для среднеквадратической ошибки зональной коррекции $\sigma_{\Delta\varphi}^2 = 0,335(d/r_0)^{5/3}$ с учетом приближенного соотношения $N \approx (D/d)^2$ между числом субапертур N и параметром зонального корректора волнового фронта D/d . Строго говоря, соотношение между N и D/d может уточняться для конкретной геометрии расположения субапертур. Так, при гексагональном расположении субапертур $N \approx 0,75(D/d)^2$. Кроме того, ограничения технической реализации зонального корректора волнового фронта могут приводить к увеличению, с 0,335 до 0,5, коэффициента в выражении (9) для среднеквадратической ошибки зональной коррекции. С учетом указанно-

го диапазона изменения коэффициентов в выражениях для $\sigma_{\Delta\varphi}$ и N зависимость $\sigma_{\Delta\varphi}^2(N)$ остается близкой к виду (9), который будем использовать в дальнейшем.

Асимптотическое выражение для среднеквадратической ошибки модальной коррекции атмосферных фазовых искажений при большом числе компенсируемых модальных составляющих ($M > 10$), описываемых ортогональными полиномами Цернике, дает оценка [19]

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2(M) = 0,294M^{-\sqrt{5}/2} (D/r_0)^{5/3}. \quad (10)$$

Для оценки (10) известна [20] аппроксимация $\sigma_{\Delta\varphi}^2(M) = 0,254M^{-5/6} (D/r_0)^{5/3}$, удобная для ее сопоставления с оценкой $\sigma_{\Delta\varphi}^2(N)$ вида (9).

Выражения (9) и (10) устанавливают взаимосвязь между среднеквадратической ошибкой адаптивной фазовой коррекции $\sigma_{\Delta\varphi}$, параметром действующих атмосферных искажений D/r_0 и параметрами N и M алгоритма восстановления фазы при формировании корректирующих воздействий, как суммы M ортогональных полиномов Цернике, в виде (3) по результатам измерений и коррекции искажений волнового фронта зональными датчиком и корректором волнового фронта, представляющими собой решетки из N субапертур. На рис. 1 представлены расчетные зависимости $\sigma_{\Delta\varphi}(N)$ (кривые 1–3) и $\sigma_{\Delta\varphi}(M)$ (кривые 4–6) при различных значениях отношения D/r_0 . Кривые 1 и 4 соответствуют $D/r_0=2$, кривые 2 и 5 – $D/r_0=5$, кривые 3 и 6 – $D/r_0=10$. Приведенные зависимости характеризуют предельно достижимое качество коррекции атмосферных искажений, определяемое ошибками их пространственной аппроксимации при зональной и модальной коррекции при условии достаточного быстродействия адаптивного контура. Можно отметить, что в рассматриваемой области больших значений N и M при $M = N$ ошибки зональной и модальной коррекции имеют один и тот же порядок и различаются при $N \geq 20$, $M \geq 20$ и $D/r_0 \leq 10$ менее, чем на 0,1 рад. При этом величина $\sigma_{\Delta\varphi}(N)$ для зональной коррекции всегда несколько больше, чем величина $\sigma_{\Delta\varphi}(M)$ для модальной коррекции, и с увеличением N и M расхождение между $\sigma_{\Delta\varphi}(N)$ и $\sigma_{\Delta\varphi}(M)$ при $M = N$ уменьшается.

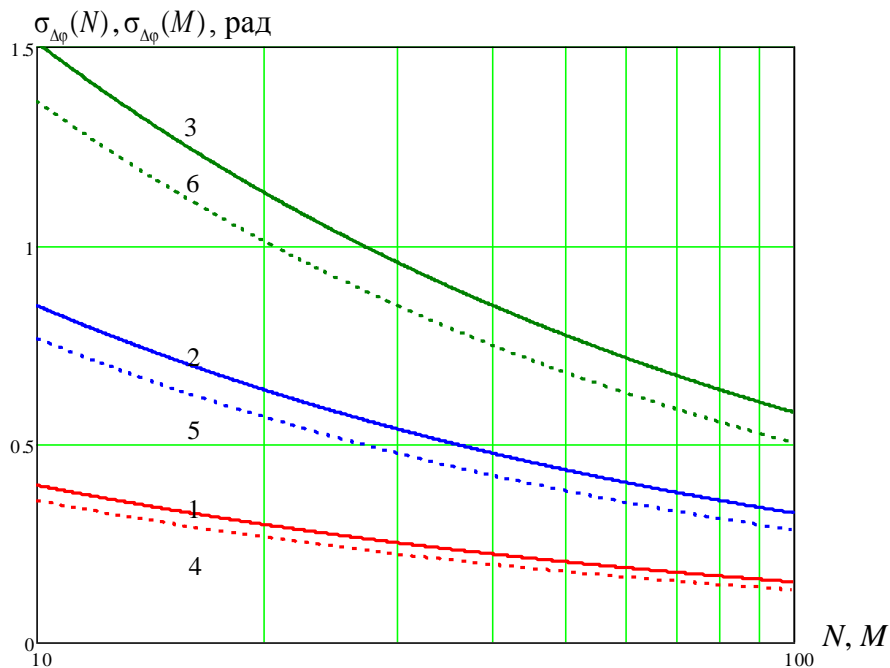


Рис. 1. Среднеквадратическая ошибка адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений $\sigma_{\Delta\varphi}$ в зависимости от числа субапертур N при зональной коррекции и от числа полиномов Цернике M при модальной коррекции

Практически при реализации формирования корректирующих воздействий с использованием ортогональных преобразований результатов измерений волнового фронта датчиком гартмановского типа результирующая дисперсия ошибки адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений будет определяться суммой двух составляющих. Первая составляющая соответствует зональной коррекции корректором волнового фронта с N субапертурами, вторая составляющая соответствует модальной коррекции составляющих, описываемых M полиномами Цернике, учитываемыми при ортогональных преобразованиях:

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2 = \sigma_{\Delta\varphi}^2(N) + \sigma_{\Delta\varphi}^2(M). \quad (11)$$

В выражении (11) слагаемые в правой части определяются выражениями (9) и (10) при числе субапертур N используемого в системе адаптивной оптики зонального корректора волнового фронта и числе полиномов Цернике M , учитываемых при формировании корректирующих воздействий с использованием алгоритма ортогональных преобразований. В результате остаточная ошибка адаптивной фазовой коррекции увеличивается по сравнению со случаем зональной коррекции и формирования корректирующих воздействий с использованием итерационного алгоритма. В этой ситуации возможны два подхода к выбору числа полиномов Цернике M , учитываемых при ортогональных преобразованиях.

Первый подход состоит в использовании ортогональных преобразований, учитывающих $M \gg N$ полиномов Цернике. В этом случае второе слагаемое в выражении (11) становится пренебрежимо мало по сравнению с первым слагаемым, и дисперсия остаточной ошибки коррекции определяется дисперсией ошибки пространственной аппроксимации искажений используемым зональным корректором волнового фронта с N субапертурами. Второй подход состоит в использовании ортогональных преобразований, учитывающих $M \approx N$ полиномов Цернике. В этом случае первое и второе слагаемые в выражении (11) оказываются примерно равны, и дисперсия остаточной ошибки увеличивается в 2 раза по сравнению с дисперсией ошибки пространственной аппроксимации искажений используемым зональным корректором волнового фронта с N субапертурами. Для того чтобы достичь в этом случае такой же дисперсии остаточной ошибки коррекции, как и в предыдущем случае, число субапертур N и равное ему число полиномов Цернике M должны быть увеличены в 2,3 раза.

Приближенное равенство $\sigma_{\Delta\varphi}^2(N) \approx \sigma_{\Delta\varphi}^2(M)$ при $M = N$ не относится к малым значениям M и N . В соответствии с известными [19] оценками точности пространственной аппроксимации атмосферных фазовых искажений полиномами Цернике $\sigma_{\Delta\varphi}^2(M) = 0,134(D/r_0)^{5/3}$ при $M = 2$ – при коррекции составляющих, описываемых полиномами 1-го порядка, $\sigma_{\Delta\varphi}^2(M) = 0,0648(D/r_0)^{5/3}$ при $M = 5$ – при коррекции составляющих, описываемых полиномами 1-го и 2-го порядка, $\sigma_{\Delta\varphi}^2(M) = 0,0401(D/r_0)^{5/3}$ при $M = 9$ – при коррекции составляющих, описываемых полиномами 1-го, 2-го и 3-го порядка. При этом коррекция составляющих, описываемых полиномами 1-го порядка и характеризующих общий наклон волнового фронта, в реальных системах адаптивной оптики осуществляется следящим зеркалом с собственным контуром управления [14, 21]. В то же время при зональной коррекции $\sigma_{\Delta\varphi}^2(N) = 0,134(D/r_0)^{5/3}$ достигается при $N = 3$, $\sigma_{\Delta\varphi}^2(N) = 0,0648(D/r_0)^{5/3}$ достигается при $N = 7$, $\sigma_{\Delta\varphi}^2(N) = 0,0401(D/r_0)^{5/3}$ достигается при $N = 13$. При дальнейшем увеличении M зависимость $\sigma_{\Delta\varphi}^2(M)$ приближается к виду (10) и при $M = N$ начинает выполняться приближенное равенство $\sigma_{\Delta\varphi}^2(N) \approx \sigma_{\Delta\varphi}^2(M)$. Поэтому при малых значениях N использование при ортогональных преобразованиях $M \gg N$ полиномов Цернике гарантированно дает приближение дисперсии остаточной ошибки коррекции к дисперсии ошибки пространственной аппроксимации искажений используемым зональным корректором волнового фронта, а использование при ортогональных преобразованиях $M \approx N$ полиномов Цернике дает увеличение дисперсии остаточной ошибки коррекции

по сравнению с дисперсией ошибки пространственной аппроксимации искажений используемым зональным корректором волнового фронта менее чем в 2 раза.

С величиной дисперсии ошибки адаптивной фазовой коррекции $\sigma_{\Delta\varphi}^2$ может быть связан коэффициент Штреля, широко используемый в качестве показателя качества коррекции в системах адаптивной оптики [6, 8]. Для стационарных в пределах апертуры оптической системы остаточных ошибок адаптивной фазовой коррекции с дисперсией $\sigma_{\Delta\varphi}^2$ асимптотическое значение коэффициента Штреля определяется выражением $R_{ш} = \exp(-\sigma_{\Delta\varphi}^2)$.

На рис. 2 показаны расчетные зависимости $R_{ш}$ от числа субапертур зонального корректора волнового фронта N при различных значениях отношения D/r_0 для трех случаев: в отсутствие ошибок, обусловленных формированием корректирующих воздействий в виде суммы конечного числа M полиномов Цернике (кривые 1–3), при формировании корректирующих воздействий в виде суммы $M = N$ полиномов Цернике (кривые 4–6), при формировании корректирующих воздействий в виде суммы $M = 10N$ полиномов Цернике (кривые 7–9). Кривые 1, 4, 7 соответствуют $D/r_0 = 2$, кривые 2, 5, 8 – $D/r_0 = 5$, кривые 3, 6, 9 – $D/r_0 = 10$. Приведенные зависимости характеризуют предельно достижимую величину коэффициента Штреля, как показателя качества коррекции в системе адаптивной оптики, при различных вариантах формирования корректирующих воздействий по результатам измерений волнового фронта датчиком гартмановского типа при условии достаточного быстродействия адаптивного контура. Можно отметить, что при формировании корректирующих воздействий в виде суммы $M = N$ полиномов Цернике уменьшение величины $R_{ш}$ составляет до 0,2 по сравнению с предельным случаем наличия только ошибок зональной коррекции используемым зональным корректором волнового фронта и особенно заметно в области значений $R_{ш}$ от 0,3 до 0,7. При формировании корректирующих воздействий в виде суммы $M = 10N$ полиномов Цернике практически достигается предельный случай наличия только ошибок зональной коррекции используемым зональным корректором волнового фронта, уменьшение величины $R_{ш}$ при этом составляет не более 0,03, а в области значений $R_{ш} \geq 0,8$ – не более 0,01.

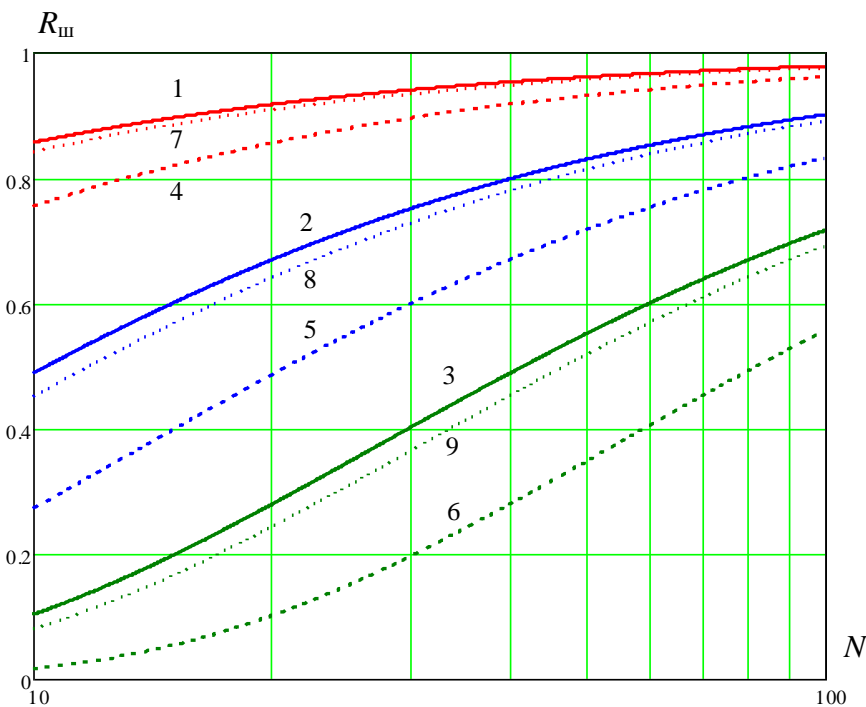


Рис. 2. Коэффициент Штреля системы адаптивной оптики $R_{ш}$ в зависимости от числа субапертур зонального корректора волнового фронта N при различном числе полиномов Цернике M , используемых при ортогональных преобразованиях

В зависимости от целевого назначения оптической системы с адаптивной коррекцией атмосферных фазовых искажений и требований к качеству коррекции могут быть заданы различные требования к величине $R_{ш}$. Так, при формировании изображений наблюдаемых объектов требования к величине $R_{ш}$ могут быть сформулированы исходя из требуемого углового разрешения оптической системы $\theta_{\text{треб}}$ следующим образом:

$$R_{ш} \geq 1,5 \left(\frac{\lambda}{D\theta_{\text{треб}}} \right)^2. \quad (12)$$

Неравенство (12) соответствует определению углового разрешения оптической системы с фазовыми искажениями в виде $\theta = 1,22\lambda/D_э$, где $D_э$ – эквивалентный диаметр апертуры, учитывающий действующие фазовые искажения, и использованию соотношения $D_э \approx D\sqrt{R_{ш}}$ [22], справедливого в представляющей практический интерес области значений коэффициента Штреля $R_{ш} \geq 0,8$. В этом случае достижению углового разрешения, близкого к дифракционному, может соответствовать условие $R_{ш} > 0,9$, а в режиме обнаружения объектов это требование может быть снижено до $R_{ш} > 0,5$ [8].

Полученные результаты показывают важность совместного выбора параметров системы адаптивной оптики и выполняемых преобразований N и M при реализации рассмотренного алгоритма ортогональных преобразований измерений волнового фронта датчиком гартмановского типа, позволяющего восстановить фазу за одну итерацию расчетов. Безытерационное вычисление корректирующих воздействий облегчает обеспечение достаточного быстродействия адаптивного контура по сравнению с итерационным алгоритмом расчета корректирующих воздействий. При этом «платой» за безытерационное вычисление корректирующих воздействий является появление дополнительной составляющей остаточной ошибки коррекции, возникающей вследствие формирования корректирующих воздействий в виде суммы конечного числа ортогональных полиномов Цернике. Рассмотренные соотношения и представленные расчетные зависимости позволяют обоснованно выбрать число субапертур N датчика и корректора волнового фронта зонального типа и число полиномов Цернике M , учитываемых при ортогональных преобразованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод фазового сопряжения с адаптацией по естественным звездам и искусственным «лазерным звездам» и использованием датчиков волнового фронта гартмановского типа рассматривается в настоящее время как основной метод реализации адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений в наземных высокоразрешающих оптических системах, предназначенных для наблюдения астрономических и космических объектов. При этом успехи в реализации технологии адаптации по искусственным «лазерным звездам» стимулируют развитие систем адаптивной оптики, работающих по методу фазового сопряжения. Однако при их практической реализации возникает необходимость восстановления фазы по измеренному градиенту фазы. Рассмотренный алгоритм ортогональных преобразований измерений волнового фронта датчиком гартмановского типа позволяет восстановить фазу за одну итерацию вычислений. Тем самым определяется его преимущество в сравнении с традиционным итерационным алгоритмом вычислений. Можно полагать, что итерационный алгоритм вычисления корректирующей фазы соответствует принципу последовательных вычислений, а алгоритм вычисления корректирующей фазы с использованием ортогональных преобразований соответствует принципу параллельных вычислений.

Проведенные исследования точности адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений при ортогональных преобразованиях измерений датчика волнового фронта показывают важность совместного выбора параметров системы адаптивной оптики и выполняемых

преобразований, от которых зависят составляющие остаточной ошибки адаптивной фазовой коррекции. Полученные результаты могут быть использованы при создании систем адаптивной оптики, которые работают по методу фазового сопряжения и применяют рассмотренный алгоритм формирования корректирующих воздействий. Такие системы позволяют выбрать число субапертур датчика и корректора волнового фронта и число компенсируемых модальных составляющих действующих искажений, исходя из требований к показателям качества коррекции.

Список используемых источников

1. Дятлов В. Основные направления развития наземных оптоэлектронных средств контроля космического пространства США // Зарубежное военное обозрение. – 2006. – № 1. – С. 50–55; № 2. – С. 30–35.
2. Новая аппаратура для высокоточных наблюдений космических объектов: первые результаты измерений и перспективы развития Алтайского оптико-лазерного центра / В.Д. Шаргородский, С.Н. Горчаковский, Е.А. Гришин и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – № 7. – С. 15–19.
3. Нифантова Н. Смотрящие в космос // Машины и механизмы. – 2013. – № 10. – С. 54–59.
4. Сычев В.В. Технологические аспекты создания крупногабаритных оптических телескопов // Наука и образование. – 2015. – № 2. – С. 269–285.
5. Харди Д.У. Активная оптика: новая техника управления световым пучком // ТИИЭР. – 1978. – № 6. – С. 31–85.
6. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Радио и связь, 1985. – 336 с.
7. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. – Новосибирск: Наука, 1986. – 248 с.
8. Лукьянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е. Оптические адаптивные системы. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.
9. Большасова Л.А., Лукин В.П. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. – М.: Физматлит, 2012. – 125 с.
10. Малашко Я.И., Наумов М.Б. Системы формирования мощных лазерных пучков. – М.: Радиотехника, 2013. – 328 с.
11. Мальцев Г.Н. Исследование итерационного алгоритма обработки измерений датчиков волнового фронта гартмановского типа // Оптика и спектроскопия. – 1996. – Т. 81, № 3. – С. 442–445.
12. Кийко В.В., Кислов В.И., Офицеров Е.Н. Алгоритм восстановления распределения фазы поля при измерениях датчиком Гартмана // Квантовая электроника. – 2008. – № 4. – С. 359–364.
13. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика. – М.: Радио и связь, 1990. – 112 с.
14. Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184, № 6. – С. 599–640.
15. Корниенко А.А., Мальцев Г.Н. Применение спектральных разложений полиномов Цернике при исследовании аббераций адаптивных оптических систем // Оптико-механическая промышленность. – 1988. – № 6. – С. 19–22.
16. Безуглов Д.А., Сахаров И.А. Метод восстановления волнового фронта в базисе ортогональных функций // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11. – С. 27–31.
17. Gavrielides A. Vector polynomials orthogonal to the gradient of Zernike polynomials // Opt. Lett. – 1982. – Vol. 7, № 3. – P. 526–528.

18. *Greenwood D.P.* Mutual coherence function of a wavefront corrected by zonal adaptive-optics // *J. Opt. Soc. Am.* – 1979. – Vol. 69, № 4. – P. 549–553.
19. *Noll R.J.* Zernike polynomials and atmospheric turbulence // *J. Opt. Soc. Am.* – 1976. – Vol. 66, № 3. – P. 207–211.
20. *Novoseller D.E.* Zernike-ordered adaptive-optics correction of thermal blooming // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1988. – Vol. 5, № 11. – P. 1937–1942.
21. *Шанин О.И.* Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. – М.: Техносфера, 2013. – 296 с.
22. *Устинов Н.Д., Матвеев И.Н., Протопопов В.В.* Методы обработки оптических полей в лазерной локации. – М.: Наука, 1983. – 272 с.

К.В. Бакурский,
кандидат техн. наук, доцент;
Т.О. Мысливцев,
доктор технических наук, доцент;
С.В. Никифоров,
кандидат техн. наук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЕРХДЛИННОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Обоснованы предложения по резервированию каналов доведения частотно-временной информации в сверхдлинноволновом диапазоне за счет использования ресурса радиотехнических систем дальней навигации. Предложен способ формирования, оцифровки и передачи метки времени в структуре сигнала РСДН-20 «Альфа». Приведена потенциальная точность синхронизации шкалы времени потребителя этим способом.

Ключевые слова: метка времени, шкала времени, радиотехническая система дальней навигации, временная эпоха.

ВВЕДЕНИЕ

На практике синхронизация шкал времени (ШВ) потребителей, разнесенных в пространстве, осуществляется на основе частотно-временной информации (ЧВИ), которая предоставляется Государственной службой времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) РФ. Основными средствами передачи эталонных сигналов являются ГНСС ГЛОНАСС, сети радиоэлектронных средств сверхдлинноволнового (СДВ) и длинноволнового (ДВ) диапазонов, а также глобальная сеть *Internet* [1].

Наиболее точная передача единиц времени и частоты реализуется с использованием системы ГНСС ГЛОНАСС [1], но современные тенденции развития радиоэлектронных средств диктуют необходимость дублирования каналов передачи ЧВИ. В этой связи возникает необходимость использования альтернативных каналов доведения единиц времени и частоты.

Важное место в структуре доведения ЧВИ до потребителя занимают системы, работающие в СДВ диапазоне. Неослабевающий интерес к этим системам объясняется возможностью передачи данных для радиоэлектронных средств на земле, в воздухе, под водой и подо льдом в глобальном масштабе, в любое время суток и года, в любых погодных условиях при небольшом числе передающих наземных станций, с приемлемой для многих потребителей качеством информации [2].

В статье предложен формат навигационного кадра радиотехнических систем дальней навигации (РСДН) «Альфа» (РСДН-20) для передачи метки времени и ее оцифровки. Приведена потенциальная точность синхронизации ШВ потребителя в зоне действия навигационной системы СДВ диапазона.

АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ РСДН-20 ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

На сегодняшний день для передачи сигналов эталонных частот и единого времени в СДВ диапазоне применяются мощные радиостанции связи Военно-морского флота (ВМФ) ВС РФ: «Геркулес» (РЙХ-77) под Архангельском, «Антей» (РЙХ-69) под Молодечно (Белоруссия),

«Титан» (РАБ-99) под Хабаровском, «Прометей» (РЙХ-86) под Бишкеком (Киргизия), «Океан» (РЙХ-63) под Краснодаром и «Голиаф» (РЙХ-90) под Нижним Новгородом.

Устойчивый прием сигналов радиостанций связи СДВ диапазона обеспечивается при расстоянии между передатчиком и потребителем от 300 до 10000 км, причем погрешность привязки колеблется от 5 до 20 мкс. Несущие частоты передаваемых сигналов находятся в диапазоне 20500–25500 Гц.

Передача ЧВИ осуществляется по расписанию (сеансами длительностью 47 или 36 минут) связными радиостанциями (табл. 1), две из которых находятся за пределами Российской Федерации. Всё это негативно влияет на размер рабочей зоны, непрерывность обслуживания (функционирования), доступность, целостность системы частотно-временного обеспечения в СДВ диапазоне и на оперативность передачи сигналов эталонных частот и единого времени потребителю [3].

Таблица 1

**Характеристики и программы передач эталонных сигналов частоты и времени
СДВ радиостанций ВМФ ВС РФ**

РАБ-99 г. Хабаровск	РЙХ-69 п. Молодечно	РЙХ-90 г. Н. Новгород	РЙХ-77 г. Архангельск	РЙХ-86 г. Бишкек	РЙХ-63 г. Краснодар
Продолжительность работы					
Ежедневно, кроме 10, 20 и 30 числа каждого месяца	Ежедневно, кроме 2, 12 и 22 числа каждого месяца	Ежедневно, кроме 8, 18 и 28 числа каждого месяца	Ежедневно, кроме 4, 14 и 24 числа каждого месяца	Ежедневно, кроме 6, 16 и 26 числа каждого месяца	Ежедневно, кроме 3, 13 и 23 числа каждого месяца
Время передачи (московское)					
05 ч 06 мин– 05 ч 36 мин	07 ч 06 мин– 07 ч 47 мин	11 ч 06 мин– 11 ч 47 мин	12 ч 06 мин– 12 ч 47 мин	13 ч 06 мин– 13 ч 47 мин	13 ч 06 мин– 13 ч 40 мин
09 ч 06 мин– 09 ч 36 мин	10 ч 06 мин– 10 ч 47 мин	-	-	-	-

Альтернативой связным радиостанциям ВМФ для передачи ЧВИ являются РСДН, у которых информация о времени содержится в фазах излучаемых сигналов. Такая РСДН – это российская радионавигационная система РСДН-20 «Альфа», которая работает в диапазоне 11–17 кГц по тем же принципам, что и американская навигационная система *Omega*, находящаяся в данный момент на консервации [4].

В состав системы РСДН-20 входят четыре опорные станции: станция А – г. Новосибирск, станция Б – г. Краснодар, станция В – г. Комсомольск-на-Амуре и станция Г – п. Ревда Мурманской области [2]. РСДН-20 предназначена для навигационного обеспечения самолетов, надводных кораблей и подводных лодок. Зона действия системы охватывает до 60% поверхности Земли (данная зона отмечена серым цветом на рис. 1).

Время распространения СДВ сигналов зависит от высоты слоя *D* ионосферы, протяженности трассы, проводимости подстилающей поверхности, а также от сезона года и времени суток. Кроме того, необходимо учитывать, что фазовая скорость распространения СДВ сигналов становится стабильной на удалениях от передатчиков, начиная от 300 км (ближняя зона указана овалами на рис. 1).

Предположительно время доведения ЧВИ при таком построении сопоставимо с временем оценки потребителем своих навигационных параметров (2–5 мин). Эти условия позволяют обеспечить непрерывность, доступность и оперативность передачи сигналов эталонных частот и единого времени потребителю в неизменяемой рабочей зоне круглосуточно.

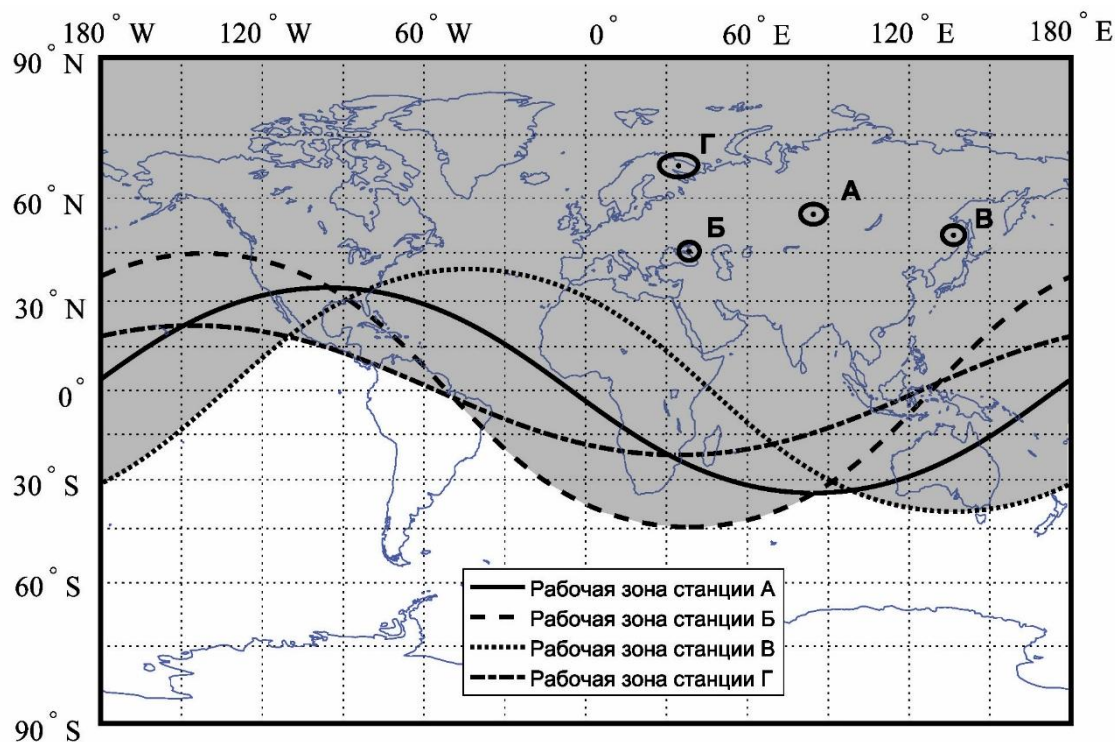


Рис. 1. Зона действия РСДН-20 и места размещения опорных станций

ВАРИАНТ ОЦИФРОВКИ МЕТКИ ВРЕМЕНИ В СТРУКТУРЕ НАВИГАЦИОННОГО СИГНАЛА РСДН-20

Опорные пункты привязки РСДН-20 обеспечивают синхронизацию ШВ бортовых приемоиндикаторов относительно государственного эталона ГСВЧ с нестабильностью излучаемых частот 10^{-12} .

Сигналы рабочих частот опорных станций РСДН-20 формируются из сигнала высокостабильной частоты 5 МГц путем деления до опорной частоты $f_{0ч} = 744 \cdot 1/21$ Гц и последующего умножения: $f_1 = f_{0ч} \times 16 = 11904,76$ Гц, $f_2 = f_{0ч} \times 17 = 12648,80$ Гц и $f_3 = f_{0ч} \times 20 = 14880,95$ Гц. Вспомогательная частота $f_4 = f_{0ч} \times 216/16 = 12090,77$ Гц излучается только станцией Г (п. Ревда). Для решения некоторых специальных задач, например для создания системы поиска и спасения, зона однозначного определения должна быть расширена. С этой целью вводятся дополнительный сигнал – поисковой частоты $f_{п} = f_3 + 5/36$ Гц = 14881,09 Гц [2].

Структура навигационного кадра РСДН-20 представлена на рис. 2. Первые четыре сегмента в кадре используются для навигации потребителей, а два последующих – для передачи дополнительной информации или межстанционного обмена. При их передаче использовано частотно-временное разделение: в цикле длительностью $T_{ц} = 3,6$ с передаются посылки по 400 мс с немодулированным сигналом на каждой рабочей частоте. Принудительное обнуление фазы сигнала, излучаемого на каждой рабочей частоте, производится один раз в момент смены суток. Интервалы между сигналами составляют 0,2 с, что исключает необходимость повышения требований к точности настройки коммутатора приемоиндикатора (допустимая погрешность установки порядка 0,1 с) и предотвращает одновременный прием от разных станций [4].

Минимальный период для всех излучаемых сигналов опорных станций – 1,344 мс. Однозначно измерить фазу всех рабочих частот возможно на интервале 25,2 с. Данный промежуток времени является эпохой РСДН-20.

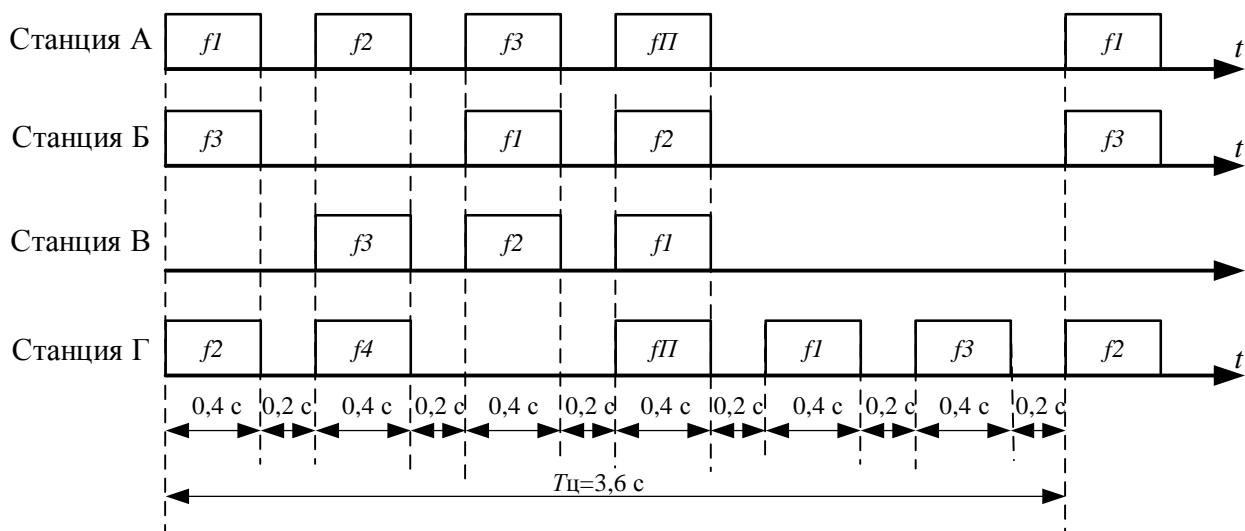


Рис. 2. Структура навигационного кадра РСДН-20

Для РСДН-20 в качестве метки времени может служить начало 25,2-секундного интервала, что составляет 7 циклов излучения кадра длительностью 3,6 с.

Таким образом, потребитель, зная дату и год, в момент смены суток (момент обнуления фазы $f_{0ч}$) включает счетчик кадров (длительность 3,6 с) и может однозначно определить время в сутках по формуле [5]

$$t_{\text{изм}} = N_{3,6} \cdot 3,6 + \xi_c(t_{\text{изм}}) / f_c, \quad (1)$$

где $N_{3,6}$ – количество навигационных кадров длительностью 3,6 с от начала суток;

$\xi_c(t_{\text{изм}})$ – фаза сигнала в пределах 25,2-секундного интервала, приведенная к 1 Гц;

f_c – рабочая частота сигнала.

Если аппаратура потребителя работает в автоматическом режиме без доступа к априорной информации, то в структуру сигнала РСДН-20 необходимо вносить оцифровку меток времени, учитывающих номера года, дня в году, часа и минут. Если дата приема сигнала известна из других источников, достаточно в структуре сигнала передавать только номера часа и минут. Из-за особенностей структуры навигационного кадра (длительность не целое число секунд) РСДН-20 для метки времени еще необходимо указывать номер секунды. Для передачи и оцифровки метки времени предлагается внести понятие суперкадра (рис. 3) длительностью 126 с [5].



Рис. 3. Структура предлагаемого суперкадра для РСДН-20

В суперкадре первые 75,6 с, что составляет 3 эпохи (21 навигационный кадр по 3,6 с), выделены для передачи начала метки времени и оцифровки этой метки. Затем в течение следующих 50,4 с, что составляет 2 эпохи (14 навигационных кадров по 3,6 с), может быть передана дополнительная информация.

Навигационный кадр включает шесть интервалов, когда может быть излучен сигнал. Первые четыре интервала занимают навигационные импульсы на рабочих частотах, два последних не заняты (кроме станции Г). Эти два импульса можно использовать для двоичного кодирования метки времени. Единицу и ноль можно передать путем смены частот неиспользуемых импульсов. Всем опорным станциям РСДН-20 потребуется восемь радиочастот, которые могут включать как рабочие радиочастоты, так и любые разрешенные дополнительные.

Как пример рассмотрим вариант передачи метки времени и ее оцифровки для ведущей станции А. Для этого будем использовать радиочастоты f_2 и f_5 . Положим $f_5 = f_{0ч} \times 18 = 13392,85$ Гц. Метка времени будет передаваться двумя импульсами с рабочей частотой f_2 . Эта мера принята для того, чтобы не перепутать метку времени станции А с дополнительной информацией станции Г. Единица будет передаваться сменой частот с f_2 на f_5 , а ноль – с f_5 на f_2 . Пример кодировки метки времени и ее оцифровка для станции А представлены на рис. 4.

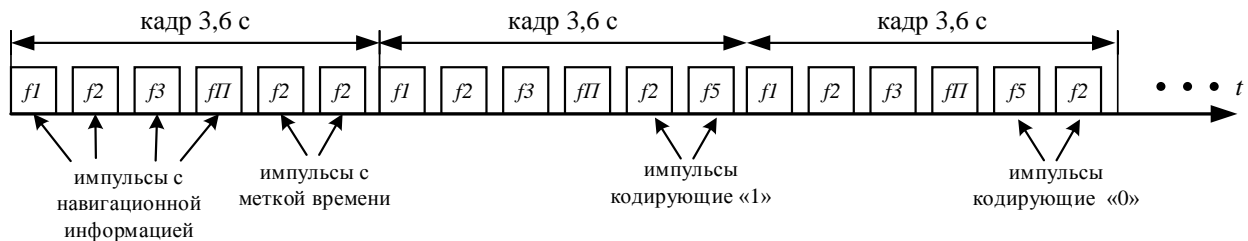


Рис. 4. Пример кодировки метки времени и ее оцифровка для станции А

Для оцифровки метки времени и ее передачи необходимо 18 навигационных кадров. Метка времени задает первый кадр. Последующие навигационные кадры содержат по одному биту информации (0 или 1). Для передачи номера часа потребуется 5 бит (5 кадров), минут – 6 бит (6 кадров) и секунд – 6 бит (6 кадров), т. е. 17 бит (17 кадров).

Структура первой половины суперкадра для станции А представлена на рис. 5. В представленном суперкадре на момент времени t_1 передана метка времени для текущих суток: 22 часа (в двоичном коде – 10110), 57 минут (в двоичном коде – 111001) и 36 секунд (в двоичном коде – 100100).

Вторая половина суперкадра включает в себя штатную структуру сигнала РСДН-20, в которой содержится дополнительная информация межстанционного обмена.

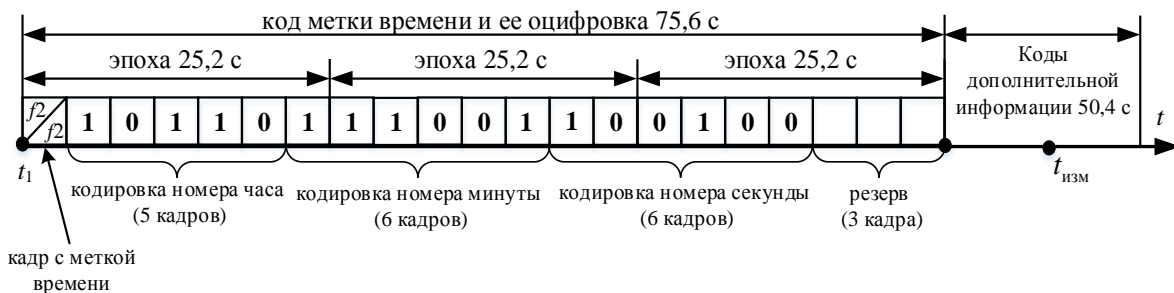


Рис. 5. Структура первой половины суперкадра для станции А

Если для метки времени потребуется более подробная информация (номер года и число месяца), то длительность суперкадра придется увеличить вдвое до 252 с.

Для определения времени потребителю в момент времени $t_{изм}$ потребуется учесть:

- целое число кадров $N_{3,6}$, укладываемых от начала суперкадра до $t_{изм}$;
- целое число N_{f1} периода сигналов f_1 (11904,76 Гц), укладываемых на интервале времени от начала кадра до момента измерения $t_{изм}$.

Тогда время в секундах от начала суток можно будет найти по формуле [5]

$$t_{\text{изм}} = N_{\text{ч}} \cdot 36000 + N_{\text{мин}} \cdot 60 + N_{\text{с}} + N_{3,6} \cdot 3,6 + \frac{N_{f_1} + \xi_{f_1}(t_{\text{изм}})}{f_1}, \quad (2)$$

где $N_{\text{ч}}$ – количество прошедших часов;

$N_{\text{мин}}$ – количество прошедших минут;

$N_{\text{с}}$ – количество прошедших секунд;

N_{f_1} – количество периодов колебаний сигнала на частоте f_1 , прошедших от начала кадра длительностью 3,6 с.

Аналогичным образом происходят передача метки времени и ее оцифровка для всех станций радионавигационной системы. В случае, если структуру кадра при передаче дополнительной информации менять нельзя, то метку времени смогут передавать только станции А, Б и В, что ненамного сократит рабочую зону РСДН-20 по обеспечению ЧВИ в районе Мексиканского залива. Для оценки $t_{\text{изм}}$ по сигналам других станций предлагается использовать частоты f_2 (12648,80 Гц) для Б и Г и f_3 (14880,95 Гц) для В.

Если известны координаты опорных станций, то при прогнозировании величины дополнительного фазового набег и точности слежения за фазой рабочего сигнала $\xi_{\text{с}}$ не хуже 3,6 град [6] можно обеспечить высокую точность привязки потребителя, составляющую 5–25 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При передаче метки времени в структуре сигнала РСДН-20 возможно создать резервные каналы доведения ЧВИ до потребителя. Потенциальная точность синхронизации ШВ потребителя в данном случае является эквивалентной использованию связанных радиопередающих станций ВМФ и может составить 5–25 мкс.

Проведенные расчеты показали, что, не изменяя структуры навигационной части сигнала, можно передать метку времени и оцифровать ее:

- для постоянно работающей аппаратуры потребителя синхронизацию можно осуществлять в момент смены суток, а далее высчитывать свое время согласно выражению (1);
- для аппаратуры потребителя, когда известны дата и год измерений, требуется передать номера часа в сутках, минут и секунд, для чего используется выражение (2);
- для аппаратуры потребителя, работающей в автоматическом режиме, требуется расширить длительность суперкадра до 252 секунд с целью передачи номеров года, месяца в году, часа в сутках, минут и секунд.

Передача ЧВИ может одновременно осуществляться всеми опорными станциями: А, Б, В и Г. При приеме меток времени потребитель, исходя из своего местоположения, должен выбирать либо «дневные», либо «ночные» трассы от опорной станции.

Напряженность поля сигнала СДВ диапазона зависит от направления распространения радиоволны [6]. Напряженность поля сигнала при распространении в восточном направлении значительно больше, чем при распространении сигнала в северном, южном и особенно западном направлениях. Кроме того, затухание сигнала в дневное время сильнее, чем в ночное. Исходя из размещения наземных станций, следует выбирать для работы такие станции, для которых направление распространения сигнала и дальности будет более благоприятным.

Список используемых источников

1. Бюллетень В16/2018. Эталонные сигналы частоты и времени. Характеристики и программы передач через радиостанции, наземные и космические средства навигации, сети телевизионного вещания и глобальную сеть интернет / Межведомственная комиссия по времени и эталонным частотам. Главный метрологический центр ГСВЧ. ФГУП «ВНИИФТРИ». – М.: Изд-во ВНИИФТРИ, 2018. – 32 с.
2. *Давыдов В.А.* Электроразведка методом радиокип в сверхдлинноволновой модификации с использованием радиостанций системы дальней навигации РСДН-20 («АЛЬФА») // Инженерные изыскания. – 2014. – № 2. – С. 65–70.
3. Радиоэлектронные средства частотно-временного обеспечения: учеб. пособие. – МО РФ, 2000. – 182 с.
4. Радионавигационные системы сверхдлинноволнового диапазона / С.Б. Болошин, Г.А. Семенов, А.С. Гузман и др.; под ред. П.В. Олянюка, Г.В. Головушкина. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
5. *Поваляев А.А.* О понятийных основах радионавигации // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Т. 3., вып. 1. – С. 11–26.
6. *Кинкулькин Е.И., Зубцов В.Д., Фабрик М.А.* Фазовый метод определения координат / под ред. Е.И. Кинкулькина. – М.: Сов. радио, 1979. – 280 с.

С.О. Бурлаков,
доктор техн. наук, профессор
Военная академия связи имени С.М. Будённого;
А.А. Смирнов,
кандидат техн. наук
Военная академия связи имени С.М. Будённого;
К.Ю. Цветков,
доктор техн. наук, профессор
ВКА имени А.Ф. Можайского

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ И БОРТОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Рассматриваются научно-технические предложения по реализации методики распределения частотно-энергетического ресурса земных станций и бортовых радиотехнических комплексов для обеспечения абонентов высокоскоростной системы спутниковой связи необходимым набором телекоммуникационных услуг с учетом динамического распределения и перераспределения трафика.

Ключевые слова: центральная земная станция, абонентская земная станция, бортовой ретрансляционный комплекс, частотно-энергетический ресурс, высокоскоростная спутниковая система, трафик.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях при проведении силовой операции состав группировки войск быстро меняется. Вместе с тем меняются количество абонентских земных станций (АЗС), обслуживаемых сетевым сегментом, требования к пропускной способности, определяемые количеством и качеством услуг, предоставляемых должностным лицам. В этой связи задача правильного распределения частотно-энергетического ресурса с учетом ограничений, требований к пропускной способности прямого направления (ПН) с заданными показателями неготовности и достоверности является одной из важнейших задач, решаемых при планировании [1–3].

В статье излагаются предложения по реализации методики распределения частотно-энергетического ресурса [4, 5] при определении требуемого значения пропускной способности ПН для обеспечения абонентов сети спутниковой связи необходимым набором услуг.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА

В настоящее время перечень услуг (уровней сервиса), необходимых для предоставления должностным лицам пунктов управления (ПУ), не установлен, а значение требуемой пропускной способности определяется общим объемом передаваемой информации между ПУ. Предположим, что уровни сервиса соответствуют модели сервиса, предлагаемой компанией *Newtec* в следующем порядке:

– высокоскоростной групповой доступ (соглашение об уровне предоставления услуги SLA1), требующий для обмена данными большей пропускной способности;

- высокоскоростной индивидуальный доступ (SLA_2) для командира соединения (объединения) и его заместителей;
- среднескоростной индивидуальный доступ (SLA_3) для командиров отдельных подразделений;
- низкоскоростной индивидуальный доступ (SLA_3) для отдельных должностных лиц, для которых существует необходимость в использовании терминалов спутниковой связи.

На основе методики распределения частотно-энергетического ресурса разработан алгоритм определения требуемой пропускной способности для обеспечения всех должностных лиц необходимым набором услуг и значений характеристик функционирования (рис. 1).

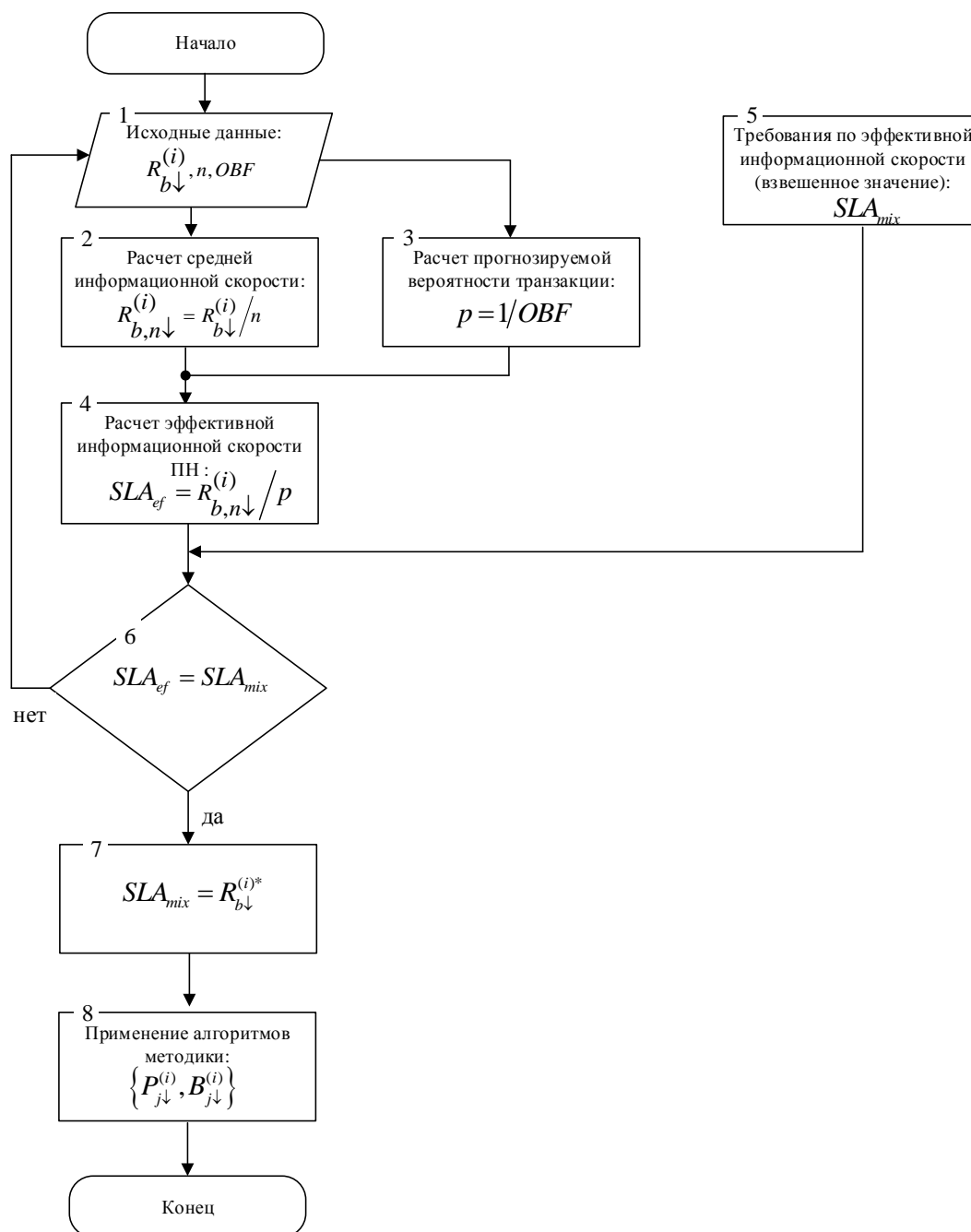


Рис. 1. Алгоритм определения требуемой пропускной способности ПН с учетом уровней сервиса (значение OBF основано на статистических данных)

В блоке 1 определяются исходные данные: пропускная способность ПН i -го сетевого сегмента $R_{b\downarrow}^{(i)}$, количество абонентов n , коэффициент превышения OBF ,

$$OBF = SLA_{\text{mix}} / QOS, \quad (1)$$

где SLA_{mix} – требуемое значение взвешенной пропускной способности ПН, определяемое количеством долей абонентов (%) по заданным уровням сервиса от общего их количества;

QOS – качество обслуживания (средняя скорость и объем переданных данных).

Требования по эффективной информационной скорости (блок 5) определяются из выражения

$$SLA_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^m SLA_i \cdot (n_i / 100\%), \quad (2)$$

где SLA_i – значение пропускной способности ПН для рассматриваемого уровня сервиса, Мбит/с;

n_i – доля пользователей рассматриваемого уровня сервиса, %;

m – количество уровней обслуживания.

В блоке 2 определяется значение информационной скорости в ПН на одного абонента. Расчет прогнозируемой вероятности транзакции производится в блоке 3. Расчет эффективной информационной скорости ПН, исходя из вероятности транзакции SLA_{ef} , производится в блоке 4. В блоке 6 проверяется выполнение критерия $SLA_{\text{ef}} = SLA_{\text{mix}}$. Если критерий не выполняется, то проводится корректировка значения пропускной способности ПН, в противном случае данное значение является исходным значением $R_{b\downarrow}^{(i)*}$ (блок 7) для реализации методики (блок 8) и определения набора пар $\{P_{j\downarrow}^{(i)}, B_{j\downarrow}^{(i)}\}$.

Определена зависимость количества АЗС, осуществляющих одновременную транзакцию, от выделенного частотного ресурса (рис. 2). Мощность на несущую составляет 9,95 Вт, максимальная полоса пропускания, выделенная для каждой несущей, – 18 МГц, средняя скорость ПН для одного абонента – 11 кбит/с.

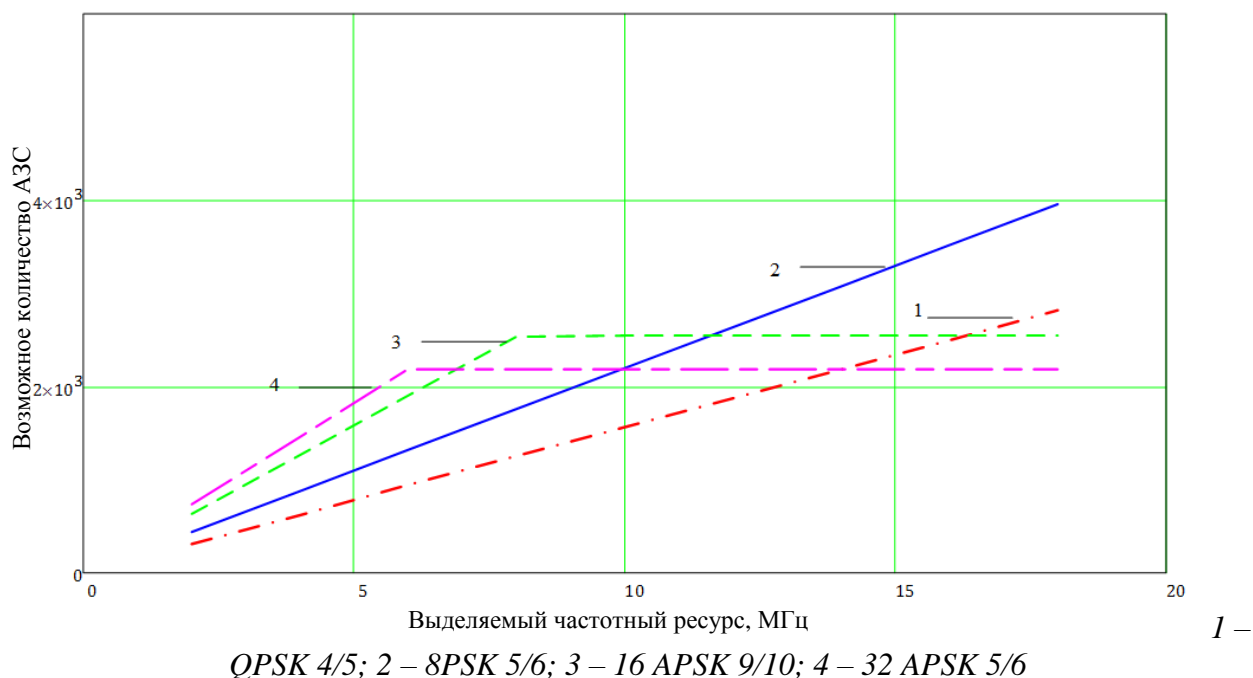


Рис. 2. Зависимость количества АЗС от выделяемого частотного ресурса

Из представленных результатов следует, что применение спектрально эффективных сигнально-кодовых конструкций (СКК) при ограниченном энергетическом ресурсе менее эффективно. Максимальное количество АЗС достигается при использовании 8PSK 5/6.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АЛГОРИТМОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ТРАФИКА

Для поддержания требуемой пропускной способности при выполнении условий по неготовности и достоверности ПН уровень мощности несущей на выходе передающего устройства центральной земной станции (ЦЗС) устанавливается с учетом прогнозируемых потерь сигнала в гидрометеорах [6]. При этом в условиях ясного неба в абонентской линии (АЛ) образуется энергетический запас. Зона обслуживания одного луча может включать в себя зоны с различными радиоклиматическими параметрами, соответственно, уровень запаса мощности, необходимый для компенсации потерь в гидрометеорах, также различается. С учетом того, что частотно-энергетический ресурс высокоскоростной системы спутниковой связи ограничен, целесообразно энергетический запас, образующийся в условиях ясного неба в зонах обслуживания одних сетевых сегментов, использовать для компенсации потерь сигнала в гидрометеорах других сетевых сегментов, динамически перераспределяя его (частотно-энергетический ресурс) (рис. 3).

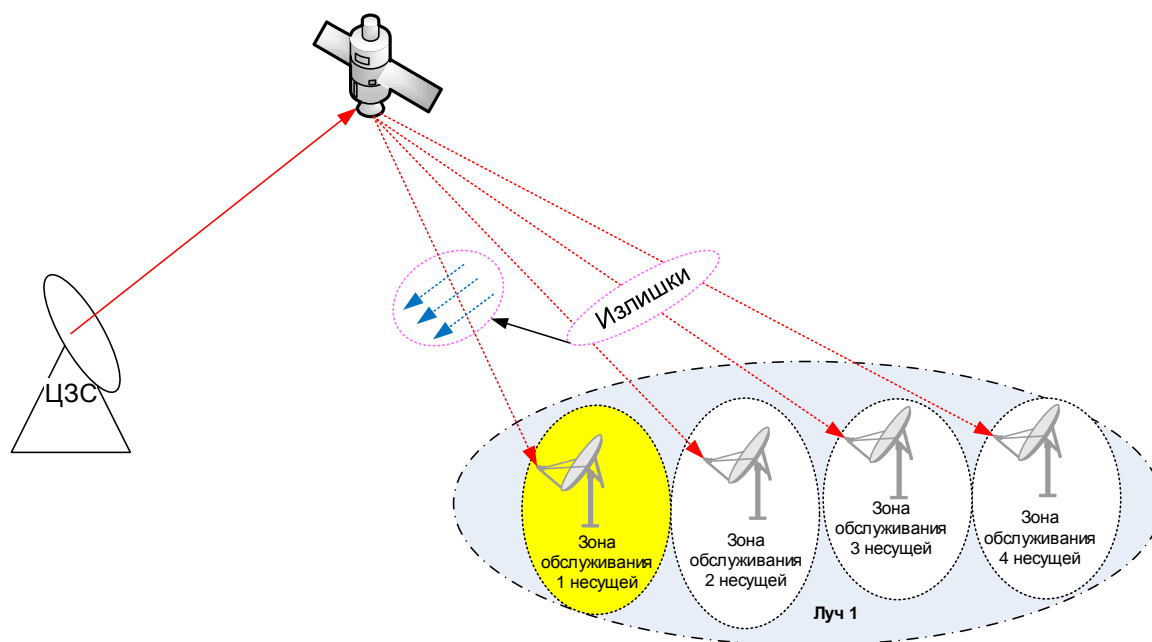


Рис. 3. Принцип перераспределения частотно-энергетического ресурса между несущими одного луча обслуживания

В качестве основы алгоритма динамического перераспределения частотно-энергетического ресурса предлагается применить алгоритм распределения частотно-энергетического ресурса при групповом использовании (рис. 4). В соответствии с требованиями к показателям неготовности и достоверности с учетом ограничений частотно-энергетического ресурса (блок 1) осуществляется работа алгоритма распределения частотно-энергетического ресурса при групповом использовании (блок 2). В блоке 3 определяется

энергетический запас, образуемый в условиях ясного неба для каждой из несущих $M_s^{(i)}, i = \overline{1, n}$. В блоке 4 определяется максимально достижимая пропускная способность ПН, если произошло событие В1 (выпадение осадков), далее происходит проверка выполнения критерия блока 5, если есть условие $R_{b\downarrow}^{(i)} \geq R_{b\downarrow}^{(i)*}$, то работа алгоритма заканчивается, иначе исходя из запаса энергетического ресурса в ясном небе происходит перераспределение частотно-энергетического ресурса в соответствии с алгоритмом блока 2.

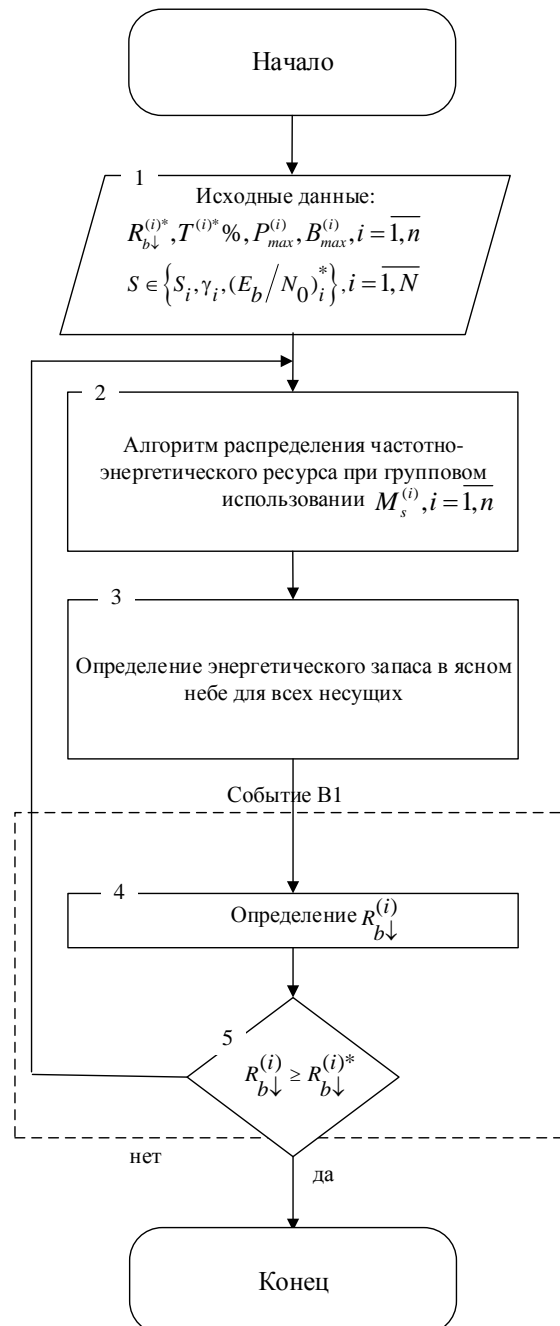


Рис. 4. Алгоритм динамического перераспределения частотно-энергетического ресурса

В результате работы алгоритма получены графические зависимости (рис. 5–8).

В качестве ЦЗС рассматриваются мобильные станции контейнерного типа, используемые в условиях чрезвычайной ситуаций, с параметрами, принимаемыми в качестве исходных

данных [7–10] для реализации алгоритма динамического перераспределения частотно-энергетического ресурса (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для реализации алгоритма динамического перераспределения частотно-энергетического ресурса

Наименование параметра	Значение
Мощность передатчика, Вт	100
Количество несущих (сетевых сегментов)	4
Коэффициент недоиспользования мощности по выходу в многосигнальном режиме, дБ	4
Мощность на несущую, Вт	10
Полоса транспондера ПН, МГц	72
Полоса пропускания на несущую, МГц	18
Требуемая пропускная способность ПН 1-го сетевого сегмента, Мбит/с	35
Требуемая пропускная способность ПН 2-го сетевого сегмента, Мбит/с	35
Требуемая пропускная способность ПН 3-го сетевого сегмента, Мбит/с	35
Требуемая пропускная способность ПН 4-го сетевого сегмента, Мбит/с	50
Показатель неготовности по дождевому фактору, %	3
Сигнально-кодовые конструкции в соответствии со стандартом DVB-S2	

Результаты расчета максимальной пропускной способности, исходя из максимальных значений выделяемого частотного и энергетического ресурса, при выполнении требований по неготовности и достоверности для каждого сетевого сегмента получены при используемой СКК в ПН – 8 PSK5/6 (рис. 5).

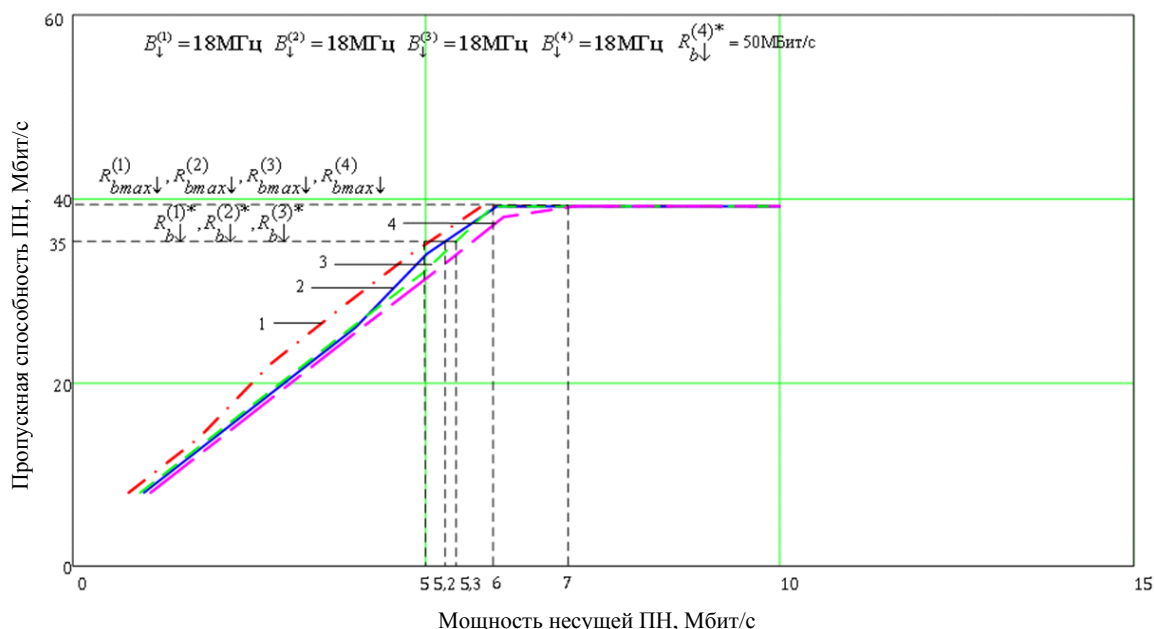


Рис. 5. Зависимость пропускной способности от мощности несущей для четырех сетевых сегментов

Анализ результатов (рис. 5) показал, что достижимое значение пропускной способности ПН для сетевых 1-го, 2-го, 3-го сегментов $R_{b\max\downarrow}^{(1)*} = R_{b\max\downarrow}^{(2)*} = R_{b\max\downarrow}^{(3)*} = 39$ Мбит/с выше требуемого значения $R_{b\downarrow}^{(1)*} = R_{b\downarrow}^{(2)*} = R_{b\downarrow}^{(3)*} = 35$ Мбит/с. Максимальное значение пропускной способности

ограничивается выделенным частотным ресурсом. Для 4-го сетевого сегмента $R_{b\max\downarrow}^{(1)} \leq R_{b\downarrow}^{(1)*}$ также максимально достижимое значение ограничивается выделенной полосой пропускания. Результаты перераспределения частотного ресурса между сетевыми сегментами представлены зависимостями пропускной способности ПН от мощности несущей ПН (рис. 6).

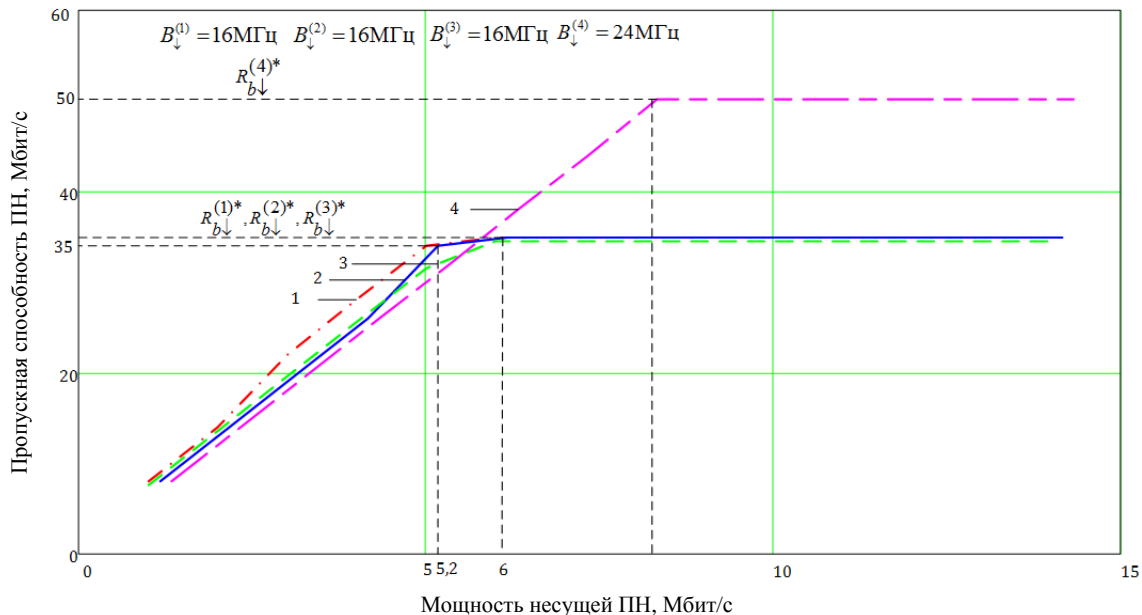


Рис. 6. Результаты перераспределения частотного ресурса

В результате перераспределения частотного ресурса между сетевыми сегментами достижимое значение 4-го сетевого сегмента $R_{b\max\downarrow}^{(4)} = 50$ Мбит/с, при этом требования по пропускной способности выполняются. Значения полосы пропускания для каждого сетевого сегмента следующие: $B_{\downarrow}^{(1)} = B_{\downarrow}^{(2)} = B_{\downarrow}^{(3)} = 16$ МГц и $B_{\downarrow}^{(4)} = 24$ МГц.

Расчет максимальной пропускной способности ПН при возникновении события В1 выполнен для каждого сетевого сегмента (рис. 7).

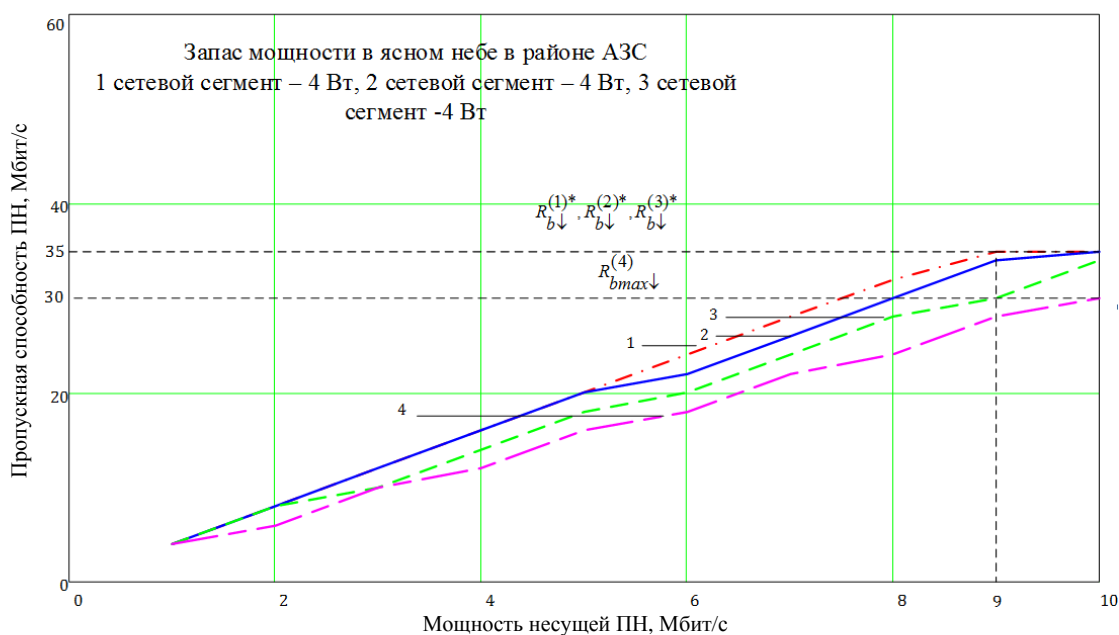


Рис. 7. Максимально достижимые значения пропускной способности ПН при возникновении дождя в АЛ

При этом запас по мощности в ясном небе для 1-го сетевого сегмента составляет 4 Вт, 2-го сетевого сегмента – 4 Вт, 3-го сетевого сегмента – 4 Вт (общий энергетический запас – 12 Вт). Как видно, требуемое значение пропускной способности для 4-го сетевого сегмента в условиях дождя не достигается. Исходя из того, что выпадение осадков (событие В1) в зонах обслуживания всех сетевых сегментов маловероятно, энергетический запас, образованный в условиях ясного неба, может быть использован для компенсации потерь сигнала в зоне обслуживания 4-го сетевого сегмента или для повышения пропускной способности ПН тех сетевых сегментов, где это необходимо (рис. 8).

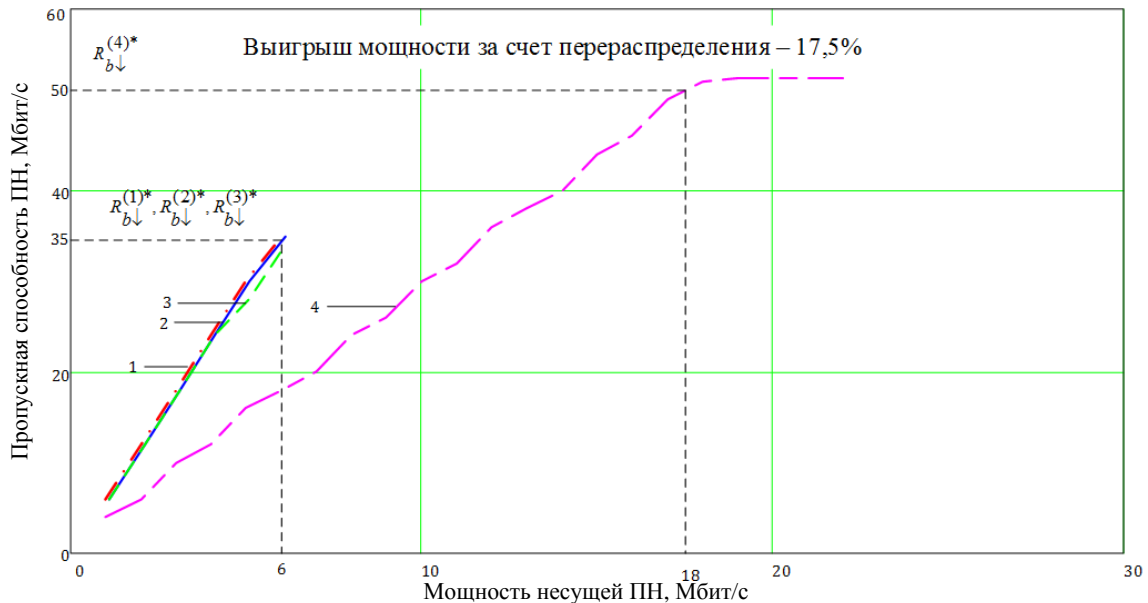


Рис. 8. Результаты перераспределения энергетического ресурса

В результате перераспределения энергетического ресурса в пользу 4-й несущей значение пропускной способности ПН 4 сетевого сегмента достигает требуемого. При этом энергетический запас в ясном небе 1-го, 2-го, 3-го сетевых сегментов израсходован не полностью и может быть использован для компенсации потерь сигналов в гидрометеорах в случае увеличения интенсивности выпадения осадков. Выигрыш в использовании энергетического ресурса составляет 17,5 % (рис. 9).

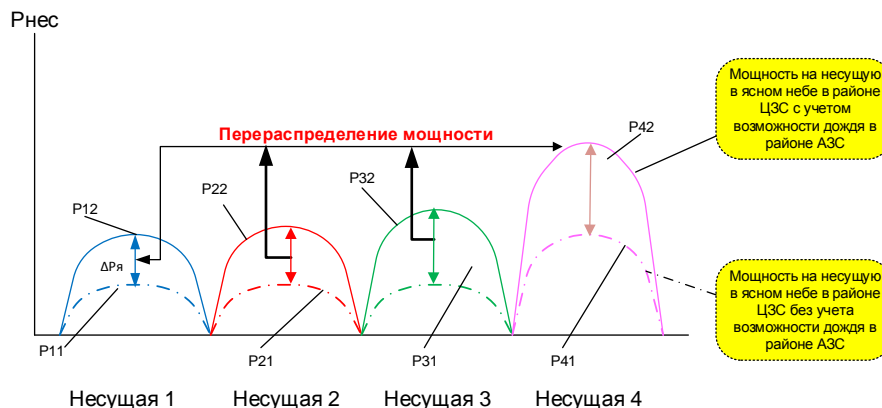


Рис. 9. Графическое представление перераспределения энергетического запаса: $P_{11}, P_{21}, P_{31}, P_{41}$ – мощность на несущую в условиях ясного неба в АЛ; $P_{12}, P_{22}, P_{32}, P_{42}$ – мощность на несущую в условиях дождя в АЛ, $\Delta P_{я}$ – запас в ясном небе

Переход в состояние неготовности тракта передачи ПН, обусловленное дождем на восходящем участке ФЛ (событие А1), приводит к нарушению работоспособности всех направлений спутниковой связи и необходимости повышения мощности всех несущих или снижению пропускной способности ПН при выполнении требований к готовности и достоверности. Для поддержания требуемой пропускной способности ПН при выполнении требований к готовности и достоверности в высокоскоростной системе спутниковой связи предусмотрено резервирование ЦЗС. В соответствии с рекомендацией МСЭ-R P.837-6 («Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн») вероятность выпадения осадков одновременно в районах размещения двух ЦЗС мала.

На основе алгоритма распределения частотно-энергетического ресурса при индивидуальном использовании предлагается алгоритм принятия решения на перераспределения трафика между ЦЗС (рис. 10).

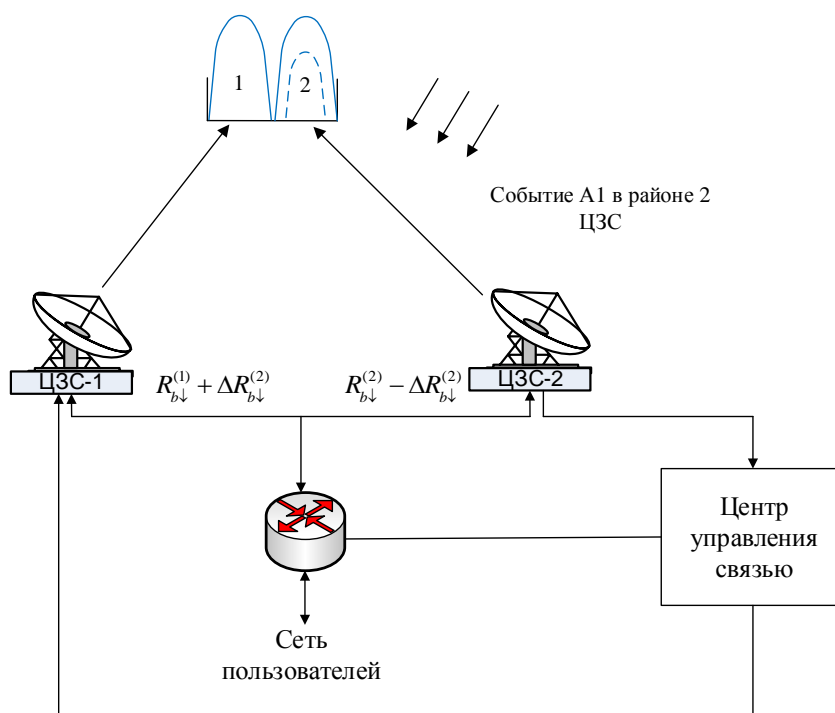


Рис. 10. Принцип перераспределения трафика между ЦЗС

Две ЦЗС, районы размещения которых находятся на удалении более 10 км, используют для обслуживания абонентов по одной несущей. В районе ЦЗС №2 произошло событие А1. При этом мощности несущей для компенсации потерь в гидрометеорах недостаточно. От ЦЗС №2 в центр управления связью поступает информация о снижении пропускной способности ПН. На основании данной информации центр управления связью принимает решение о перераспределении части трафика $\Delta R_{b\downarrow}^{(i)}$ на ЦЗС №1. Часть АЗС, обслуживаемая сетевым сегментом ЦЗС №2, перестраивает свои приемные устройства на частоту несущей ЦЗС №1. Для перераспределения информационного трафика ЦЗС разработан алгоритм (рис. 11).

В блоках 1–6 реализуется алгоритм распределения частотно-энергетического ресурса при индивидуальном использовании. Информация о необходимости смягчения требований к пропускной способности ПН из-за влияния дождя в районе ЦЗС поступает в центр управления связью, в котором на основе предоставленной информации определяется $\Delta R_{b\downarrow}^{(i)}$ и принимается решение о перераспределении информационного трафика (блок 7).

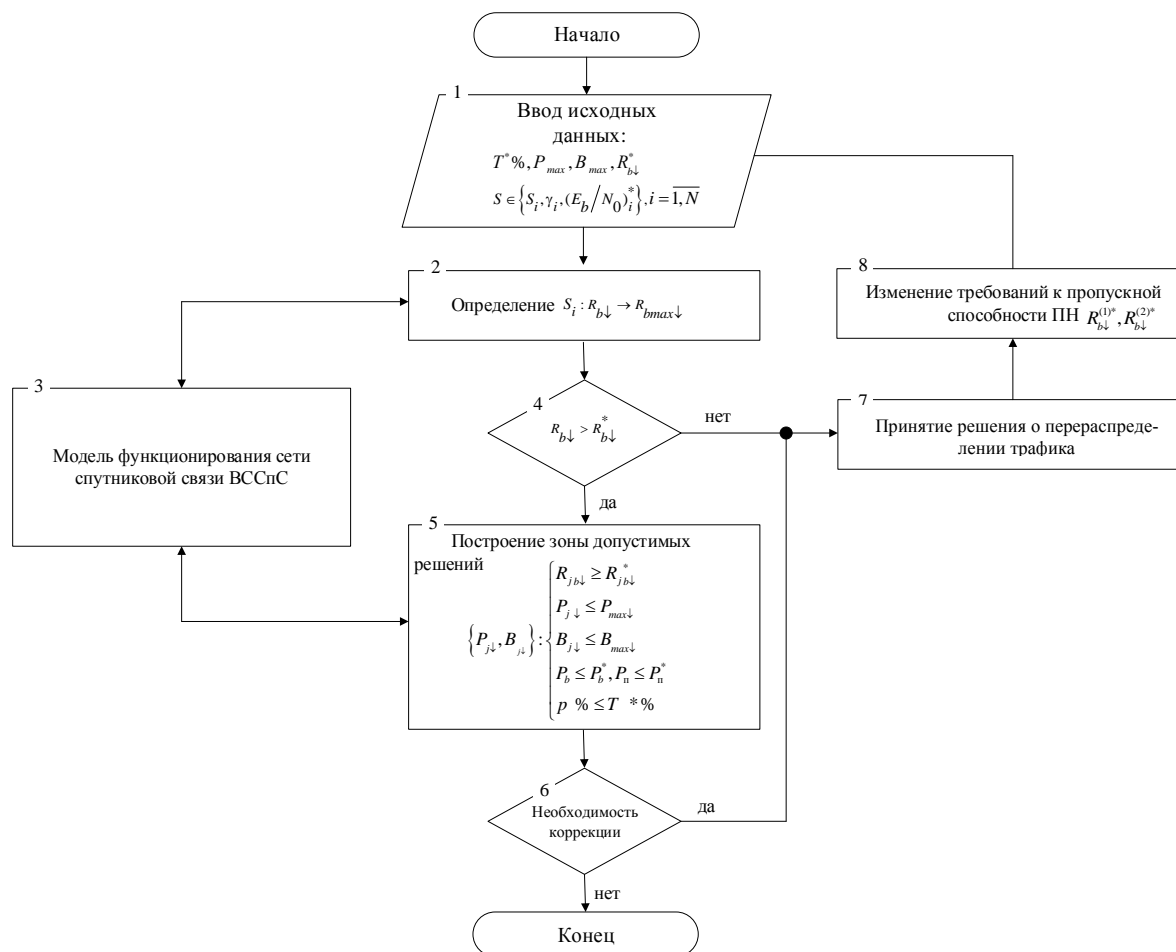


Рис. 11. Алгоритм перераспределения информационного трафика между ЦЗС

Соответственно требования к пропускной способности обеих ЦЗС изменяются (блок 8), и параллельно поступает команда на изменение работы маршрутизатора. Далее операции с 1–6 данного алгоритма повторяются. Применение такого алгоритма позволяет поддерживать общую пропускную способность ПН без смягчения требований неготовности и достоверности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные предложения по использованию методики распределения частотно-энергетического ресурса с учетом уровней обслуживания должностных лиц позволят исключить перерасход этого ресурса. Динамическое перераспределение частотно-энергетического ресурса между сетевыми сегментами при возникновении дождя в АЛ одного из сетевых сегментов также позволяет исключить его перерасход для группы сетевых сегментов. В результате можно получить выигрыш по энергетике порядка 17%.

Список используемых источников

1. Бурлаков С.О., Вылегжанин А.Н. Постановка задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи // 70 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова: труды конференции. – СПб., 2015.
2. Методика распределения частотно-временного ресурса ретранслятора связи в процессе обслуживания пакетов при переносе разнородного трафика в сети связи военного назначения

/ С.О. Бурлаков, А.Н. Вылегжанин и др. // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. Спецвыпуск (направление 05.12.00. «Радиотехника и связь»). – 2018. – С.61–68.

3. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: принципы построения шлюзовых станций и аппаратуры потребителей / К.Ю. Цветков, А.Ф. Акмоллов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 638. – С. 16–24.

4. Особенности использования частотно-энергетического ресурса в высокоскоростных спутниковых системах / В.А. Жиров, С.Г. Зайцев, А.Е. Орлов, А.А. Смирнов // Сборник научных статей IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники», 13-14 декабря. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 464–469.

5. Жиров В.А., Орлов А.Е., Смирнов А.А. Модель спутниковой радиолинии для решения распределения частотно-энергетического ресурса в высокоскоростных спутниковых системах // Научные труды Академии ФСО России: сб. – 2018. – № 41(18). – С.11–15.

6. Пат. РФ № 2307465. Устройство регулирования мощности передачи земной станции спутниковой связи / Бурлаков С.О., Брыдченко А.В. – Заявл. 24.05.06; опубл. 27.09.07, Бюл. № 27.

7. Цветков К.Ю., Новиков Е.А. Информационно-справочная система перевозимой периферийной станции приемопередающего комплекса спутниковой связи // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2017. – № 3 (94). – С. 27. . – URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2017/6.dok> (дата обращения: 9.04.2019).

8. Цветков К.Ю., Новиков Е.А. Информационно-справочная система узловой станции спутниковой связи // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2017. – № 12 (103). – URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2017/6.dok> (дата обращения: 9.04.2019).

9. Информационно-справочная система центральной станции приемопередающего комплекса спутниковой связи / К.Ю. Цветков, Е.А. Новиков и др. // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2017. – № 3 (94). – С. 25. – URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2017/6.dok> (дата обращения: 9.04.2019).

10. Информационно-справочная система периферийной станции приемопередающего комплекса спутниковой связи / К.Ю. Цветков, Е.А. Новиков и др. // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2017. – № 3 (94). – С. 26. . – URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2017/6.dok> (дата обращения: 9.04.2019).

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

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛА С ЧЕТЫРЕХПОЗИЦИОННОЙ КВАДРАТУРНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАРМОНИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ПОМЕХИ

Рассматриваются спутниковые каналы связи при передаче четырехкратного квадратурного фазоманипулированного радиосигнала при воздействии гармонической когерентной помехи. Предлагаемая методика расчета позволяет точно определить энергетические характеристики радиоканала, обеспечивающие требуемое качество приема передаваемых сообщений при наличии гармонической помехи, а также вычислить средние значения вероятности символьных и битовых ошибок при наличии помех.

Ключевые слова: помехоустойчивость, четырехкратная квадратурная фазовая манипуляция, вероятность ошибки приема символа, вероятность битовой ошибки, отношение помеха/шум.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко используются в радиоканалах информационных систем сигналы с квадратурной фазовой манипуляцией (*QPSK* – *Quadrature Phase Shift Keying*). Эффективность функционирования информационных систем, использующих сигналы *QPSK* в условиях воздействия помех, в ряде работ оценивается с помощью методик по расчету средних значений вероятности символьных и битовых ошибок [1–3].

Применение указанных методик расчета помехоустойчивости приводит к разным численным значениям. Каждая подобная методика расчета имеет свой подход к выводу формул, которые основаны на разных, иногда слабо обоснованных и даже ошибочных предположениях. Сигналы *M*-ФМ и *QAM* являются биортогональными [4], а значит, линейно зависимыми при $M \geq 3$, поэтому к ним не применим подход как к ортогональным. У биортогональных сигналов пространство признаков принципиально двумерно, а у ортогональных – *M*-мерно, что в полной мере использовано в данной статье. Кроме того, в ней рассматривается влияние неодинаковости уровней принимаемого и эталонного сигналов.

Результаты существующих сегодня методик показывают, что увеличение значений сигнал/шум или уменьшение отношения помеха/шум приводят к уменьшению средней вероятности символьных и битовых ошибок. Однако влияние неэнергетических параметров в условиях приема сигнала когерентного с помехой в работах [1–3] не показано.

Следовательно, актуальность статьи определяется необходимостью разработки методики, позволяющей получить точные, а не приближенные значения помехоустойчивости при приеме *QPSK* радиосигнала в условиях воздействия одной из самых эффективных гармонической когерентной помехи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При расчете помехоустойчивости приема сигнала с четырехпозиционной квадратурной фазовой манипуляцией при воздействии гармонической когерентной помехи применены две модели.

1. Математическая модель сигнала $\pi/4$ -QPSK:

$$s_1(t) = A_c \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{4}\right);$$

$$s_2(t) = A_c \cos\left(\omega_0 t + \frac{3\pi}{4}\right);$$

$$s_3(t) = A_c \cos\left(\omega_0 t + \frac{5\pi}{4}\right) = -s_1(t) = -A_c \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{4}\right);$$

$$s_4(t) = A_c \cos\left(\omega_0 t + \frac{7\pi}{4}\right) = -s_2(t) = -A_c \cos\left(\omega_0 t + \frac{3\pi}{4}\right),$$

где A_c – амплитуда сигнала, $A_c = \sqrt{2P_c}$;
 ω_0 – частота несущего колебания;
 P_c – мощность сигнала.

2. Математическая модель помехи

$$s_n(t) = A_n \cos(\omega_0 t + \varphi_n),$$

где A_n – амплитуда помехи, $A_n = \sqrt{2P_n}$;
 φ_n – сдвиг фазы помехи относительно фазы сигнала;
 P_n – мощность гармонической помехи.

Таким образом, на вход демодулятора, структурная схема которого представлена на рис. 1, поступает аддитивная смесь сигнала и помех:

$$u^j(t) = s_j(t) + s_n(t) + n(t),$$

где j – показывает номер позиции принятого информационного символа;
 $n(t)$ – шумовая помеха, моделируемая белым гауссовым шумом (БГШ) с корреляционной функцией:

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

где N_0 – односторонняя спектральная плотность БГШ;
 $\delta(t-t')$ – дельта-функция Дирака.

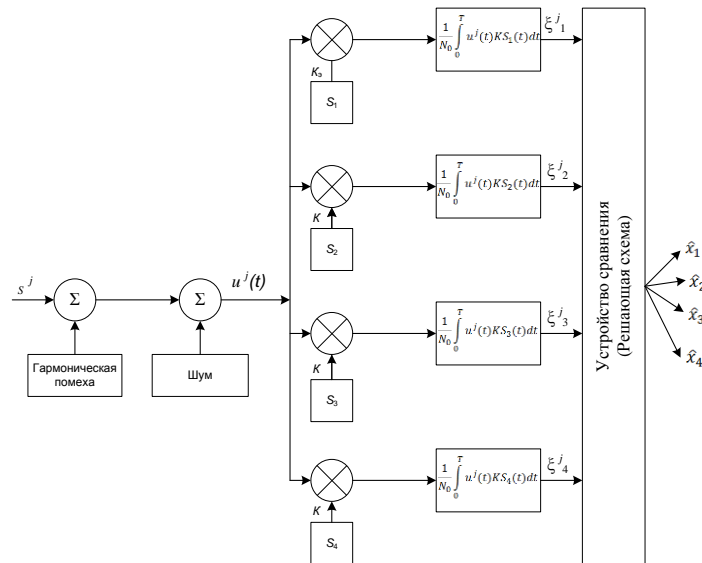


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема корреляционного демодулятора

В данной статье помехоустойчивость функционирования определена средней вероятностью ошибки приема символа. Зная значение вероятности правильного приема символа, можно вычислить среднюю вероятность битовой ошибки.

ПОРЯДОК РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ПРАВИЛЬНОГО ПРИЕМА ИНФОРМАЦИОННОГО СИМВОЛА

Для того чтобы показать существующее различие уровней эталонного и принимаемого сигналов, в функциональную схему демодулятора введен коэффициент K .

Тогда напряжение на выходе i -го коррелятора при приеме j -й позиции сигнала ξ_i^j в момент отсчета T вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \xi^j &= \frac{1}{N_0} \int_0^T [s_j(t) + s_{\text{п}}(t) + n(t)] K s(t) dt = \\ &= \frac{1}{N_0} \int_0^T s_j(t) K s(t) dt + \frac{1}{N_0} \int_0^T s_{\text{п}}(t) K s(t) dt + \frac{1}{N_0} \int_0^T n(t) K s(t) dt; \quad i, j \in (1, 2, 3, 4). \end{aligned}$$

Напряжения с выходов интеграторов сравниваются в решающем устройстве (рис. 1), и выбирается номер вычислителя с максимальным напряжением в момент отсчета T [5, 6]:

$$\hat{x}_i = \max_i^{-1} \xi_i^j, \quad i \in (1, 2, 3, 4).$$

Обозначим вектор напряжений с выходов корреляторов следующим образом:

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

где индекс T – знак транспонирования.

Математические ожидания вектора ξ^j можно представить в виде

$$\langle \xi^j \rangle = \xi^j - \zeta = \frac{1}{N_0} \int_0^T s_j(t) K s(t) dt + \frac{1}{N_0} \int_0^T s_n(t) K s(t) dt, \quad (1)$$

где ζ – вектор напряжений случайных составляющих вектора ξ^j : $\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4)^T$.

Значение случайной составляющей ζ_i вычисляется по формуле

$$\zeta_i = \frac{1}{N_0} \int_0^T n(t) K s_i(t) dt.$$

При дальнейшем выводе формул примем, что $\xi^1 = \xi$.

Используя формулу (1), можно получить вектор математических ожиданий для первой позиции, где $s_1(t) = A_c \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{4}\right)$, $j = 1$:

$$\langle \xi \rangle = \begin{bmatrix} Kh_c^2 + Kh_c h_n \cos\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right) \\ Kh_c h_n \sin\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right) \\ -\left(Kh_c^2 + Kh_c h_n \cos\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right)\right) \\ -Kh_c h_n \sin\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix}.$$

Тогда вектор напряжений с выходов корреляторов ξ^j вычисляется по формуле

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

Зная вектор математических ожиданий и вектор напряжений с выходов корреляторов, определяется ковариационная матрица вектора напряжений ξ^j с выходов корреляторов:

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

Необходимо отметить, что случайные векторы ζ и ξ^j являются гауссовыми. Совместная плотность вероятности составляющих вектора ξ^j есть четырехмерная гауссовская плотность вероятности:

$$\omega_{\xi^j}(\xi_1^j, \xi_2^j, \xi_3^j, \xi_4^j).$$

Вероятность того, что случайная величина ξ_j будет не меньше каждого из множества чисел $\{\xi_1, \dots, \xi_{j-1}, \xi_{j+1}, \dots, \xi_M\}$, находится из выражения [4]

$$P\{\xi_j > \xi_i; j \neq i; j, i \in (1, \dots, M)\} = \int_0^{\xi_j} d\xi_1 \dots \int_{-\infty}^{\xi_j} d\xi_{j-1} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_j \int_{-\infty}^{\xi_j} d\xi_{j+1} \dots \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \omega_{\xi_j}(\xi_1, \dots, \xi_{j-1}, \xi_j, \xi_{j+1}, \dots, \xi_M) d\xi_M. \quad (2)$$

В данном случае $M = 4$.

Система *QPSK* сигналов является биортогональной [4]. Ковариационная матрица \mathbf{K}_ζ является особенной (сингулярной, вырожденной). Ранг матрицы равен двум, а ее определитель равен нулю ($\det \mathbf{K}_\zeta = |\mathbf{K}_\zeta| = 0$). Порядок вычисления определителя матрицы показан в статьях [6–8]. При расчетах осуществляется переход из пространства вектора $\boldsymbol{\xi}$ в пространство собственных векторов $\boldsymbol{\eta}$ ковариационной матрицы \mathbf{K}_ζ . И таким образом матрица \mathbf{K}_ζ вычисляется по формуле

$$\mathbf{K}_\zeta = \frac{K^2 h_c^2}{2} \mathbf{A},$$

где h_c^2 – отношение сигнал/шум: $h_c^2 = E_c/N_0$;
 E_c – энергия сигнала на длительности информационного символа: $E_c = P_c \times T$;
 \mathbf{I} – единичная матрица:

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

Собственные числа матрицы \mathbf{A} находятся из определения характеристического уравнения [9]

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) = 0.$$

Решениями этого уравнения являются:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 0 \text{ и } \lambda_3 = \lambda_4 = 2.$$

Можно показать, что ковариационная матрица \mathbf{K}_η в новой системе координат $\boldsymbol{\eta}$ будет иметь диагональный вид

$$\mathbf{K}_\eta = K^2 h_c^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для того чтобы найти матрицу преобразования в новой системе координат $\boldsymbol{\eta}$, необходимо вычислить собственные векторы матрицы \mathbf{A} . Собственные векторы \mathbf{v} находятся из определения [9]:

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}.$$

Один из вариантов собственных векторов имеет вид

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{v}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}; \mathbf{v}_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Все векторы попарно ортогональны, т. е. $\mathbf{v}_j^T \mathbf{v}_i = 0$ при $j \neq i$, где $j, i \in \{1, 2, 3, 4\}$. Нормы всех векторов одинаковы $\|\mathbf{v}_j\| = \sqrt{2}$.

Таким образом, матрица преобразований \mathbf{V} в новой системе координат $\boldsymbol{\eta}$ будет иметь вид

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix}.$$

Рассчитав вектор математических ожиданий для первой позиции в системе координат $\boldsymbol{\xi}$ и матрицу преобразований \mathbf{V} в новой системе координат $\boldsymbol{\eta}$, можно найти вектор математических ожиданий в новой системе координат $\boldsymbol{\eta}$ по формуле

$$\langle \boldsymbol{\eta} \rangle = \mathbf{V} \langle \boldsymbol{\xi} \rangle.$$

Отсюда вектор математических ожиданий в новой системе координат $\boldsymbol{\eta}$ можно представить следующим образом:

$$\langle \boldsymbol{\eta} \rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{2} \langle \xi_2 \rangle \\ \sqrt{2} \langle \xi_1 \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K\sqrt{2}h_c h_\pi \sin\left(\varphi_\pi - \frac{\pi}{4}\right) \\ K\sqrt{2}\left(h_c^2 + h_c h_\pi \cos\left(\varphi_\pi - \frac{\pi}{4}\right)\right) \end{bmatrix}.$$

Для вычисления границ интегрирования в выражении (2) необходимо определить уравнения плоскостей, ограничивающих область интегрирования в 4-мерной системе координат $\boldsymbol{\xi}$ из первого равенства, а именно [10]:

$$\xi_2 - \xi_1 = 0, \xi_3 - \xi_1 = 0, \xi_4 - \xi_1 = 0. \quad (3)$$

Для определения составляющих вектора $\boldsymbol{\eta}$ используется преобразование $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{V}\boldsymbol{\eta}$, путем определения значений составляющих вектора $\boldsymbol{\xi}$ через составляющие вектора $\boldsymbol{\eta}$:

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\eta_2 + \eta_4); \\ \xi_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\eta_1 + \eta_3); \\ \xi_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\eta_2 - \eta_4); \\ \xi_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\eta_1 - \eta_3). \end{cases}$$

Далее подставляем полученные выражения в уравнение (3) и получаем уравнения плоскостей в 4-мерном пространстве, ограничивающих область интегрирования в системе координат $\boldsymbol{\eta}$:

$$\begin{cases} \eta_4 = 0; \\ \eta_1 - \eta_2 + \eta_3 - \eta_4 = 0; \\ \eta_1 - \eta_2 - \eta_3 - \eta_4 = 0. \end{cases}$$

В новой системе координат 4-мерная плотность вероятности (ПВ) $\omega_4(\boldsymbol{\eta})$ представляет собой произведение четырех одномерных ПВ:

$$\omega_4(\boldsymbol{\eta}) = \omega_1(\eta_1)\omega_1(\eta_2)\omega_1(\eta_3)\omega_1(\eta_4).$$

Так как первые два множителя имеют дисперсию, равную нулю, и представляют собой дельта-функцию Дирака, то совместную ПВ вектора $\boldsymbol{\eta}$ можно представить следующим образом:

$$\omega(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4) = \delta(\eta_1 - \langle \eta_1 \rangle)\delta(\eta_2 - \langle \eta_2 \rangle)\omega(\eta_3)\omega(\eta_4).$$

ПВ для третьего и четвертого множителя вычисляется по формулам:

$$\omega_1(\eta_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Kh_c} \exp\left(-\frac{(\eta_3 - \langle \eta_3 \rangle)^2}{2K^2h_c^2}\right); \quad \omega_1(\eta_4) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Kh_c} \exp\left(-\frac{(\eta_4 - \langle \eta_4 \rangle)^2}{2K^2h_c^2}\right).$$

В общем случае формулу (2) для систем координат $\boldsymbol{\xi}$ и $\boldsymbol{\eta}$ можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_{\text{прав } 1} &= \int_{-\infty}^{\infty} d\xi_1 \int_{-\infty}^{\xi_1} d\xi_2 \int_{-\infty}^{\xi_1} d\xi_3 \int_{-\infty}^{\xi_1} \omega_4(\boldsymbol{\xi}) d\xi_4 = \\ &= \int_{\eta_{1Н}}^{\eta_{1В}} \omega_1(\eta_1) d\eta_1 \int_{\eta_{2Н}}^{\eta_{2В}} \omega_1(\eta_2) d\eta_2 \int_{\eta_{3Н}}^{\eta_{3В}} \omega_1(\eta_3) d\eta_3 \int_{\eta_{4Н}}^{\eta_{4В}} \omega_1(\eta_4) d\eta_4, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\eta_{iН}$ и $\eta_{iВ}$ – нижний и верхний пределы интегрирования.

Для получения окончательной формулы с целью расчета вероятности правильного приема информационного символа введем нормированные переменные:

$$x = \frac{\eta_4 - \langle \eta_4 \rangle}{Kh_c}; \quad y = \frac{\eta_3 - \langle \eta_3 \rangle}{Kh_c}.$$

Вычислим пределы интегрирования в переменных x и y , т. е. x_H, x_B, y_H, y_B :

$$\begin{cases} x_H = -\frac{\langle \eta_4 \rangle}{Kh_c} = \frac{-\sqrt{2}(h_c^2 + h_c h_{\Pi} \cos(\varphi_{\Pi} - \frac{\pi}{4}))}{h_c}; \\ x_B = \infty. \end{cases}$$

Пределы интегрирования в переменных y вычисляются по формуле

$$y = \frac{\eta_3 - \langle \eta_3 \rangle}{Kh_c} = \frac{\eta_3}{Kh_c} - \sqrt{2}h_n \sin\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right).$$

Следовательно, нижняя y_n и верхняя y_b границы находятся с помощью следующего выражения:

$$\begin{cases} y_n = -\frac{\eta_4}{Kh_c} - \sqrt{2}h_n \sin\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right); \\ y_b = \frac{\eta_4}{Kh_c} - \sqrt{2}h_n \sin\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right). \end{cases} \quad (5)$$

Найдем $\frac{\eta_4}{Kh_c}$ из выражения нормировки $x = \frac{\eta_4 - \langle \eta_4 \rangle}{Kh_c}$. Тогда

$$\frac{\eta_4}{Kh_c} = x + \frac{\langle \eta_4 \rangle}{Kh_c} = x + \sqrt{2}\left(h_c + h_n \cos\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right)\right). \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в выражение (5), получим нижние и верхние пределы интегрирования:

$$\begin{cases} y_n = -x - \sqrt{2}\left[h_c + h_n\left(\cos\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right) + \sin\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right)\right)\right]; \\ y_b = x + \sqrt{2}\left[h_c + h_n\left(\cos\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(\varphi_n - \frac{\pi}{4}\right)\right)\right]. \end{cases}$$

Выполненные расчеты показали, что в нормированной форме коэффициент K , введенный для учета различия уровней эталонного и принимаемого сигналов, сокращается. Первые два сомножителя в выражении (4) равны единице. Тогда выражение (4) упрощается:

$$P_{\text{прав } 1} = \int_{\eta_{3н}}^{\eta_{3в}} d\eta_3 \int_{\eta_{4н}}^{\eta_{4в}} \omega_1(\eta_3)\omega_1(\eta_4)d\eta_4. \quad (7)$$

Полученные значения ПВ подставляются в формулу (7) для вычисления вероятности правильного приема информационного символа $P_{\text{прав } 1}$. С учетом априорных вероятностей P_j (при $j = 1, 2, 3, 4$) передачи символов $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ или сигналов $\{s_1(t), s_2(t), s_3(t), s_4(t)\}$ средняя вероятность ошибки приема символа составит

$$P_{\text{ош ср}} = \sum_{j=1}^4 P_j(1 - P_{\text{прав } j}). \quad (8)$$

При априорной равновероятности формулу (8) можно представить в следующем виде:

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

Таким образом, для вычисления средней вероятности ошибки приема символа требуется вычислить вероятность правильного приема каждого информационного символа, найти мат-

рицу преобразования вектора ξ^j в новой системе координат, в которой ковариационная матрица K_{ξ^j} становится диагональной.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА QPSK СИГНАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАРМОНИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ПОМЕХИ

Формулы для расчета вероятности правильного приема информационных символов, полученные по рассмотренной методике, имеют следующий вид:

$$P_{\text{прав 1}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sqrt{2}(h_c+h_n \cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))}^{\infty} \int_{-x-\sqrt{2}[h_c+h_n(\cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4})+\sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))]}^{x+\sqrt{2}[h_c+h_n(\cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4})-\sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))]} dx \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2}\right) dy;$$

$$P_{\text{прав 2}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sqrt{2}(h_c+h_n \sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))}^{\infty} \int_{-x-\sqrt{2}[h_c+h_n(\cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4})+\sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))]}^{x+\sqrt{2}[h_c-h_n(\cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4})-\sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))]} dx \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2}\right) dy;$$

$$P_{\text{прав 3}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sqrt{2}(h_c-h_n \cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))}^{\infty} \int_{-x-\sqrt{2}[h_c-h_n(\cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4})-\sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))]}^{x+\sqrt{2}[h_c-h_n(\cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4})+\sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))]} dx \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2}\right) dy;$$

$$P_{\text{прав 4}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\sqrt{2}(h_c-h_n \sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))}^{\infty} \int_{-x-\sqrt{2}[h_c+h_n(\cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4})-\sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))]}^{x+\sqrt{2}[h_c-h_n(\cos(\varphi_n-\frac{\pi}{4})+\sin(\varphi_n-\frac{\pi}{4}))]} dx \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2}\right) dy.$$

Правильный прием символа означает, что каждый из двух битов информации в символе принят правильно. Расчет вероятности правильного приема символа позволит определить значение вероятности битовой ошибки. При отсутствии помех справедлива формула

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

Для расчета вероятности правильного приема символа использовались следующие исходные данные:

– отношение помеха/шум (h_n): 0; 3; 5;

– сдвиг фазы помехи относительно фазы сигнала (φ_n): 0; $\frac{\pi}{4}$.

Полученные зависимости от отношения сигнал/шум (средней вероятности ошибки приема символа и средней вероятности битовой ошибки) представлены в виде графиков на рис. 2,а и б.

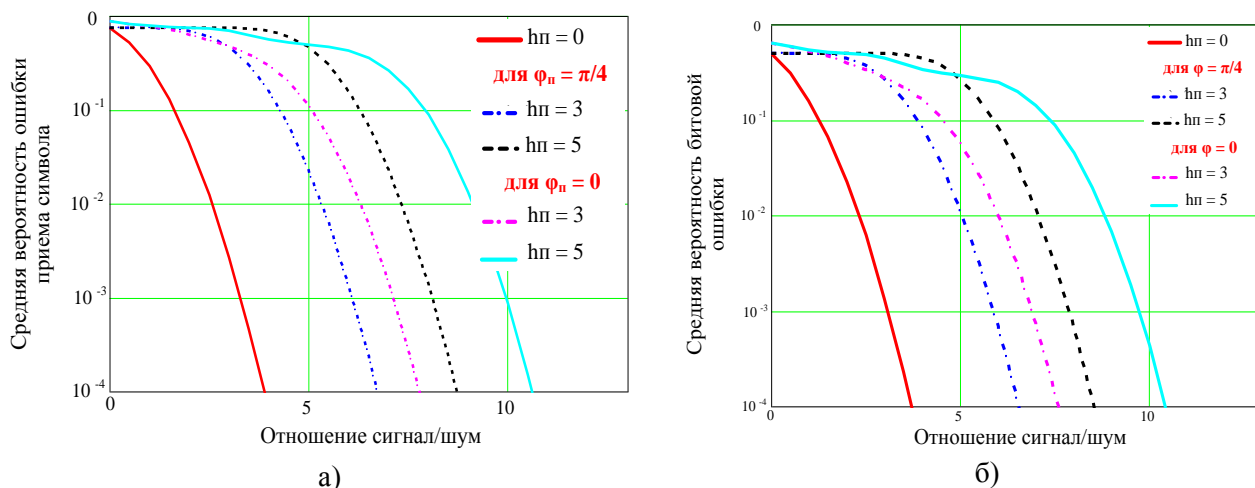


Рис. 2. Зависимости вероятностей ошибок от отношения сигнал/шум:
 а – средней вероятности ошибки приема символа – от отношения сигнал/шум;
 б – вероятности битовой ошибки – от отношения сигнал/шум

Из анализа рис. 2 видно, что увеличение значений сигнал/шум и увеличение сдвига фазы помехи относительно фазы сигнала приводят к уменьшению вероятности ошибки (чем больше сдвиг фазы помехи относительно фазы сигнала, тем больше вероятность правильного приема информационных символов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ результатов качественного оценивания помехоустойчивости приема $\pi/4$ -QPSK радиосигнала при воздействии гармонической когерентной помехи показал, что промежуточное значение фазового сдвига несущего колебания помехи, не совпадающее с фазовой информационной позицией сигнала, дополнительно увеличивает значение вероятности ошибки приема. Это позволяет утверждать, что влияние неэнергетического параметра эквивалентно приводит к изменению энергетических соотношений.

Кроме того, четко показано, что различие в уровнях эталонов и принимаемых сигналов не влияет на помехоустойчивость приема радиосигнала при воздействии помех.

Список используемых источников

1. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи / Г.В. Куликов, Нгуен Ван Зунг, А.В. Нестеров, А.А. Лелюх // Научные технологии. – 2018. – № 11. – С. 32–38.
2. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен Влияние фазоманипулированной помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией // Российский технологический журнал. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 18–28.
3. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи // Российский технологический журнал. – 2018. – Т. 6, № 6. – С. 5–12.
4. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Сов. радио, 1970. – 728 с.
5. Нгуен Ван Зунг Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи // Журнал радио-

электроники. – 2019. – № 3. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/4/text.pdf>. doi:10.30898/1684-1719.2019.3.4 (дата обращения: 27.09.2019).

6. *Попов А.С., Краплин М.Е.* The technique of direct calculation of noise immunity of the optimal coherent reception of multiposition-keyed radio signal // Proc. SPIE. – 20002. – Vol. 5066. – P. 281–291 [Laser for Measurements and Information Transfer, 5–7 June 2002, St. Petersburg, Russia].

7. *Афонин Г.И., Парамонов И.Ю., Попов А.С.* Корректный вывод формул для расчета помехоустойчивости приема фазоманипулированного радиосигнала // Сборник докладов 21-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация-2011». – СПб.: СПбГПУ, 2011. – Т. 1. – С. 209–225.

8. *Попов А.С.* Достоверность приема четырехпозиционного ФМ сигнала при наличии сосредоточенных помех // Электросвязь. – 1990. – № 6. – С. 28–29.

9. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1966. – 577 с.

10. *Моденов С.П.* Аналитическая геометрия. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 704 с.

М.С. Карев,
кандидат техн. наук;
Д.В. Скворцов,
кандидат техн. наук

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ

Представлены результаты моделирования функционирования системы управления движением космического аппарата в двух режимах: в режиме штатной эксплуатации, при отсутствии в составе системы поврежденных чувствительных элементов, и в нештатном режиме функционирования, при наличии в составе системы чувствительных элементов, поврежденных в результате воздействия неблагоприятных факторов космического пространства. Рассмотрены состав чувствительных элементов системы управления движением, их взаимосвязи и логика функционирования.

На основании этого разработана и представлена математическая модель формирования статической ошибки системы управления движением, возникающей при начальной выставке инерциальных датчиков системы по информации от поврежденных оптических датчиков. Показано, что возникновение статической ошибки приведет не только к ошибкам позиционирования космического аппарата, но и к существенному увеличению времени переходного процесса системы.

Ключевые слова: космический аппарат, система управления движением, факторы космического пространства, оптический датчик, угловое положение.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества информации от космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли является одной из приоритетных задач при совершенствовании существующих новых образцов космической техники и при их разработке. Качество получаемой информации зависит от многих факторов, но одним из основных является точность ориентации и стабилизации КА в пространстве. Для достижения требуемых значений по точности ориентации и стабилизации КА используются сложные системы управления движением (СУД) КА, которые получают информацию о текущем положении КА с различных датчиков, установленных как внутри, так и снаружи корпуса КА.

Однако в процессе эксплуатации на КА воздействуют различные факторы:

- микрометеорные потоки;
- космическая радиация и др.

Воздействие этих факторов приводит к повреждениям датчиков, установленных с внешней стороны корпуса КА [1]. В результате снижается точность ориентации и стабилизации КА, что влечет за собой нарушения в работе бортовых обеспечивающих систем, таких как система электроснабжения, система терморегулирования и др. Кроме того, снижение точности ориентации и стабилизации КА может послужить причиной невыполнения КА целевой задачи.

Для недопущения указанных последствий необходимо не только резервировать внешние датчики, но и применять отсутствующие на сегодняшний день математические методы анализа вероятности возникновения случайных ошибок в определении текущего углового положения КА, их учета при выполнении задач и, как следствие, снижения их величины.

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КА НАБЛЮДЕНИЯ

Системы управления движением автоматических КА имеют схожие принципы функционирования, поэтому для разработки методики может использоваться известная модель функционирования СУД КА наблюдения [2–6].

Известно, что движение КА описывается системой из трех независимых уравнений:

$$\begin{cases} I_x \frac{d\omega_x}{dt} = M_x \\ I_y \frac{d\omega_y}{dt} = M_y, \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} = M_z \end{cases} \quad \begin{cases} \omega_x = \dot{\gamma} + \dot{\psi} \sin \vartheta \\ \omega_y = \dot{\psi} \cos \vartheta \cos \gamma + \sin \gamma \dot{\vartheta} \\ \omega_z = \dot{\vartheta} \cos \gamma - \dot{\psi} \cos \vartheta \sin \gamma \end{cases} \quad (1)$$

где I_x, I_y, I_z – моменты инерции КА относительно связанной системы координат;
 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора угловой скорости вращения КА на связанные оси;
 M_x, M_y, M_z – проекции вектора момента внешних сил на связанные оси;
 γ, ϑ, ψ – углы тангажа, рысканья и крена Эйлера – Крылова;
 $\dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}$ – производные от углов тангажа, рысканья и крена Эйлера – Крылова.

Системы уравнений (1), описывающие угловое движение КА наблюдения относительно каждой из трех осей, имеют одинаковую структуру. Это позволяет принять допущение, что в дальнейшем рассматриваются процессы, протекающие при управлении по одному каналу управления. Поэтому при разработке модели использовалась упрощенная модель функционирования СУД КА, функциональная схема которой представлена на рис. 1 при управлении по одному каналу.

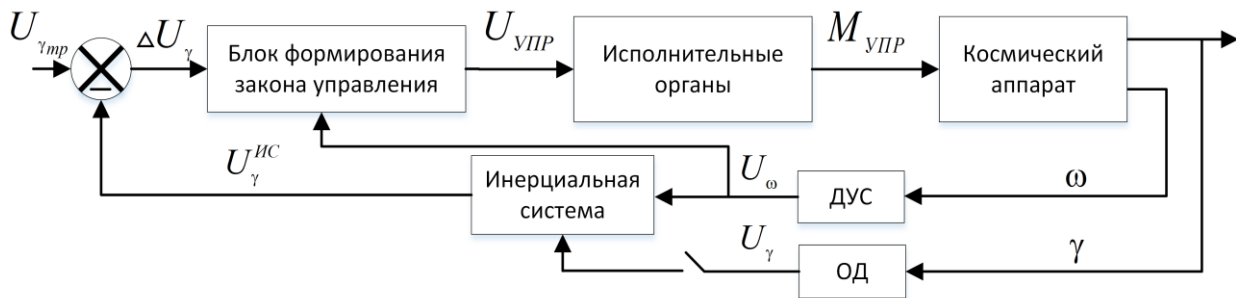


Рис. 1. Функциональная схема системы управления движением при управлении по одному каналу

Необходимо отметить, что для реального КА наблюдения модель углового движения и, следовательно, схема системы имеют более сложный вид. Связано это с тем, что корпус КА не является абсолютно жестким. Однако такое обстоятельство не носит принципиального характера, так как важен лишь факт наличия функциональной связи между сигналами, вырабатываемыми чувствительными элементами, и их реализацией системой исполнительных органов. В связи с этим принято еще одно допущение: КА рассматривается как абсолютно жесткое тело.

С учетом сделанных допущений и согласно представленной на рис. 1 функциональной схеме, в среде моделирования *Simulink* разработана имитационная модель [8–10] функционирования СУД КА, где в качестве чувствительного элемента используется инфракрасный построитель местной вертикали (ИК ПМВ), подробно рассмотренный в работах [1, 11].

В результате моделирования функционирования СУД КА, в составе которой нет поврежденных элементов, построены графики переходных процессов системы при различном начальном угловом положении КА (рис. 2).

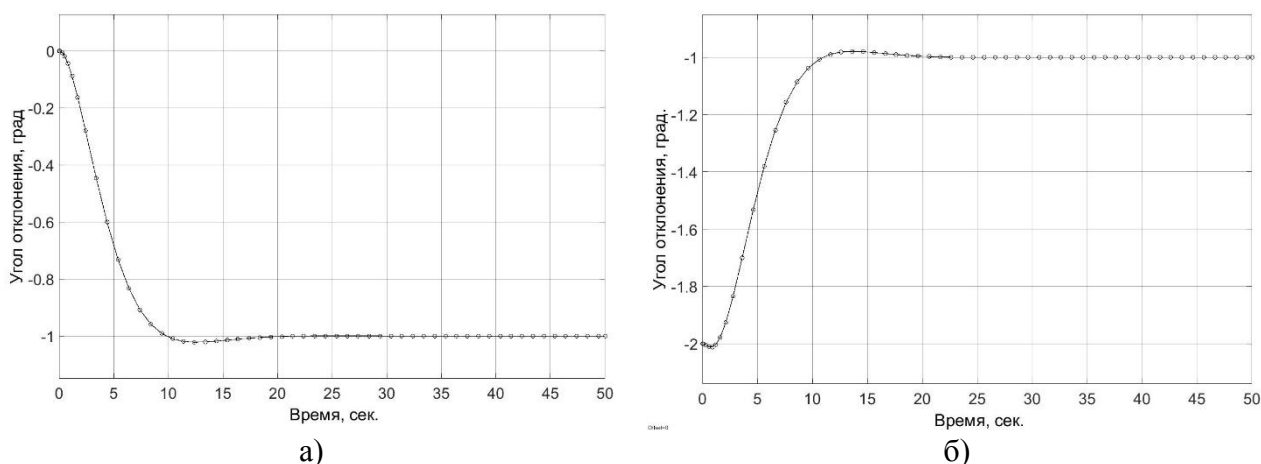


Рис. 2. Графики переходных процессов СУД КА без поврежденных элементов:

а – $\gamma_{np} = -1$ град., $\gamma_0 = 0$ град.; *б* – $\gamma_{np} = -1$ град., $\gamma_0 = -2$ град.

На рис. 2,а представлен график переходного процесса системы при повороте КА на один градус (γ_{np}) по одному каналу управления относительно нулевого положения (γ_0) (ориентация на центр Земли по показаниям ИК ПМВ), на рис. 2,б представлен график переходного процесса при повороте КА на один градус по одному каналу управления из начального углового положения, соответствующего двум градусам, по показаниям ИК ПМВ.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что система является устойчивой и обрабатывает программные углы (γ_{np}) с требуемой точностью.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОШИБКИ ПРИ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКЕ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Первичными источниками информации об угловом положении КА в пространстве являются оптические датчики, установленные снаружи корпуса КА и подверженные воздействию неблагоприятных факторов космического пространства. К таким датчикам относятся солнечные датчики, звездные датчики и датчики ориентации на Землю. Для примера в статье рассмотрен инфракрасный построитель местной вертикали (ИК ПМВ), предназначенный для определения направления на центр Земли.

Наряду с ИК ПМВ в современных СУД КА наблюдения в качестве измерительных устройств часто используются инерциальные датчики (ИД) [2, 6, 12, 13], начальная выставка которых производится по показаниям внешних ОД. При этом период начальной выставки рассматривается как функция времени. В этом случае показания ИД помимо постоянной ошибки, обусловленной повреждениями оптических элементов ОД, будут иметь случайную составляющую ошибки ($\hat{\delta}$) за счет ошибки, полученной в результате начальной выставки ИД по показаниям поврежденного ОД в случайный момент времени. Тогда

$$\gamma_c = \gamma + \hat{\delta}, \quad (2)$$

где γ_c – показания ИД;
 γ – истинное отклонение визирной оси ОД от источника излучения;
 $\hat{\delta}$ – случайная ошибка.

Величина $\hat{\delta}$ зависит от углового положения КА в момент начальной выставки ИД и представляет собой разницу между действительным положением аппарата (γ_i) и показаниями поврежденного ОД ($\hat{\gamma}_p$):

$$\hat{\delta} = \gamma_i - \hat{\gamma}_p. \quad (3)$$

Величина выходного электрического сигнала U неповрежденного датчика пропорциональна разности световых потоков, поступающих на разные каналы измерения, и связана с отклонением от направления на источник излучения γ через коэффициент пропорциональности k :

$$U = k\gamma. \quad (4)$$

В результате воздействия факторов космического пространства могут возникать два типа ошибок:

- занижение показаний датчика;
- постоянная ошибка Ψ .

В выражении (4) такая ошибка учитывается введением дополнительного слагаемого.

В общем случае можно записать соотношение, характеризующее величину выходного электрического сигнала для поврежденного датчика,

$$U_p = k_p(\gamma + \Psi), \quad (5)$$

где U_p – величина выходного электрического сигнала поврежденного ОД;

k_p – коэффициент пропорциональности, характеризующий изменение чувствительности поврежденного датчика;

Ψ – постоянная ошибка.

Для представления результатов воздействия факторов космического пространства удобнее использовать математическое соотношение, позволяющее определить величину отклонения оси поврежденного ОД от направления на источник излучения, в зависимости от действительного положения аппарата, получаемого системой от исправного датчика,

$$\hat{\gamma}_p = k_\gamma \gamma_i + k_\gamma \Psi, \quad (6)$$

где k_γ – коэффициент пропорциональности, характеризующий изменение чувствительности датчика, при этом

$$k_\gamma = \frac{k_p}{k}. \quad (7)$$

С учетом выражения (6) можно записать выражение (3) в виде

$$\hat{\delta} = \gamma_i(1 - k_\gamma) + k_\gamma \Psi. \quad (8)$$

Положение КА в момент проведения измерений для начальной выставки ИД подчиняется функции распределения:

$$f_\gamma(\gamma) = \lim_{\Delta\gamma \rightarrow 0} \frac{P(\hat{\gamma}_i \in (\gamma, \gamma + \Delta\gamma))}{\Delta\gamma}. \quad (9)$$

где $(\gamma, \gamma + \Delta\gamma)$ – бесконечно малый участок.

Так как интервалы между начальной выставкой ИД существенно превосходят период колебаний КА относительно заданного углового положения, может быть принято допущение, что момент измерения положения КА для начальной выставки ИД равномерно распределен в пределах периода колебаний КА. Тогда справедливо равенство

$$P(\hat{\gamma}_i \in (\gamma, \gamma + \Delta\gamma)) = \frac{\tau(\gamma, \gamma + \Delta\gamma)}{T}. \quad (10)$$

Здесь $\tau(\gamma, \gamma + \Delta\gamma)$ – время прохождения КА участка $(\gamma, \gamma + \Delta\gamma)$, которое определяется формулой

$$\tau(\gamma, \gamma + \Delta \gamma) = \frac{\Delta \gamma}{\omega(\gamma)}, \quad (11)$$

где $\omega(\gamma)$ – текущая угловая скорость КА.

Следовательно, выражение для функции плотности распределения (9) примет вид

$$f_{\gamma}(\gamma) = \lim_{\Delta \gamma \rightarrow 0} \frac{\Delta \gamma}{\omega(\gamma) T \Delta \gamma} = \frac{1}{\omega(\gamma) T} \quad (12)$$

Для примера: при управлении угловым движением КА при помощи двигателей малой тяги в условиях отсутствия существенных возмущающих моментов процесс поддержания заданной ориентации представляет собой автоколебательный процесс (рис. 3).

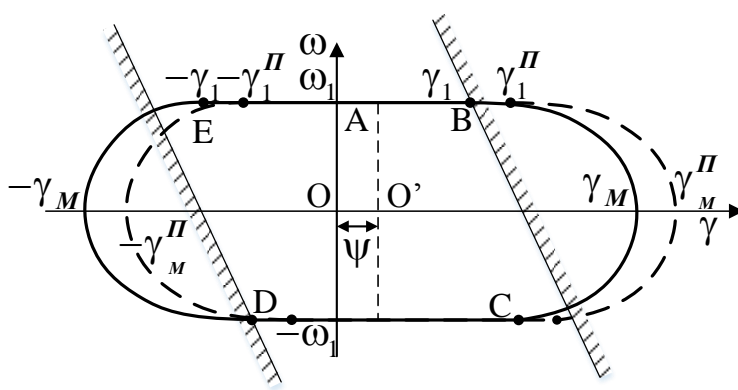


Рис. 3. Фазовый портрет поддержания заданной ориентации

В течение периода колебаний T имеют место быть два типа углового движения КА.

1. Угловая скорость остается постоянной, угловое ускорение равняется нулю (участок AB);

2. Угловая скорость изменяется при постоянном угловом ускорении (участок BC), постоянна по величине и отличается только по знаку.

В этом случае функция (12) будет состоять из двух зависимостей:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{2(\gamma_1^{\Pi} \varepsilon + \omega_1^2)}, & \text{при } \Psi - \gamma_1^{\Pi} \leq \gamma \leq \Psi + \gamma_1^{\Pi} \\ \frac{\varepsilon \omega_1}{2(\gamma_1^{\Pi} \varepsilon + \omega_1^2) \sqrt{\omega_1^2 - 2\varepsilon(|\gamma - \Psi| - \gamma_1^{\Pi})}}, & \text{при } \gamma \in (\Psi - \gamma_1^{\Pi} - \gamma_M^{\Pi}, \Psi - \gamma_1^{\Pi}) \cup (\Psi + \gamma_1^{\Pi}, \Psi + \gamma_1^{\Pi} + \gamma_M^{\Pi}) \end{cases}, \quad (13)$$

где ε – угловое ускорение КА;

ω_1 – угловая скорость КА;

γ_1^{Π} – отклонение КА от среднего положения, при котором происходит включение исполнительных органов СУД,

$$\gamma_1^{\Pi} = \frac{\gamma_1}{1 - k_{\gamma}}. \quad (14)$$

Здесь γ_M^{Π} – угол, на который отклоняется КА после включения исполнительных органов СУД до момента гашения угловой скорости ω_1 ,

$$\gamma_M^{\Pi} = \frac{\omega_1^2}{2\varepsilon}. \quad (15)$$

На основании функции (13), учитывая, что угловое положение в момент выполнения измерений для начальной выставки ИД однозначно соответствует величине ошибки, может быть получена функция плотности распределения ошибки инерциальных датчиков:

$$f_{\delta}(\delta) = f_{\gamma}(\gamma(\delta))k_{\delta}. \quad (16)$$

С учетом выражения для определения ошибки инерциальных датчиков (8) зависимость $\gamma(\delta)$ может быть представлена в виде

$$\gamma(\delta) = \frac{\delta + k_{\gamma}\Psi}{(k_{\gamma} - 1)}. \quad (17)$$

Тогда функция плотности распределения вероятности ошибки инерциальных датчиков (13) примет вид

$$f_{\delta}(\delta) = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{2(\varepsilon\gamma_1^{\Pi} + \omega_1^2)(1 - k_{\gamma})}, & \text{при } \gamma_1^{\Pi}(k_{\gamma} - 1) - k_{\gamma}\Psi \leq \delta \leq \gamma_1^{\Pi}(1 - k_{\gamma}) - k_{\gamma}\Psi \\ \frac{\omega_1\varepsilon}{2 \cdot \sqrt{\omega_1^2 - 2\varepsilon\left(\frac{|\delta - \Psi|}{k_{\gamma} - 1} - \gamma_1^{\Pi}\right)(\varepsilon\gamma_1^{\Pi} + \omega_1^2)(k_{\gamma} - 1)}}, & \\ \text{при } \delta \in \left(\left((\gamma_1^{\Pi} + \gamma_M)(k_{\gamma} - 1) - k_{\gamma}\Psi, \gamma_1^{\Pi}(k_{\gamma} - 1) - k_{\gamma}\Psi \right) \cup \right. & \\ \left. \left(\gamma_1^{\Pi}(1 - k_{\gamma}) - k_{\gamma}\Psi, (\gamma_1^{\Pi} + \gamma_M)(1 - k_{\gamma}) - k_{\gamma}\Psi \right) \right) & \end{cases}. \quad (18)$$

Графически вид функций плотности распределения (13) и (18) для различных параметров углового движения КА представлен на рис. 4.

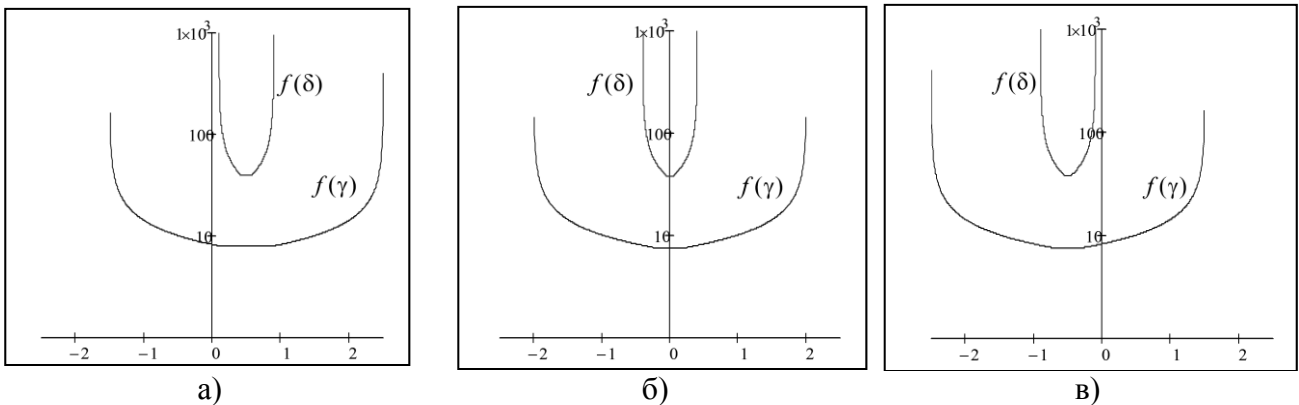


Рис. 4. Графики функций плотности распределения вероятности возникновения ошибки при начальной выставке инерциальной системы:

$$a - \gamma_1 = 0,4^{\circ}, \gamma_M = 2^{\circ}, \Psi = 0,5^{\circ}; \quad b - \gamma_1 = 0,2^{\circ}, \gamma_M = 2^{\circ}, \Psi = 0^{\circ}; \\ c - \gamma_1 = 0,2^{\circ}, \gamma_M = 2^{\circ}, \Psi = -0,5^{\circ}$$

На рисунке введены следующие обозначения:

$f(\delta)$ – график плотности распределения вероятности возникновения ошибки при начальной выставке инерциальных датчиков;

$f(\gamma)$ – график плотности распределения вероятности угла отклонения от заданного углового положения.

Необходимо отметить, что в зависимости от параметров углового движения КА и параметров автоколебательного процесса графики функций, представленные на рис. 4, будут из-

меняться, однако принципы формирования ошибки при начальной выставке инерциальных датчиков останутся неизменными.

Таким образом, математическая модель деградации характеристик ОД СУД КА [1, 14] и разработанная математическая модель формирования ошибки при начальной выставке ИД по показаниям поврежденных ОД позволяют перейти к моделированию функционирования системы с поврежденными чувствительными элементами. При этом отличие данной модели от существующих заключается в том, что она позволяет учитывать не только постоянную ошибку в определении направления на источник излучения, но и случайную составляющую суммарной ошибки, возникающую в момент начальной выставки инерциальных датчиков.

В результате моделирования построены графики переходных процессов СУД КА (рис. 5).

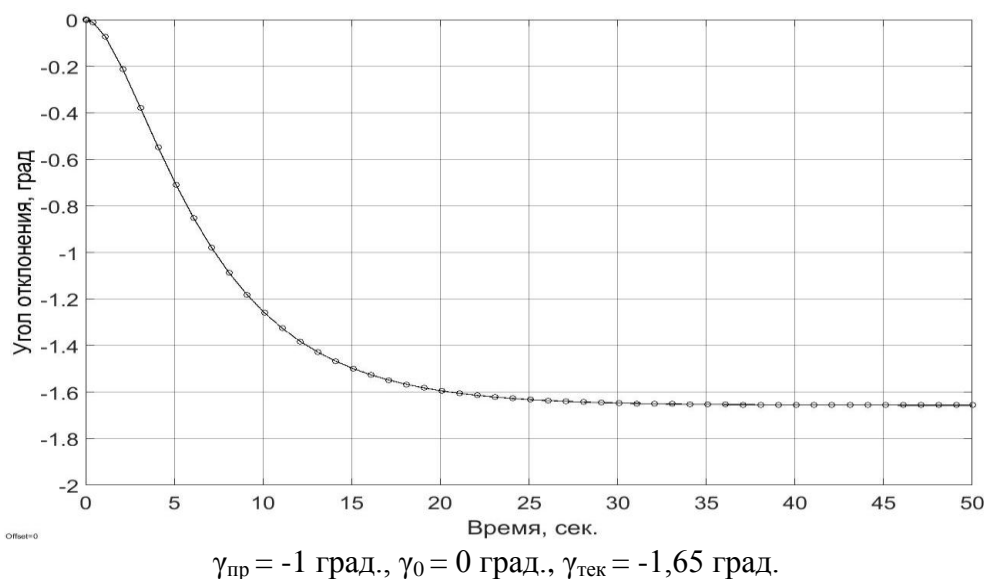


Рис. 5. График переходного процесса СУД КА с поврежденными элементами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель формирования статической ошибки системы управления движением космического аппарата наблюдения позволяет анализировать вероятность возникновения ошибки и учитывать случайную составляющую ошибки, возникающей в системе при начальной выставке ИД по показаниям поврежденных ОД, вследствие воздействия факторов космического пространства естественного и искусственного происхождения. Также установлено, что в результате воздействия неблагоприятных факторов космического пространства помимо возникновения ошибок в СУД КА существенно увеличится время переходных процессов системы, что, в свою очередь, влияет на функционирования остальных бортовых обеспечивающих систем.

Список используемых источников

1. Абдурахимов А.А., Карев М.С. Изменение характеристик оптических датчиков системы управления движением космического аппарата при воздействии лазерного излучения // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, №4. – С. 342–347.
2. Механика полета. / В.В.Ефимов, В.И.Миронов, С.Б.Силантьев и др.; под ред. В.В. Ефимова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – Ч. 2: Системы управления космических аппаратов. – 529 с.

3. *Абдурахимов А.А., Баландин В.Н., Шаговиков А.В.* Основы автоматики механических систем: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2004. – 244 с.
4. *Баландин В.Н., Уханов И.Г.* Автоматическое регулирование в системах космических аппаратов. Основы теории: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 254 с.
5. *Лучко С.В.* Теория автоматического управления: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 378 с.
6. *Попов В.И.* Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
7. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учеб. пособие / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко и др.; под ред. А.С. Сырова. – М.: МАИ ПРИНТ, 2010. – 304 с.
8. *Лоу А., Кельтон В.* Имитационное моделирование (Simulation Modeling and Analysis). – СПб.: Питер, 2004. – 848 с.
9. *Чилин Ю.Н.* Исследование операций в сложных технических системах. – СПб.: МО РФ, 2002. – Ч. 1. – 309 с.
10. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
11. *Никольский В.В., Абдурахимов А.А., Карев М.С.* Методика экспериментального исследования характеристик оптических элементов датчиков системы управления движением космического аппарата в условиях воздействия факторов космического пространства // Сборник статей III Всероссийской НПК «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – С. 233–238.
12. Системы управления космических аппаратов: курс лекций / В.В. Бурмистров, А.А. Лукашевский, А.М. Ричняк, И.В. Фоминов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 188 с.
13. *Федосеев В.И., Колосов М.П.* Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие. – М.: Логос, 2007. – 248 с.
14. *Карев М.С.* Влияние внешних деструктивных воздействий на изменение характеристик оптических датчиков системы управления движением космического аппарата // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2017. – № 2. – С. 112–117.

О.А. Скоробогатова,
кандидат техн. наук; доцент

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДУХПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ШИРОКОУГОЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ В УHF-ДИАПАЗОНЕ

Предложена методика оценивания технических характеристик излучающих элементов двухполяризационной вибраторной антенной решеткой (АР) широкоугольного сканирования, работающей в УHF-диапазоне, на основе выбора оптимальных размеров излучателей с учетом их конструктивных особенностей. Критерием оптимальности выбранных параметров конструкции излучателей является максимальное значение коэффициента усиления (КУ) в заданном секторе углов при условии, что значения коэффициента отражения не превышают некоторого заданного порога в рабочем диапазоне частот. Методика может быть использована при оценке работоспособности АР больших размеров в течение жизненного цикла радиолокационной станции (РЛС).

Ключевые слова: крест-вибратор, коэффициент отражения, диаграмма направленности, коэффициент усиления, антенная решетка.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ научно-технической информации показывает, что антенные системы радиолокационных станций дальнего обнаружения, как правило, представляют собой двухполяризационные фазированные антенные решетки (ФАР) широкоугольного сканирования больших размеров, предназначенных для приема/передачи сигналов в дециметровом (метровом) диапазонах волн [1–4]. Например, ФАР, рассмотренные в источниках [1, 2], обладают сектором однолучевого качания луча порядка $\pm 45^\circ$, а ФАР из источников [3, 4] – сектором сканирования $\pm 60^\circ$.

Конструктивно данные ФАР расположены на передних сторонах зданий, за которыми размещается аппаратура РЛС. Решетка излучателей образует апертуру антенны и состоит, как правило, из одинаковых слабонаправленных излучателей (вибраторных, щелевых, рупорных, волноводных). Излучатели обычно расположены в узлах прямоугольной или косоугольной (треугольной) сетки.

В УHF-диапазоне в качестве излучающих элементов ФАР широкое применение нашли вибраторные излучатели, что обусловлено рядом их достоинств: относительно малой массой, устойчивостью к атмосферным внешним воздействиям, а также возможностью получения произвольной (линейной, круговой и эллиптической) поляризации [5]. При соответствующем выборе конструкции вибраторных излучателей единого типоразмера обеспечивается работа РЛС в широкой полосе частот, при использовании разных типоразмеров вибраторов, например в совмещенных вибраторных ФАР, можно реализовать многочастотный режим работы.

Для примера на рис. 1 показана фотография конструкции антенного полотна РЛС УHF-диапазона. Из анализа рисунка видно, что антенное полотно представляет собой вибраторную АР, излучающими элементами которой являются крест-вибраторы, состоящие из взаимно ортогональных симметричных вибраторов единого типоразмера, размещенных по треугольной сетке. Места расположения крест-вибраторов фиксированы. Для предотвращения ослепления вибраторов (резкого падения КУ в секторе сканирования АР) на антенном полотне присутствуют дополнительные укороченные штыри.

Из теории антенн [6] известно, что крест-вибраторы имеют раздельное возбуждение плеч, что позволяет использовать их для получения круговой поляризации правого и левого вращения или на двух ортогональных линейных поляризациях, а также в конструкциях решетки с двумя независимыми каналами, развязанными по поляризации. Практика проектирования подобных излучателей показывает, что выбор крест-вибраторов в качестве элементов АР при соответствующем выборе их конструкции позволяет обеспечить работу РЛС в широкой полосе частот в секторе углов сканирования $\pm(45 \div 60^\circ)$ от нормали.

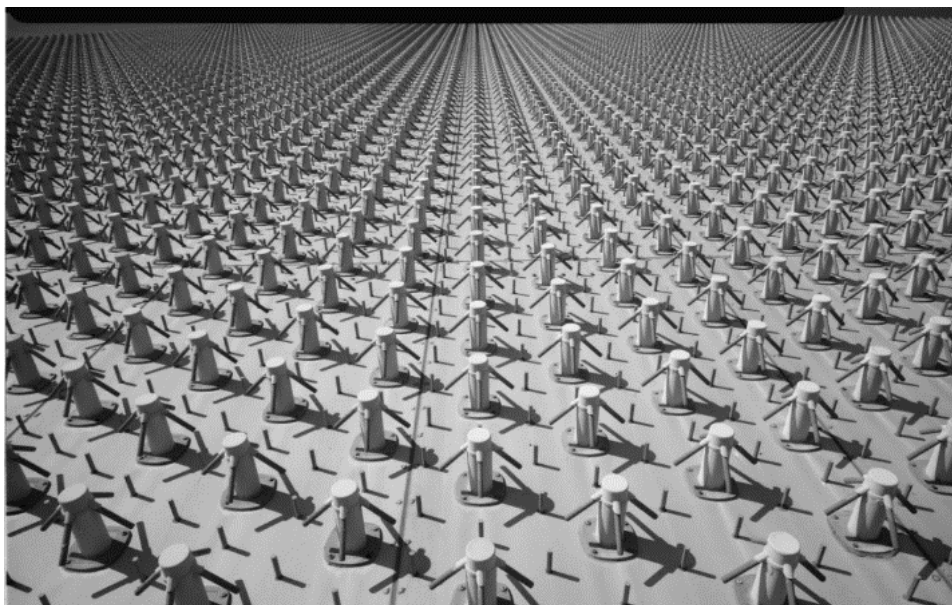


Рис. 1. Элементы вибраторной антенной решетки UHF-диапазона

Спроектировать излучающий элемент оптимальной конструкции, согласованный в широкой полосе частот, – означает выбрать такие геометрические размеры излучающего элемента и характеристики согласующих устройств, при которых достигается максимальное значение КУ в заданном секторе сканирования, при условии, что значения коэффициента отражения на входе вибраторного излучателя не превысят некоторого заданного порога в рабочем диапазоне частот. Знание закона изменения коэффициента отражения в фидерах равномерно возбуждаемой АР и диаграммы направленности (ДН) центрального возбужденного элемента при остальных нагруженных на согласованные нагрузки позволяет в динамике оценивать энергетические и конструктивные характеристики ФАР при изменении (отклонении) входных параметров в заданном секторе сканирования.

Следовательно, оценка технических характеристик излучающих элементов двухполяризационной вибраторной АР широкоугольного сканирования должна основываться на расчете коэффициента отражения (коэффициента стоячей волны) в фидерах элементов и ДН излучающего элемента. Сложность при этом заключается в подборе оптимальных геометрических параметров вибраторов: длины плеч, угла их наклона, высоты стоек над проводящим экраном.

Целью работы является разработка методики оценивания технических характеристик излучающих элементов двухполяризационной вибраторной АР широкоугольного сканирования в UHF-диапазоне на основе выбора оптимальных размеров излучателей с учетом их конструктивных особенностей. Критерием оптимальности выбранных параметров конструкции излучателей при оценке их технических характеристик будет являться максимальное значение КУ в заданном секторе углов при условии, что значения коэффициента отражения на входе излучателя не превысят некоторого заданного порога в рабочем диапазоне частот. При

этом ширина ДН излучателя оценивается по уровню уменьшения центрального максимума на 3 и 10 дБ. На основании полученных расчетов делается вывод о работоспособности данного излучателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ШИРОКОУГОЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ В УHF-ДИАПАЗОНЕ

В вибраторных ФАР с большим числом регулярно расположенных излучателей в силу ограниченности зоны взаимодействия несколькими соседними излучателями значительная их доля (за исключением расположенных на краю ФАР) находится в одинаковых условиях. Поэтому для больших ФАР с периодическим расположением вибраторных излучателей можно считать, что все они имеют одинаковые ДН, не зависящие от номера излучателя. Поэлементный подход к расчету характеристик излучателей позволяет определить оптимальные типоразмеры излучателей и расстояния между ними в обеих плоскостях, а также число излучателей, зная геометрические размеры самого антенного полотна.

Методика оценивания технических характеристик излучающих элементов двухполяризационной вибраторной антенной решетки широкоугольного сканирования в УHF-диапазоне заключается в последовательности действий.

Сначала сопоставляются разные конструкции вибраторных излучателей, работающих в УHF-диапазоне, и выбирается наиболее перспективный вариант. Далее проводится предварительный математический расчет типовых размеров излучателя на основе теории антенн [5–7].

Затем с помощью специализированных программных средств (СПС) строится эскиз излучателя и его электродинамическая модель. Это позволяет достаточно быстро получать оценочные характеристики излучающих элементов, соблюдая при этом строгость электромагнитного анализа.

Далее подбирается оптимальная геометрия излучателя. Изменяя типовые размеры и наклон плеч вибратора в пределах допустимых значений, рассчитывается коэффициент отражения (Γ) и коэффициент стоячей волны (КСВ) на входе излучателя в заданной полосе рабочих частот. Если расчетный Γ (КСВ) не соответствует требуемому значению, то откорректировав типовые размеры вибраторов и характеристики согласующих устройств, вновь проводится расчет Γ и КСВ.

Потом с помощью выбранного СПС строятся ДН излучателя в дальней зоне во всем диапазоне углов, и определяется максимальный КУ излучателя. При этом ширина ДН излучателя оценивалась по уровню уменьшения центрального максимума на 3 и 10 дБ.

На основании полученных расчетов делается вывод о работоспособности данного излучателя.

Далее приводятся результаты оценки технических характеристик излучающих элементов на основе использования предлагаемой методики.

Воспользуемся конструкцией излучателя, показанного на рис. 1. Таким образом, объектом исследования является крест-вибратор, установленный на стойке над проводящим экраном. На рис. 2 показан эскиз излучателя, где L_{a1} – длина плеча первого вибратора, L_{a2} – длина плеча второго (ортогонального) вибратора, H – высота вибраторов над проводящим экраном, θ – угол наклона плеч вибратора, W_c – диаметр запитывающей стойки, L_c – длина запитывающей стойки. При построении эскиза излучателя и его электродинамической модели использованы следующие специализированные программные средства: CST STUDIO и Antenna Magus.

При моделировании считалось, что крест-вibrator изготовлен из стали. Область возбуждения vibratorа загерметизирована путем заливки компаунда с диэлектрической постоянной $\epsilon = 3$ и закрыта диэлектрической крышкой. Запитывающая стойка крест-вibratorа представляет собой коаксиальную линию с волновым сопротивлением, равным 50 Ом, при этом излучатель запитывается идеальным генератором.

Моделирование проводилось в частотном диапазоне 400–500 МГц. Излучатель работает в режиме правой круговой поляризации.

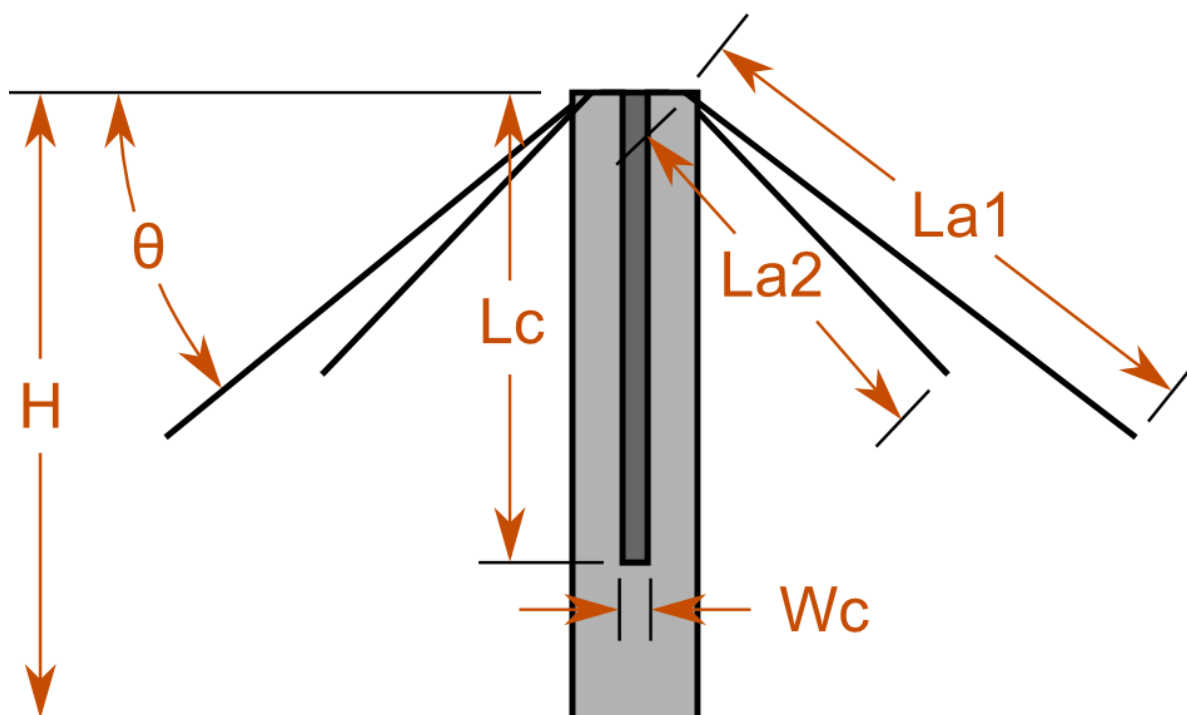


Рис. 2. Эскиз крест-вibratorа

Из приведенного анализа технической литературы коэффициент отражения согласованного vibratorного излучателя выбираем исходя из условия, что он не превышает значения, равного 12дБ, а максимальный КУ не должен быть меньше 6 дБ.

Первым шагом для поиска оптимальной конструкции крест-вibratorа является расчет типовых размеров излучателя. Предварительный математический расчет типовых размеров крест-вibratorа составил соответственно $La1 = 0,42\lambda_0$ и $La2 = 0,46\lambda_0$, при одинаковой высоте $H = 0,25\lambda_0$ над проводящим экраном, где λ_0 – средняя длина волны рабочего диапазона РЛС.

Затем подбирается оптимальная геометрия излучателя, в нашем случае, изменяя наклон плеч крест-вibratorа под углами к плоскости экрана: $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$, и рассчитываются коэффициенты отражения (рис. 3), а также среднее значение КСВ (табл. 1) на входе излучателя в заданной полосе рабочих частот при разном наклоне плеч.

Максимальное значение коэффициента отражения в заданной полосе рабочих частот во всех трех случаях наклона плеч не превышало заданного уровня -12дБ и составило -13 дБ, минимальное значение -29 дБ наблюдалось у крест-вibratorа с наклоном плеч 45° и промежуточное значение -24 дБ – у крест-вibratorа с наклоном плеч 35° . На основе полученных результатов можно сделать вывод, что выбор vibratorов с наклоном плеч 30° и 45° более предпочтителен.

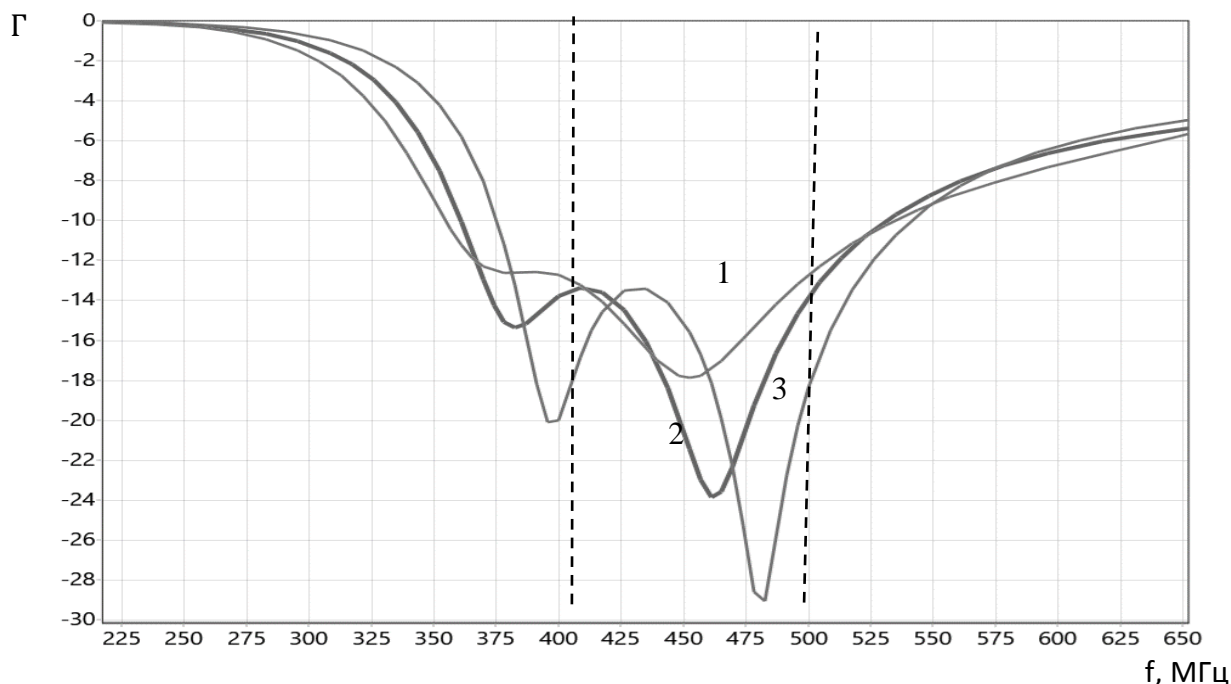


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения излучателя в заданной полосе рабочих частот при изменении наклона плеч:
 1 – $\theta = 0^\circ$; 2 – $\theta = 30^\circ$; 3 – $\theta = 45^\circ$

Таблица 1

Средние значения коэффициента отражения и коэффициента стоячей волны на входе крест-вибратора при разном наклоне плеч

Расчетный параметр	Крест-вибратор с наклоном плеч $\theta = 0^\circ$	Крест-вибратор с наклоном плеч $\theta = 30^\circ$	Крест-вибратор с наклоном плеч $\theta = 45^\circ$
Среднее значение Γ в заданной полосе рабочих частот	-14,41 дБ	-15,65 дБ	-18,69 дБ
Среднее значение КСВ в заданной полосе рабочих частот	1,07	1,05	1,02

Расчет среднего значения коэффициента отражения и КСВ у крест-вибратора с различным наклоном плеч в заданной полосе рабочих частот показал, что крест-вибратор с наклоном плеч 45° обладает самым низким КСВ в заданной полосе частот.

Результаты моделирования ДН крест-вибратора с разным наклоном плеч в дальней зоне во всем диапазоне углов показаны на рис. 4 в двух плоскостях: $\varphi_1 = 0^\circ$; $\varphi_2 = 90^\circ$. Значения ширины ДН излучателя по уровню уменьшения центрально максимума на 3 и 10 дБ в двух плоскостях $\varphi_1 = 0^\circ$; $\varphi_2 = 90^\circ$ сведены в табл. 2.

Установлено, что максимальный КУ имеет крест-вибратор с наклоном плеч 45° : $G_{45^\circ} = 7,67$ дБ относительно значений, полученных в случае наклона плеч 35° и 0° : $G_{35^\circ} = 7,53$ и $G_{0^\circ} = 6,92$.

Таблица 2

**Ширина ДН крест-вибратора с разным наклоном плеч
в двух плоскостях $\varphi_1 = 0$ и $\varphi_2 = 90^\circ$**

Расчетный параметр	Крест-вибратор с наклоном плеч $\theta = 0^\circ$	Крест-вибратор с наклоном плеч $\theta = 30^\circ$	Крест-вибратор с наклоном плеч $\theta = 45^\circ$
По уровню уменьшения центрально максимума ДН на 3 дБ			
Ширина ДН излучателя в плоскости $\varphi_1 = 0$	$\theta_{3\text{дБ}}^{0^\circ} = 83,7^\circ$	$\theta_{3\text{дБ}}^{30^\circ} = 80,8^\circ$	$\theta_{3\text{дБ}}^{45^\circ} = 81,2^\circ$;
Ширина ДН излучателя в плоскости $\varphi_2 = 90^\circ$	$\theta_{3\text{дБ}}^{0^\circ} = 77,2^\circ$	$\theta_{3\text{дБ}}^{30^\circ} = 76,3^\circ$	$\theta_{3\text{дБ}}^{45^\circ} = 77,7^\circ$
По уровню уменьшения центрально максимума ДН на 10 дБ			
Ширина ДН излучателя в плоскости $\varphi_1 = 0$	$\theta_{10\text{дБ}}^{0^\circ} = 153,7$	$\theta_{10\text{дБ}}^{30^\circ} = 153,5^\circ$	$\theta_{10\text{дБ}}^{45^\circ} = 153,2$
Ширина ДН излучателя в плоскости $\varphi_2 = 90^\circ$	$\theta_{10\text{дБ}}^{0^\circ} = 142,3^\circ$	$\theta_{10\text{дБ}}^{30^\circ} = 144,6^\circ$	$\theta_{10\text{дБ}}^{45^\circ} = 147,3^\circ$

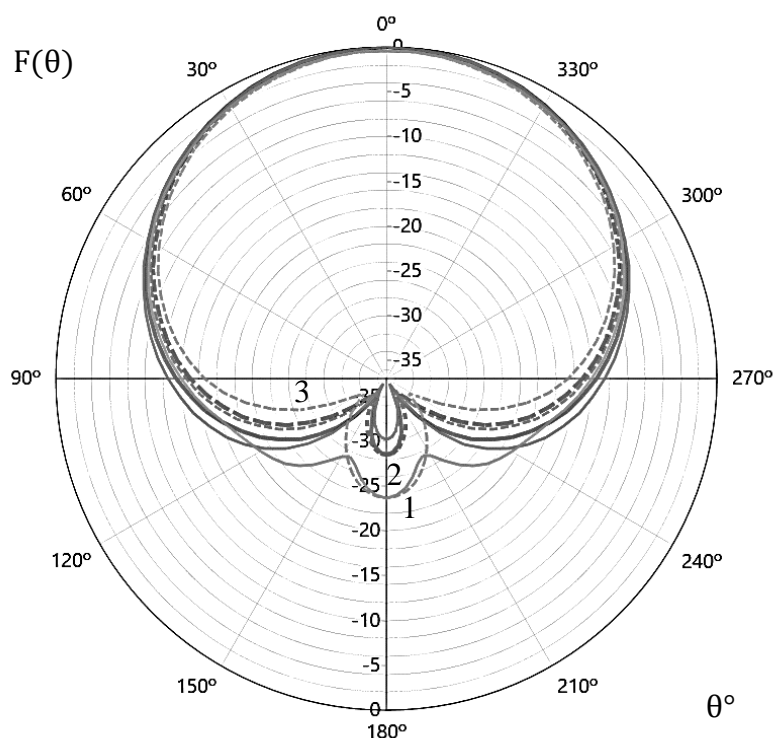


Рис. 4. Сечения диаграммы направленности крест-вибраторов с разным наклоном плеч в двух плоскостях $\varphi_1 = 0^\circ$; $\varphi_2 = 90^\circ$: 1 – с наклоном плеч 0° ; 2 – с наклоном плеч 30° ; 3 – с наклоном плеч 45°

На заключительном этапе проводится строгий электродинамический расчет ДН выбранного излучателя в дальней зоне. Выбираем крест-вибратор с наклоном плеч $\theta = 45^\circ$, так как он имеет самый высокий КУ, обладая при этом самым низким средним значением коэффи-

циента отражения в заданной полосе рабочих частот. Электродинамическая модель крест-вибратора, построенная в CST STUDIO, показана на рис. 5.

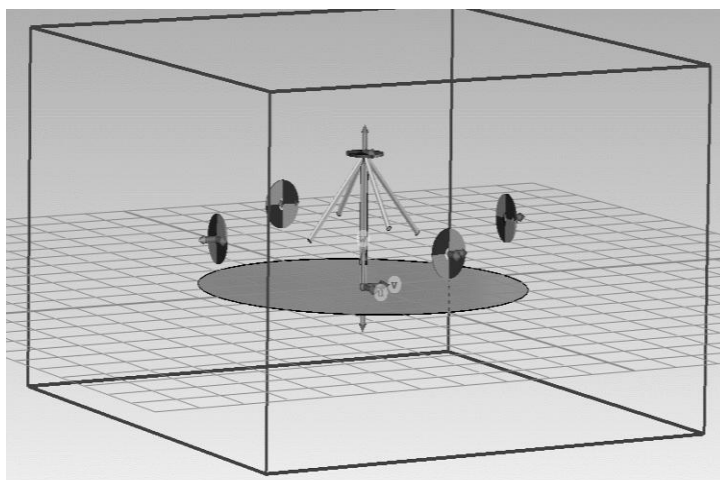


Рис. 5. Электродинамическая модель крест-вибратора

Преимуществом данной модели является возможность задания для каждого порта своих параметров, что позволяет смоделировать требуемый вид поляризации. В нашем случае было задано противофазное возбуждение для пар портов. Следующей важной настройкой для моделирования является возможность задания частотного диапазона. Далее устанавливаются открытые граничные условия, следует вычисление s -параметров излучателя и поля в дальней зоне. Поля могут быть зафиксированы на любых частотах во время имитации, поэтому обычно определяют частоты, при которых производится запись картины поля. Результаты представляются в соответствующей папке древа навигации с указанием номера порта возбуждения.

Электродинамическое моделирование излучения крест-вибратора с наклоном плеч $\theta = 45^\circ$ показало, что он обладает максимальным КУ, равным 7,67 дБ, а значения коэффициента отражения на входе излучателя не превышают заданного уровня -12 дБ в рабочем диапазоне частот и составляют в среднем -18,69 дБ, что соответствует выбранному критерию оптимальности параметров конструкции излучателей при оценке их технических характеристик.

На основании полученных расчетов делается вывод, что более предпочтительным вариантом при конструировании двухполяризационной вибраторной антенной решетки широкоугольного сканирования в UHF-диапазоне являются крест-вибраторы с наклоном плеч 45° . Практика проектирования подобных излучателей показывает, что непараллельность плеч вибраторов позволяет устранить резонансные эффекты, приводящие к ослеплению ФАР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика оценивания технических характеристик излучающих элементов двухполяризационной вибраторной АР широкоугольного сканирования в UHF-диапазоне обладает строгостью электродинамического анализа за счет применения специализированных программных средств: CST STUDIO и Antenna Magus.

Характерными особенностями методики являются:

– возможность учета конструкции и фактических размеров излучателей, включая конечную толщину вибраторов, свойства материалов, из которых сконструирован вибратор;

– определение максимального значения КУ излучателя в заданном секторе углов проводится с учетом условия, что значения коэффициента отражения не превышают некоторого заданного порога в рабочем диапазоне частот.

Список используемых источников

1. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим движением луча (введение в теорию) / под ред. чл.-корр. РАН Л.Д. Бахраха. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. – 232 с.
2. История отечественной радиолокации / под ред. С.В. Хохлова. – Изд. 2-е, доп. – М.: ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2015. – 736 с.
3. *Kenneth By, Stein J. Pave Paws Phased Array Radar Near Acceptance* // *Aviation Week&Space Technology*. – 1979. – April 9. – P. 60–65.
4. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
5. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / В.С. Филиппов, Л.И. Пономарев, А.Ю. Гринев и др.; под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1994. – С. 592.
6. *Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч.* Теория и анализ фазированных антенных решеток. – М.: Мир, 1974. – 456 с.
7. *Modern antenna design* / by Thomas A. Milligan. – 2nd ed. – US.: IEEE PRESS, 2005. – 633 p.

В.Ф. Алексеев,
доктор техн. наук, профессор;
Р.Р. Хайруллин

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ МАСКИРУЮЩИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НЕДОСТУПНОЙ ТЕРРИТОРИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Разработанный метод позволяет по материалам аэрокосмической съемки в автоматизированном режиме создавать специальные карты маскирующих свойств лесной растительности. Полученные результаты могут быть использованы при принятии решений по управлению войсками и оружием.

Ключевые слова: маскирующие свойства местности, естественные маски, вегетационный индекс, дешифровочные признаки.

ВВЕДЕНИЕ

Метод автоматизированной оценки маскирующих свойств местности (МСМ) предназначен для прогнозирования закрытости районов на основе учета естественных масок (ЕМ) лесной растительности. Предлагаемый метод основан на получении дешифровочных признаков лесного растительного покрова по материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Результатом реализации метода должно быть создание специальной карты маскирующих свойств местности (СК МСМ).

Данный метод должен быть положен в основу специализированного программного обеспечения (ПО), интегрированного с ПО геоинформационной системы военного назначения (ГИС ВН).

Метод включает в себя формирование специальной базы данных; создание эталона дешифровочных признаков по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); дешифрирование материалов ДЗЗ; создание специальной карты маскирующих свойств местности.

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

Оценка маскирующих свойств растительного покрова на недоступной территории начинается с исследований исходной информации, которую можно разделить на постоянную и переменную.

К постоянным данным относятся следующие.

1. Цифровые изображения местности (материалы ДЗЗ в красной области спектра (0,62–0,75 мкм), характеризующей максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, и ближней инфракрасной области спектра (0,76–1,3 мкм), характеризующей максимальное отражение клеточных структур листа, т. е. высокую фотосинтетическую активность, способствующую меньшему отражению в красной области спектра и большему – в инфракрасной) [7, 10].

2. Электронная карта (список карт), загруженная во внутреннем формате ГИС.

3. Цифровая матрица высот.

4. Растровые изображения ЭК.

5. Спектральные и цветовые характеристики фоновых поверхностей, их составляющие и коэффициенты отражения типов лесных растительных сообществ [8].

6. Спектральные и цветовые характеристики основных сельскохозяйственных культур в течение года [8].

7. Сводные данные по физико-географическим особенностям территорий военных округов и территориальному распределению фоновых поверхностей [3, 8], военно-географических описаний, описаний местности.

8. Коэффициент, учитывающий скрывающие свойства леса, в зависимости от времени года и состава древесных пород.

К переменным данным относятся следующие.

1. Размеры выбранного элементарного участка местности или объекта на ЭК. Выбор величины элементарных участков будет обусловлен тактическими нормативами и задачами, стоящими перед подразделениями разведки, связанными с оценкой МСМ. Размеры элементарного участка могут меняться в зависимости от обстановки и условий местности.

2. Погодно-климатические условия на определенную дату (при получении материалов ДЗЗ).

4. Данные о площади исследуемой территории (ширина и глубина).

5. Основные характеристики леса:

– сомкнутость крон;

– ярусность леса в зависимости от возраста леса, высоты и толщины деревьев.

– густота леса;

– типы лесных растительных сообществ (данные определяются после обработки материалов ДЗЗ);

– занимаемая площадь леса;

– площадь леса, пригодная для маскировки.

Обобщив постоянные и переменные данные, связанные с основными характеристиками ЕМ, можно формировать специальную базу данных.

В основу формирования специальной базы данных (СБД) должен быть положен объектно-ориентированный подход, позволяющий объективизировать процесс автоматизированного дешифрирования типов основных растительных сообществ, автоматизировать процесс экспертного анализа, обеспечить адаптацию к индикационным свойствам ландшафтов и учесть дешифровочные особенности фотоматериала. Схема специальной базы данных показана на рис. 1. Ее основу составляют отношения «Типы основных растительных сообществ», «Коэффициент, учитывающий изменения скрывающих свойств местности от типа леса и времени года» и «Коэффициент маскирующих свойств лесных растительных сообществ». Записи в отношениях представляют объекты СБД. Каждый объект должен иметь уникальный ключ (идентификатор, который на схеме выделен подчеркиванием). Наименования и ключи объектов являются глобальными атрибутами. Структуру объектов дешифрирования – «лесных растительных сообществ» образуют атрибутивные данные отношения «Типы основных сообществ». В свою очередь, атрибутивные данные отношения «Коэффициент, учитывающий изменения скрывающих свойств местности от типа леса и времени года» образуют структуру объектов для оценки маскирующих свойств лесных растительных сообществ.

Объектами первого классификатора являются типы лесных растительных сообществ (ЛРС). Особенность их формирования заключается в логическом объединении видов растительности по признаку принадлежности к экосистемам, т. е. в качестве типов ЛРС рассматриваются растительные экосистемы, характерные для изучаемой территории: лесные, луговые, экосистемы высшей водной растительности, болотные экосистемы. Типизация видов растительности, следовательно, и ЛРС, осуществляется атрибутом <значение НРВИ> (нормализованный разностный вегетационный индекс), входящим в схему кортежа.

Объектом второго классификатора является поправочный коэффициент (r), учитывающий изменения маскирующих свойств лесных массивов в зависимости от типа леса и времени года [2, 4, 5].

Основной характеристикой поправочного коэффициента, определяющей компенсирующее влияние на скрывающие свойства леса при его освоении, является зависимость от типов основных растительных сообществ и от времени года в момент исследования территории. Соответственно, определение коэффициента (r) осуществляется атрибутами <код типа ЛРС>, <значение НРВИ>, <время года>, входящими в схему кортежа. Количество кортежей в отношении, таким образом, будет определяться числом парных сочетаний ЛРС, заданных

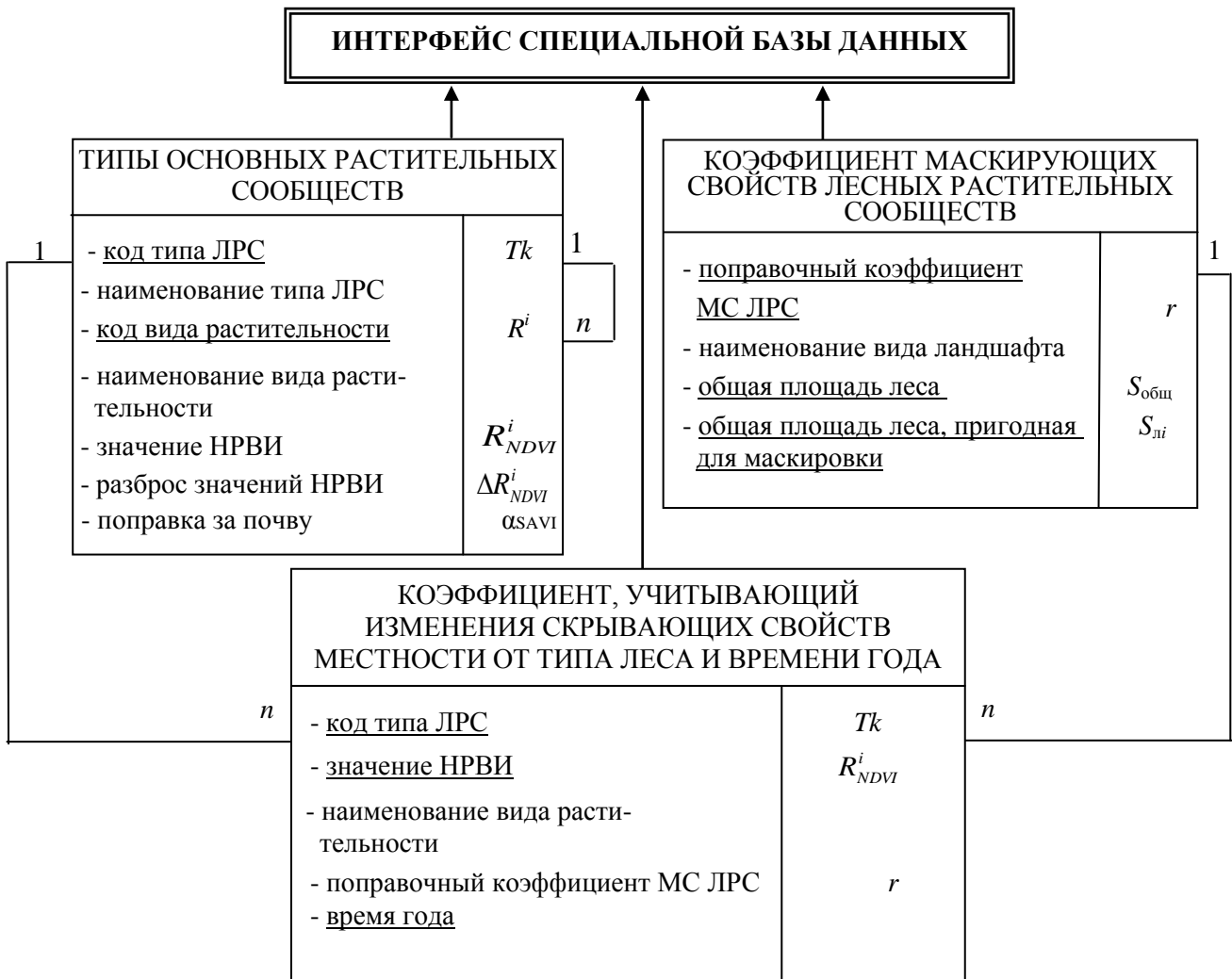


Рис. 1. Схема специальной базы данных («1», ..., «n» – связи типа «один ко многим»;
ЛРС – лесные растительные сообщества)

классификатором основных растительных сообществ. Необходимо заметить, что атрибуты, входящие в схему отношения «Коэффициент, учитывающий изменения скрывающих свойств местности от типа леса и времени года», функционально зависимы и являются классификационными единицами отношения «Коэффициент маскирующих свойств лесных растительных сообществ».

Основными показателями специальной базы данных являются: нормализованный разностный вегетационный индекс ($NDVI$); вегетационный индекс, скорректированный за подстилающую поверхность ($SAVI$); коэффициент по оценке маскирующих свойств растительного покрова.

1. Вегетационный индекс $NDVI$ и его разбросы определяются с использованием следующих формул [7, 10–12]:

$$R_{NDVI} = \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED})}; \quad (1)$$

$$R_{NDVI}^i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k R_{NDVI_p}; \quad (2)$$

$$\Delta R_{NDVI}^i = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^k (R_{NDVI}^i - R_{NDVI_p})^2}. \quad (3)$$

Здесь R_{NDVI}^i – значения $NDVI$;

ΔR_{NDVI}^i – разброс $NDVI$;

$p \in [1...k]$ – количество отсчетов ВИ в выборке по всем эталонным контурам заданных ОРС;

R_{RED} – значения отраженного растительностью света в красной области спектра;

R_{NIR} – значения отраженного растительностью света в ближней инфракрасной области спектра.

2. Индекс $SAVI$, скорректированный за подстилающую поверхность, и его разбросы вычисляются с использованием следующих формул [7, 11, 12]:

$$R_{SAVI} = \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED} + \alpha)} \cdot (1 + \alpha); \quad (4)$$

$$R_{SAVI}^i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k R_{SAVI_p}; \quad (5)$$

$$\Delta R_{SAVI}^i = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^k (R_{SAVI}^i - R_{SAVI_p})^2}, \quad (6)$$

где R_{SAVI}^i – вегетационный индекс, скорректированный за подстилающую поверхность;

ΔR_{SAVI}^i – разброс вегетационного индекса, скорректированного за подстилающую поверхность;

α – поправка за подстилающую поверхность: $\alpha \in [0, ..., 1]$;

$p \in [1...k]$ – количество отсчетов вегетационного индекса в выборке по всем эталонным контурам заданных ОРС.

Из анализа приведенных соотношений видно, что данный подход является полиморфным. В качестве параметров класса выступают совокупности значений вегетационных индексов, рассчитываемых в пределах интерактивно выделенных эталонных контуров ЛРС.

3. Оценка маскирующих свойств лесных растительных сообществ осуществляется с использованием зависимости [1, 6]

$$\Psi = 9 \cdot 10^{-3} \cdot C_{3M} \cdot k, \quad (7)$$

где Ψ – коэффициент скрывающих свойств лесных растительных сообществ;

$C_{зм}$ – степень закрытости местности, %;

k – коэффициент, учитывающий изменения скрывающих свойств местности от времени года и типа леса.

Оценка маскирующих свойств ЛРС начинается с расчета общей площади леса пригодной для маскировки:

$$S_{л_i} = S_{л_{общ}} - \sum_{i=1}^n S_{б_i} - \sum_{i=1}^n S_{укл_i} - \sum_{i=1}^n S_{д_i}, \quad (8)$$

степень закрытости лесной местности оценивается по формуле [31]

$$C_{зм} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{л_i}}{S_{л_{общ}}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $\sum_{i=1}^n S_{л_i}$ – суммарная площадь лесов, пригодных для маскировки;

$S_{л_{общ}}$ – общая площадь леса;

$S_{б}$ – площадь болот;

$S_{укл}$ – площадь уклонов (при крутизне скатов более 10^0);

$S_{д}$ – площадь леса, где среднее расстояние между деревьями < 6 м.

Подставив в формулу (7) выражение (9), получим ее общий вид

$$\psi = \frac{0,9 \times \left(\sum_{i=1}^n S_{л_i} \times k \right)}{S_{л_{общ}}}. \quad (10)$$

Эта формула является обобщенным коэффициентом скрывающих свойств лесной местности, обеспечивающим получение более точной оценки маскирующих свойств лесных растительных сообществ.

Одной из основных особенностей рассмотренного подхода к формированию специальной базы данных является введение в ее интерфейс логических операций, управляющих процессом корректировки дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова.

Корректировка дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова обусловлена снижением показателя достоверности машинной классификации, зависящего от трех групп факторов: 1) интегрирующих свойств растительности; 2) отсутствия резких различий растительности внутри одного природного ландшафта; 3) влияния почв, выходов скальных пород. Для устранения влияния этих факторов предлагается алгоритм коррекции вегетационного индекса, представленный на рис. 2.

При реализации данного алгоритма значения показателя достоверности машинной классификации ОРС (блок 1) рассчитываются по формуле [7, 12]

$$\chi = \frac{N_m}{N}, \quad (11)$$

где N_m – количество правильно отдешифрированных (машинно-классифицированных) объектов;

N – общее количество интерактивно выделенных объектов.

В случае снижения его значения ниже 0,75 осуществляется расчет зон перекрытий $NDVI$ с учетом их разброса (блок 3), в котором для интервалов $R_i = \left[\frac{R_{NDVI}^{i+1} - \Delta R_{NDVI}^{i+1}}{2}, \frac{R_{NDVI}^i + \Delta R_{NDVI}^i}{2} \right]$, отсортированных в порядке возрастания значений $NDVI$, проверяется следующее выражение:

$$[R_i \cap R_{i+1} = \emptyset] \vee \left[\left(\frac{R_{NDVI}^{i+1} - \Delta R_{NDVI}^{i+1}}{2} \right) - \left(\frac{R_{NDVI}^i + \Delta R_{NDVI}^i}{2} \right) \geq \Delta R \right], \quad (12)$$

где ΔR – наименьшее из всех значений ΔR_{NDVI}^i , определенных в отношении «Типы лесных растительных сообществ».

Невыполнение хотя бы одного условия из зависимости (12) свидетельствует об отсутствии выраженных границ между индексами ЛРС (блок 4). При необходимости выполняется устранение зон перекрытий (блок 8) путем введения в формулу (4) поправки за подстилающую поверхность (α). При этом вегетационный индекс, скорректированный за подстилающую поверхность, рассчитывается по формуле (5).

Расчет поправки выполняется с шагом 0,1 в интервале $\alpha = [0,1, 1,0]$. При достижении допустимого значения показателя достоверности расчет поправки заканчивается. Новые значения $NDVI$ записываются в специальную базу данных (блок 7), и работа алгоритма прекращается.

В противном случае осуществляется расчет диапазона $NDVI$ (σ_{NDVI}) в шкале допустимых значений для растительности (блок 5) по следующей формуле:

$$\sigma_{NDVI} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{NDVI}^i - R_{NDVI})^2}, \quad (13)$$

где

$$R_{NDVI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{NDVI}^i. \quad (14)$$

После расчета диапазона индексов $NDVI$ (σ_{NDVI}) необходимо проверить разность между максимальным и минимальным значениями $NDVI$ (Δ), определенными для растительности (блок 6). На практике выбираются равными 0,8 и 0,4 соответственно:

$$\frac{\sigma_{NDVI}}{\Delta} \geq 0,4. \quad (15)$$

Невыполнение условия свидетельствует о низком качестве фотоизображения. В этом случае осуществляется линейное контрастирование фотоизображения путем пересчета значений его фототона. Это реализуется растяжением диапазона колебаний фототона: темному из них присваивается значение «0», а светлому – «255». Результатом работы будет являться новое фотоизображение с более выраженными различиями фототона. Если линейное контрастирование фотоизображения не обеспечивает допустимые значения показателя достоверности машинной классификации, то осуществляется коррекция вегетационного индекса с использованием математического аппарата специальной базы данных. В случае, когда контрастированием ортофотоплана или коррекцией ВИ повысить значение показателя достоверности машинной классификации не удастся, необходимо выполнить повторное выделение контуров ТЛРС в интерактивном режиме. При этом предоставляется возможность выполнить анализ возникающих ошибок. Обработка данных заканчивается установкой новых значений R_{NDVI}^i , ΔR_{NDVI}^i в отношении «Типы основных растительных сообществ» специальной базы

данных (блок 7). Результатом работ являются упорядоченные по основным растительным сообществам значения НРВИ в соответствии со следующей зависимостью:

$$T \cap R_{NDVI} \neq \emptyset, T_k \in T, R_{NDVI}^i \in R_{NDVI} \text{ при } i = 1 \dots n, k = 1 \dots m, \quad (16)$$

где T_k – тип k -го основного растительного сообщества;

R_{NDVI}^i – эталонное значение НРВИ;

n – количество эталонных значений НРВИ;

m – количество типов основных растительных сообществ.

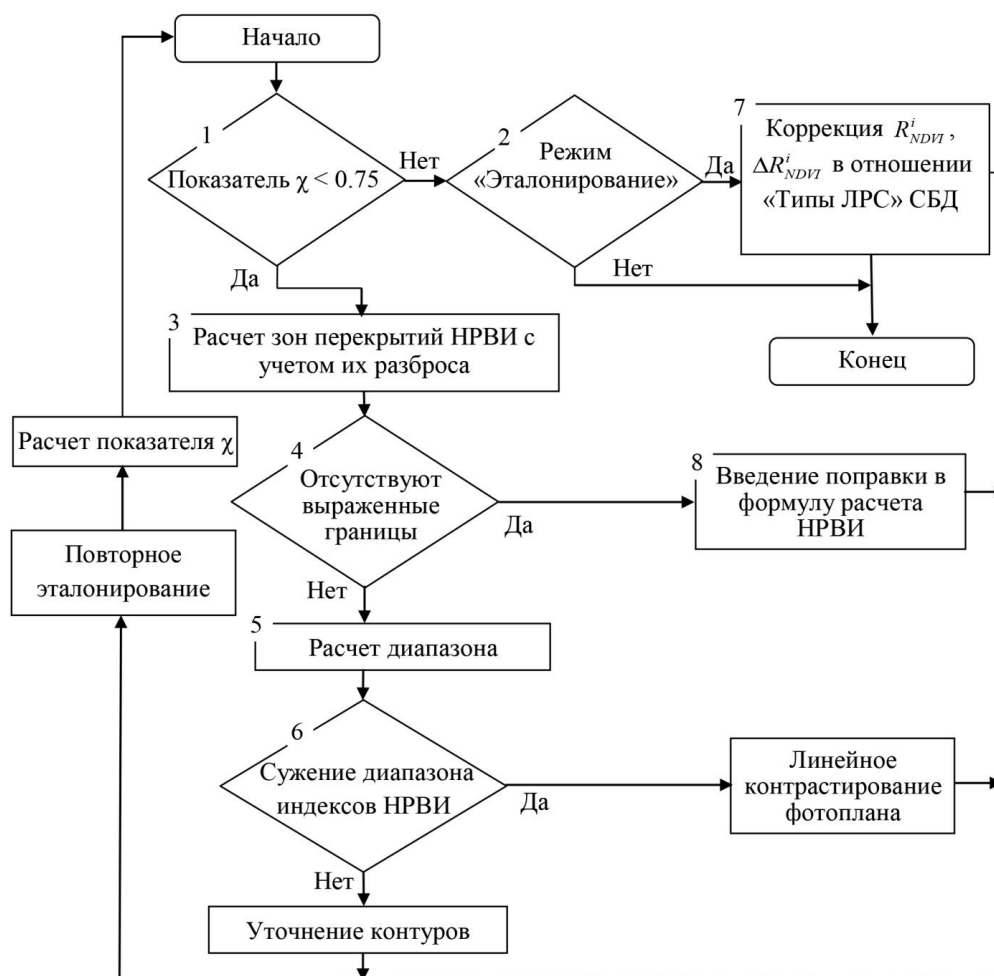


Рис. 2. Алгоритм коррекции вегетационного индекса

Таким образом, реализация изложенного подхода формирования СБД позволяет объективизировать процесс автоматизированного дешифрирования типов ЛРС, автоматизировать процесс экспертного анализа, обеспечить адаптацию к индикационным свойствам ландшафтов и учесть дешифровочные особенности фотоматериала.

СОЗДАНИЕ ЭТАЛОНА ДЕШИФРОВОЧНЫХ ПРИЗНАКОВ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

При создании эталона целесообразно применить подход, позволяющий обеспечить наилучший результат распознавания типов лесных растительных сообществ (ТЛРС). При

этом следует использовать формализованные знания, накопленные в результате анализа ландшафтов исследуемой территории. В рамках этого подхода можно применять методы цифровой фильтрации, логического и кластерного анализа данных, направленные на повышение надежности дешифровочного решения.

Структурная схема алгоритма формирования эталонов дешифровочных признаков по данным дистанционного зондирования, реализующего этап эталонирования, показана на рис. 3

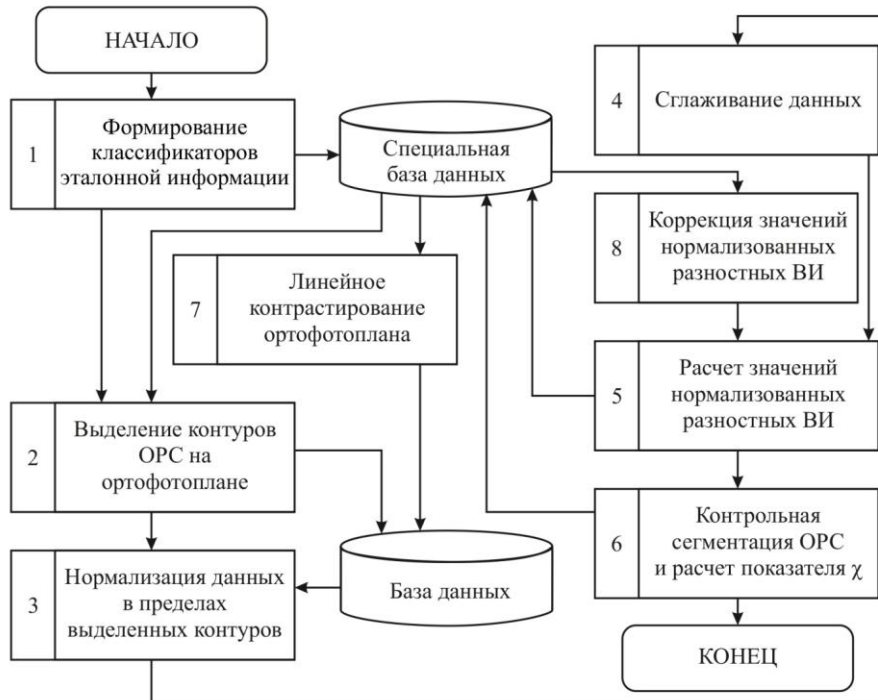


Рис. 3. Схема эталонирования дешифровочных признаков растительного покрова по данным ДЗЗ

Эталонирование дешифровочных признаков почвенно-растительного покрова по данным дистанционного зондирования начинается с заполнения специальной базы данных информацией, характеризующей типы основных растительных сообществ (ОРС), по сложности их структуры и контрастности (блок 1). После этого на ортофотоплане в интерактивном режиме с использованием ландшафтной карты осуществляется выделение контуров основных растительных сообществ (блок 2).

Далее выполняется нормализация данных в пределах выделенных контуров (блок 3). Она заключается в вычислении индексов $NDVI$ по формуле (2) для каждой пары пикселей в пределах выделенных контуров ОРС. Результатом работы будет являться карта $NDVI$.

На следующем этапе с целью исключения одиночных помех выполняется выравнивание спектральных образов объектов дешифрирования на карте $NDVI$ (блок 4). Сглаживание данных осуществляется методом медианной фильтрации квадратным окном размерностью $(M \times M)$ по формуле [7, 10, 12]

$$R_{NDVI} = (1/M^2) \sum_{g=i}^{i+M} \sum_{h=j}^{j+M} R_{NDVI_{g,h}}, \quad (17)$$

где i, j – порядковые номера элементов карты $NDVI$ по строкам и столбцам соответственно, $i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$;

g, h – текущие значения обрабатываемого элемента данных в пределах окна по строкам и столбцам соответственно.

Результатом операции сглаживания будет являться карта сглаженных значений $NDVI$.

В блоке 5 выполняется расчет НРВИ и их разбросов с использованием разбросов (3,5) для каждого типа основных растительных сообществ. Рассчитанные значения сохраняются в отношении «Типы основных растительных сообществ» специальной базы данных.

Далее, с использованием полученных индексов $NDVI$ выполняется контрольная сегментация основных растительных сообществ (блок 6). Она заключается в расчете показателя достоверности машинной классификации (χ) по формуле (11) в интерактивном режиме. Процесс эталонирования заканчивается в случае достижения показателя достоверности $\chi > 0,75$. В противном случае осуществляется линейное контрастирование ортофотоплана (блок 7) с использованием уравнения [7, 12]

$$y^0 = \frac{255 \cdot (y - y_{\min})}{(y_{\max} - y_{\min})}, \quad (18)$$

где y_{\min} , y_{\max} – минимальное и максимальное значения фототона фотоизображения;
 y – текущее значение фототона;
 y^0 – новое текущее значение фототона.

Если контрастированием значение достоверности машинной квалификации не удается повысить ($\chi < 0,75$), то осуществляется коррекция вегетационного индекса (блок 8) с использованием математического аппарата специальной базы данных.

Как следует из описания вышеприведенного алгоритма, процессы, происходящие при эталонировании, носят циклический характер. Это обеспечивает наиболее точную настройку на характерные особенности исследуемой территории и особенности съемочного материала.

ДЕШИФРИРОВАНИЕ

В основу автоматизированного дешифрирования аэрофотоснимков заложен машинно-ориентированный способ извлечения информации на основе прямых дешифровочных признаков. Предложенный подход обладает новизной, заключающейся в использовании формализованных знаний, полученных при изучении дешифровочных признаков основных растительных сообществ, а также в применении логического метода дешифрирования при обработке фотоизображений. Процесс дешифрирования заключается в последовательном выделении контуров основных растительных сообществ путем сравнения между собой значений ВИ, полученных из выражения (1) для обрабатываемых фотоизображений, с эталонными значениями, хранящимися в базе данных.

Дешифрирование реализуется в четыре этапа посредством алгоритма автоматизированного определения по данным ДЗЗ. Результатом является сформированная карта типов лесных растительных сообществ.

Этап 1. Нормализация выполняется для всех элементов фотоизображения исследуемого участка. При ее реализации индексы $NDVI$ вычисляются по формуле (1) для каждой пары пикселей (элементов изображений), последовательно выбираемых из цифровых массивов фотоизображений.

Этап 2. Выявляются территории с антропогенными объектами классификации. К ним относятся дороги, строения, дорожные сооружения и другие искусственные объекты. Индексы $NDVI$ для таких объектов существенно отличаются от индексов, соответствующих растительности, и находятся, как правило, в области отрицательных значений. Реализация данного блока осуществляется путем последовательной проверки «попадания» ВИ искусственных объектов в интервал допустимых значений ВИ, определенных для растительности (Δ). Площади элементов карты $NDVI$, соответствующих этим индексам, суммируются и фиксируются в карте антропогенно освоенных территорий.

Этап 3. Сглаживание данных заключается в выравнивании спектральных образов объектов дешифрирования. Оно осуществляется методом медианной фильтрации по формуле (2).

Этап 4. Процесс сегментации ОРС основан на методе локальной кластеризации. Он реализуется следующим образом. Методом «ближайших соседей» выполняется предварительная сегментация областей в матрице *NDVI* с равными индексами с установлением принадлежности выделенного кластера типу основного растительного сообщества. Кластерам, образованным неустановленными классификатором индексами, присваиваются свои кодовые обозначения, отличные от хранящихся в специальной базе данных. В результате будет сформирован набор карт, элементами которых являются коды типов основных растительных сообществ, а также коды неустановленных объектов. Для оконтуривания каждого массива кодов используется метод «наименьшего однородного сегмента, ассимилируемого ядром» [9, 13, 14]. Размер ядра сегмента ($l_1 \times l_1$) выбирается равным (3×3) точек, размер оболочки ($l_2 \times l_2$) – (7×7) точек. Весовая функция (*F*), используемая для установления степени генерализации исследуемого контура, определяется по формуле

$$F = \left(\frac{1 - (l_2 - l_1)}{l_2}\right) \cdot S_1 + \left(\frac{l_2 - l_1}{l_2}\right) \cdot S_2, \quad (19)$$

где S_1 и S_2 – площади ядра и оболочки соответственно при $l_2 > l_1$.

Отслеживание контура осуществляется путем перемещения окна по границе ядра вдоль контура объекта и проверки площади захвата на каждом шаге. Изменение направления перемещения окна выполняется в случае уменьшения площади более чем на 10%. Применение этого метода позволяет снизить чрезмерную изрезанность контуров и удалить «нитевидные» включения других контуров. Операция завершается фиксацией полученных координат контуров в отдельные списки ($\langle T_{ij} \rangle$) для основных растительных сообществ.

Таким образом, применение машинно-ориентированного способа извлечения информации на основе прямых дешифровочных признаков позволяет говорить о разработке основы интеллектуального анализа данных при исследовании лесных растительных сообществ для оценки их маскирующих свойств.

СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ КАРТЫ МСМ

Данный этап начинается со сглаживания данных методом медианной фильтрации по зависимости (17) и создания на этой основе векторного слоя типов лесных растительных сообществ исследуемой территории. После этого созданный векторный слой совмещается с растровой картой исследуемой территории, и в интерактивном режиме уточняются границы ареалов выделенных лесных сообществ. В качестве картографической основы предлагается использовать электронную топографическую карту масштабом 1:100 000. Ее создание предлагается осуществлять в среде ГИС «Оператор». Трансформирование отдельных снимков и объединение полученных растров в единое изображение предполагается реализовать с использованием созданного в среде «C++ Builder 6.0» программного приложения «Оценка маскирующих свойств местности по материалам аэрокосмической съемки». Точность трансформирования при высоте сечения рельефа 5–7 м в пределах элементарного участка может составить 8–10 м для равнинных участков местности и 10–12 м – для всхолмленных.

На следующем этапе каждому выделенному типу лесного растительного сообщества присваивается значение коэффициента его маскирующих свойств. Определение значений коэффициентов маскирующих свойств осуществляется с использованием формулы (10). В завершение данного этапа созданная карта оформляется в принятых условных знаках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод основан на получении дешифровочных признаков лесного растительного покрова и позволяет получать объективную информацию о маскирующих свойствах растительного покрова на основе автоматизированного дешифрирования космических снимков. Результатом реализации метода будет являться создание специальных карт маскирующих свойств лесной растительности. Такие карты необходимы органам военного управления для изучения, оценки и использования местности при принятии решений, планировании и ведении операции (боевых действий).

Список используемых источников

1. Драгомирецкий Ф.П., Кочетков К.Е., Крысанов М.Ф. Оперативная и тактическая маскировка войск (инженерные мероприятия): учебник. – М.: ВИУ, 2000. – Ч. 1. – 248 с.
2. Ефимов В.А., Кольчевский В.Е., Чермашенцев С.Г. Маскировка. Основы и техника маскировки. – М.: ВИА, 1971. – Ч. 1. – 348 с.
3. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. – М.: АН СССР, 1947. – 270 с.
4. Маскировка войск и войсковых объектов / В.А. Кривилев, А.Г. Булахов, С.С. Волков и др. – М.: ВИА, 1996. – 304 с.
5. Мацуленко В.А. Оперативная маскировка войск. – М.: Воениздат, 1975. – 195 с.
6. Методика оперативной оценки условий передвижения войск по местности и определения потребных сил для подготовки путей с использованием картограмм / И.С. Поляков, В.И. Семиглазов, В.И. Ткаченко, А.С. Смирнов. – М.: ВИА, 1998. – 70 с.
7. Методика автоматизированного создания специальной карты маскирующих свойств лесной растительности по материалам аэрокосмической съемки / В.Ф. Алексеев, А.Г. Осипов, А.В. Прокофьев, Р.Р. Хайруллин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 111–116.
8. Справочник по фоновым поверхностям территории СССР. – М.: Воениздат, 1987. – 96 с.
9. Deriche R., Giraudon G. A computational approach for corner and vertex detection // The International Journal of Computer Vision. – 1993. – Vol. 10(2). – P. 101–124.
10. Elvidge C.D., Lyon R.J.P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // Remote Sensing of Environment. – 1985. – Vol. 17. – P. 265–269.
11. The interpretation of spectral vegetation indexes / R.B. Myneni, F.G. Hall, P.J. Sellers, A.L. Marshak // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1995. – Vol. 33, Is. 2. – P. 481–486.
12. Richardson A.J., Wiegand C.L. Distinguishing vegetation from soil background information // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1977. – Vol. 43, Is. 12. – P. 1541–1552.
13. Paragios N., Deriche R. Geodesic Active Regions: A new paradigm to deal with frame partition problems in computer vision // Journal of Visual Communications and Image Representation, Special Issue on Partial Differential Equations in Image Processing. Computer Vision and Computer Graphics. – 2002. – № 13(1/2), march/june. – P. 249–268.
14. Smith S. M. A New Class of Corner Fields. // British Machine Vision Conference. – Leeds. Sep. Springer-Verlag. – 1992. – P. 139–148.

И.А. Готюр,
доктор техн. наук, доцент;
А.Н. Мешков;
М.Ю. Рудь;
И.А. Яременко

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В статье рассмотрены существующие в Вооруженных силах Российской Федерации (ВС РФ) автоматизированные системы гидрометеорологического обеспечения (АС ГМО) и определены перспективы развития АС ГМО с использованием технологий «больших данных». Представлены результаты нагрузочного тестирования баз данных (БД), используемых в АС ГМО ВС РФ.

Ключевые слова: технологии хранения и обработки данных, «большие данные», реляционная модель данных, нереляционная модель данных, *MongoDB*, *PostgreSQL*.

ВВЕДЕНИЕ

В практике гидрометеорологического обеспечения (ГМО) Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ) [5] для приема, обработки и передачи гидрометеорологической информации (ГМИ) применяются автоматизированные системы гидрометеорологического обеспечения (АС ГМО). В рамках ОКР «Новость» разработана АС ГМО, где в качестве хранилища данных используется реляционная система управления базами данных (СУБД) *PostgreSQL*. Следующим этапом развития АС ГМО стало использование СУБД *MongoDB*, основанной на концепции «больших данных» [1, 7, 4]. В то же время с увеличением объема хранилища увеличивается и время доступа к метеорологическим данным.

Несоответствие малопроизводительных решений современным требованиям оперативности обработки ГМИ стало предпосылкой к поиску путей повышения производительности АС ГМО в условиях непрерывного возрастания количества принимаемой ГМИ.

В данной статье проведен сравнительный анализ производительности СУБД *PostgreSQL* и *MongoDB* применительно к специфике использования ГМИ при гидрометеорологическом обеспечении деятельности ВС РФ.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БАЗ ДАННЫХ В СОСТАВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В настоящее время проблема «больших данных» заключается в использовании устаревших технологий работы с данными в условиях непрерывного увеличения их объема. Даже с учетом достаточной производительности электронных компонентов программно-технических комплексов (ПТК) архитектурные и программные решения не позволяют решить эту проблему полностью. Назрела необходимость пересмотра парадигмы реляционных баз данных и анализа возможности других подходов к хранению больших объемов данных.

Наряду с традиционными (реляционными) подходами в 2009 году появились альтернативные (*NoSQL*) решения проблемы обработки больших объемов данных. Следуя концепции «больших данных», *NoSQL* решения разрабатывались именно с целью обеспечения быстрого сохранения, накопления и получения необходимых данных.

Среди прочих решений в подходе хранения выделяются документ-ориентированные базы данных, базы ключ-значение, графовые и сетевые базы данных [12]. С точки зрения логической структуры ГМИ наиболее структурно схожими являются документ-ориентированные базы данных.

В то же время, учитывая мировой опыт проектирования систем хранения и оперативного доступа к большому количеству данных, ограничиваться одним документ-ориентированным хранилищем не стоит. В помощь к основному хранилищу устанавливаются дополнительные БД, которые обеспечивают оперативность и снимают нагрузку с основной БД. Рассмотрим три варианта организации хранилища данных метеорологических величин (МВ).

На данный момент принятым на вооружение техническим средством метеослужбы, позволяющим решать задачи ГМО в полном объеме, является комплекс АРМ-ВГМ-М и его модификации. В статье представлены результаты экспериментов по определению времени выполнения запросов к подсистемам баз данных, реализованных в рамках ОКР «Новость» и «Маслобойка».

Перейдем к рассмотрению структуры БД комплекса АРМ-ВГМ-М, разработанной в рамках ОКР «Новость». В качестве СУБД используется *PostgreSQL 10*. Данные хранятся в таблицах по датам и срокам (т. е. на каждую дату и на каждый срок создается отдельная таблица в базе данных). Такая схема организации данных в реляционных БД называется партиципированием (рис. 1). Информация в БД представлена в следующем виде:

- данные приземных измерений в таблицах хранятся в раскодированном виде: дескриптор параметра, сырое значение, раскодированное значение, показатель качества, уровень, координаты, номер станции, дата;

- данные аэрологических измерений в таблицах хранятся в раскодированном виде: дескриптор параметра, сырое значение, раскодированное значение, показатель качества, уровень, координаты, номер станции, дата;

- данные аэропортов в таблицах хранятся в раскодированном виде: дескриптор параметра, сырое значение, раскодированное значение, показатель качества, координаты, код аэропорта, дата;

- информация о количестве данных в каждой таблице содержится в отдельных таблицах и необходима для отображения количества данных по каждому параметру на установленном уровне;

- гелиогеофизическая информация в таблицах хранится в раскодированном виде: дескриптор параметра, сырое значение, раскодированное значение, показатель качества, тип данных, уровень, идентификатор группы параметров, координаты, код станции, дата;

- гидрологическая информация в таблицах хранится в раскодированном виде: дескриптор параметра, сырое значение, раскодированное значение, показатель качества, координаты, код станции, дата;

- данные МРЛ в таблицах хранятся только описательные характеристики наблюдений (уровень, параметр, срок, количество данных);

- прогностические данные в таблицах хранятся только параметры поля (путь в файловой системе к файлу с данными, дата, идентификатор прогностического центра, признак того, проанализировано поле или нет).

Необходимость использования отдельных таблиц данных для каждого срока обусловлена избыточностью информации. Так, для того чтобы описать одно-единственное значение температуры в определенной точке за определенный срок необходимо выделить ряд дополнительных характеристик, относящихся к метаинформации. Таким образом, каждая единица полезной информации описывается несколькими единицами метаинформации. Эти зависимости описаны в табл. 1.



Рис. 1. Примерная структура организации данных в таблицы в БД PostgreSQL

Таблица 1

Соотношение полезной информации и метainформации в БД MB PostgreSQL

№ п/п	Тип данных	Значения MB		Метаинформация	
		лог. ед.	байт	лог. ед.	байт
1	Аэрологические данные	2	4+4 (8)	23	17x4, 3x8, 16 (108)
2	Данные приземных наблюдений	1	4 (4)	23	18x4, 4x8, 16 (120)
3	Данные радарных наблюдений	320	320	9	7x4, 8x62
4	Гидрологические данные	1	4 (4)	23	18x4, 4x8, 16 (120)
5	Данные аэропортов	1	4 (4)	23	18x4, 4x8, 16 (120)
6	Прогностические данные	14102	14102	15	3x4, 63x8, 6x2, 1 (529)

Соотношение полезной нагрузки и метainформации представлено на рис. 2.

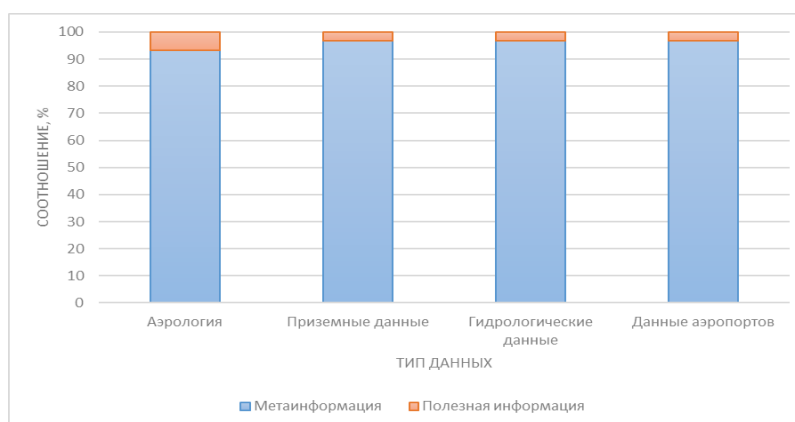


Рис. 2. Соотношение объема данных с полезной нагрузкой и объема метainформации в таблице

Такая структура базы данных предназначена обеспечить оперативность получения необходимой информации из БД. Одновременно с этим такая структура является избыточной, так как только около 7% объема БД – это непосредственно значения метеорологических величин, которые используются в дальнейшей обработке. В связи с этим на каждый срок и каждый тип данных создается новая таблица в БД. За сутки создается 103 новых таблицы с данными о состоянии геосфер. В течение года число таблиц может достигнуть 37 тысяч. С увеличением количества принимаемых данных, ростом количества таблиц увеличивается время обработки запросов, и в итоге оно становится неприемлемым для решения оперативных задач ГМО.

Решением проблемы увеличения времени обработки запросов должен стать подход к организации БД, фундаментом для которого будут служить принципы «больших данных». Одной из СУБД, основанной на *NoSQL* решениях, является документ-ориентированная СУБД *MongoDB*. Эта СУБД была выбрана в качестве хранилища данных для перспективной АС ГМО ВС РФ.

Рассмотрим состав и структуру БД АС ГМО ВС РФ, разрабатываемой в рамках ОКР «Маслобойка». В отличие от реляционных баз данных, где информация организована в таблицы, в документ-ориентированных базах данных информация организована в виде документов, которые хранятся в коллекциях. СУБД не предъявляет требований к структуре документа – она может меняться со временем. Информация в БД представлена в следующем виде: все данные приземных наблюдений, аэрологические данные, фактическая погода по аэропортам и аэродромам, гидрологические и гелиогеофизические данные находятся в одной коллекции, в виде массива документов. Структура коллекции изображена на рис. 3.

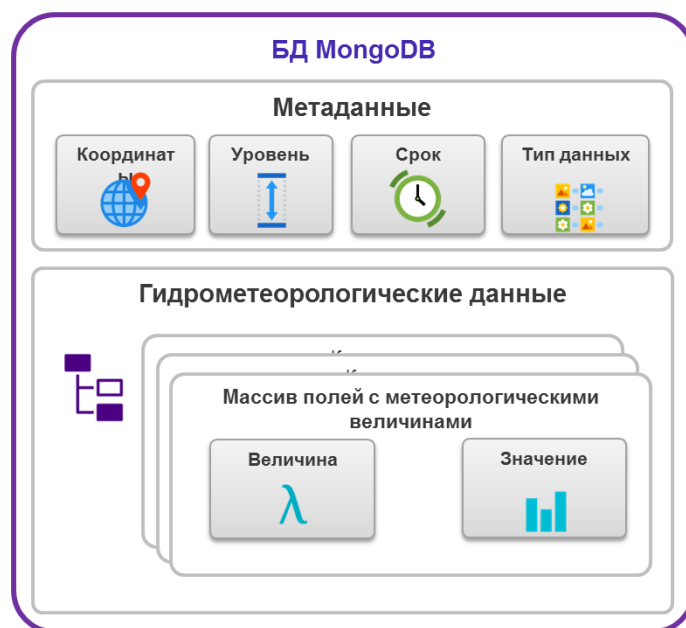


Рис. 3. Структура коллекции, содержащей метеорологические величины

Особенностью документ-ориентированной БД *MongoDB* является формат хранения данных. В качестве основного формата используется BSON. Данные в базе хранятся в сжатом бинарном виде, поэтому оценивать соотношение полезная нагрузка/метаданные будем для целого документа. Эти соотношения представлены в табл. 2.

Из анализа приведенных таблиц можно сделать вывод, что по сравнению с организацией ГМИ в СУБД *PostgreSQL* для базы данных *MongoDB* соотношение полезной информации к метаинформации в несколько раз меньше. Эта особенность вызвана необходимостью описы-

вать каждый документ заново, в отличие от СУБД, где данные представлены в табличном виде. В таблице заголовок описывается один раз, после чего он используется для адресации информации в БД.

Рассмотрим результаты нагрузочного тестирования выбранных БД. Условия следующие: в базах данных содержится информация о состоянии атмосферы за четыре месяца, СУБД развернута на виртуальных серверах в локальной сети.

Соотношение полезной нагрузки и метаданных представлено на рис. 4.

Таблица 2

Соотношение полезной информации к метаданным в БД ГМИ MongoDB

№ п/п	Тип данных	Значения МВ		Метаинформация	
		лог. ед.	байт	лог. ед.	байт
1	Аэрологические данные	4	16	39	807
2	Данные приземных наблюдений	9	36	117	3826
3	Данные радарных наблюдений	351	21002	13	203
4	Гидрологические данные	2	4	36	629
5	Данные аэропортов	20	80	219	4236
6	Прогностические данные	34504	33417	20	292

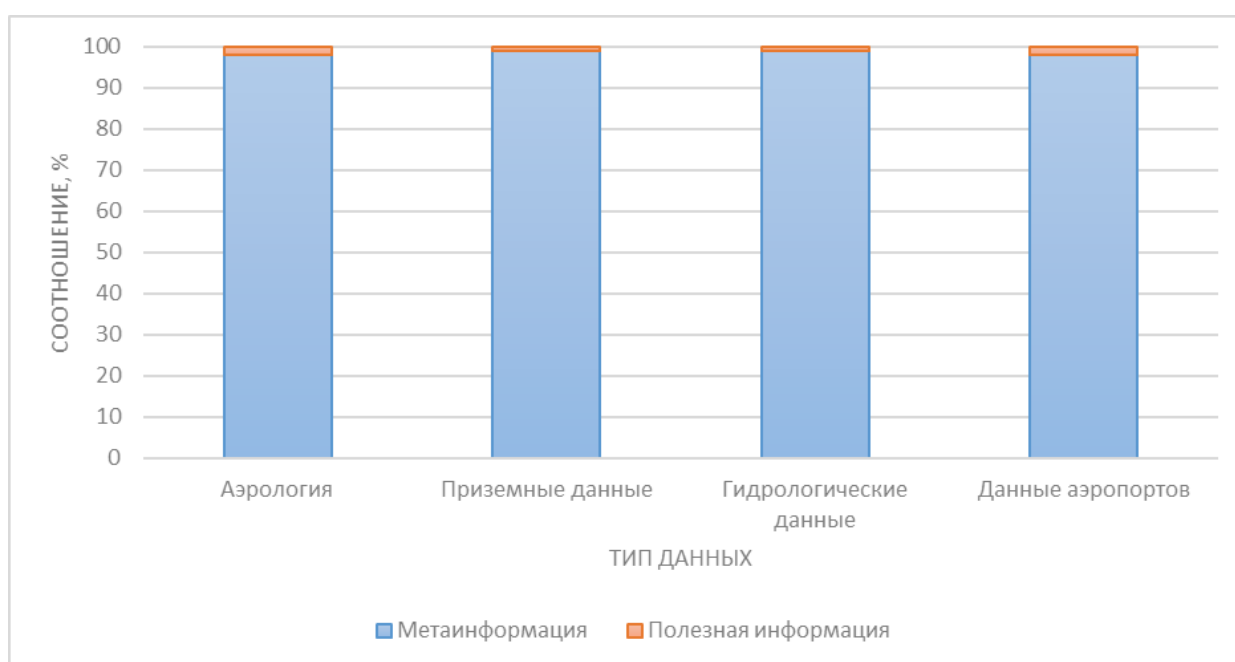


Рис. 4. Соотношение объема данных с полезной нагрузкой и объема метаданных в таблице

Размер тестовых данных МВ составил порядка 200 Гбайт. Основным показателем, рассматриваемым при сравнении производительности – это время получения данных (рис. 5–7).

Как видно из табл. 3, наиболее часто исполняемые запросы (это получение значений метеорологических полей на приземном уровне и получение аэрологических данных) быстрее (на 46%) выполняются на документ-ориентированной СУБД *MongoDB*. В то же время запросы, распределенные во времени, такие как запрос метеорологических величин по станции за 3 дня, значительно быстрее (на 68%) выполняются на реляционной СУБД *PostgreSQL*, используемой в комплексе АРМ-ВГМ-М.

Увеличенное время выполнения запроса метеорологических величин по заданной точке за определенный период времени к БД *MongoDB* объясняется неправильной настройкой индексации под данный запрос.

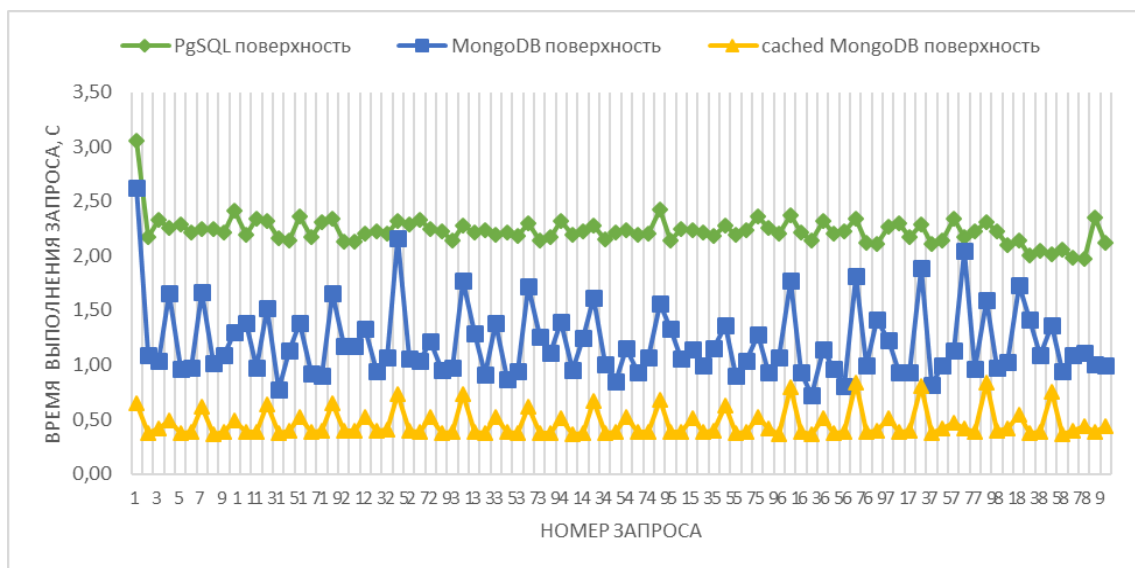


Рис. 5. Время выполнения запросов на получение данных о состоянии метеорологических величин, измеряемых по наземным станциям

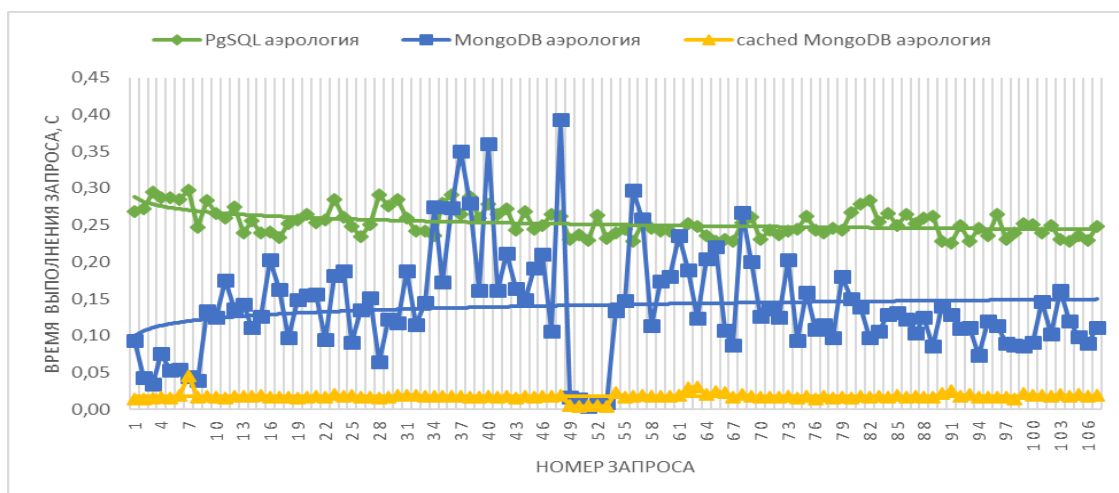


Рис. 6. Время выполнения запросов на получение данных о вертикальном распределении метеорологических величин

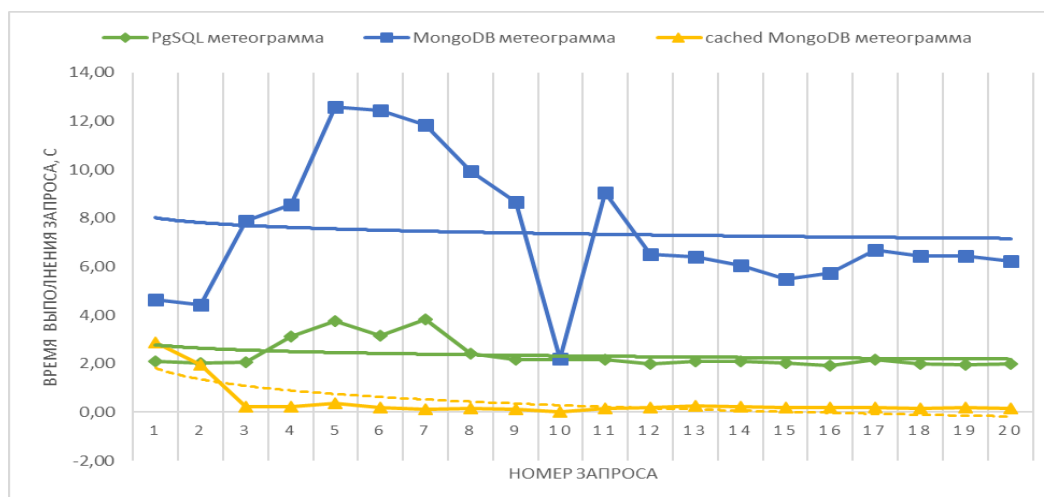


Рис. 7. Время выполнения запросов на получение данных об изменении метеорологических величин в течение 3 дней

Таблица 3

Средненные результаты выполнения запросов к БД

№ п/п	СУБД	Объем БД, Гбайт	Количество записей в БД, млн шт.	Время выполнения запроса значений МП у земли, с	Время выполнения запроса аэрологических данных, с	Время выполнения запроса МВ по станции за 3 дня, с
1	<i>PostgreSQL</i>	~200	~1540	2,23	0,25	2,35
2	<i>MongoDB</i>	~300	~210	1,20	0,14	7,40
3	<i>MongoDB cached</i>	~300	~210	0,46	0,02	0,41

Перед назначением индексации в БД необходимо проанализировать наиболее часто используемые запросы и рассмотреть типичные задачи, решаемые в рамках ГМО. Кроме того, необходимо проектировать БД с учетом специфики документ-ориентированных БД. Например, так как названия всех полей документа присутствуют в документах базы, необходимо по возможности сокращать названия полей. Зачастую средняя длина названия поля документа составляет 5–8 символов, т. е. только название поля в среднем занимает 10–16 байт, в то время как его значение от 2 до 6 байт. Получается, большая часть объема документа занимают не хранимые значения, а названия полей. Поэтому необходимо сократить названия полей до 1-2 символов. Такой подход значительно (до 70%) уменьшит размер БД.

Анализ результатов тестирования показал, что производительность СУБД *MongoDB* при размерах БД более 200 Гбайт по наиболее часто исполняемым запросам превышает производительность СУБД *PostgreSQL*. Для решения задач ГМО в повседневной деятельности *MongoDB* вполне подходит. Но нередко высоконагруженные системы, имеющие узкие места в своей производительности, быстро выходят из строя как раз из-за наличия так называемого «бутылочного горлышка». В данном случае наименее производительный запрос с точки зрения документ-ориентированной БД может в итоге привести к резкому падению производительности или отказу всей системы.

Назрела необходимость пересмотреть подход к проектированию структуры БД. Выделить типичные с точки зрения автоматизированных систем задачи ГМО ВС РФ и проектировать систему БД в соответствии с этими задачами. Такая система может оказаться менее гибкой,

но она сможет обеспечить производительность и отказоустойчивость всей автоматизированной системы ГМО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день с учетом круглосуточного приема и обработки метеорологической информации объем базы данных за 5 лет может увеличиться более чем на 15 Терабайт. Стандартные реляционные модели данных и программно-технические решения на их базе не обеспечат требуемую оперативность получения данных.

Организация хранения ГМИ с использованием нереляционных моделей данных и с помощью подходов «больших данных» позволит сохранить оперативность доступа к ГМИ, а также обеспечить накопление ГМИ для последующего анализа, составления климатических справок и решения других задач ГМО ВС РФ.

Например, уже создан ряд СУБД [1], следующих принципам «больших данных»: *MongoDB*, *Cassandra*, *HBase*, *OrientDB*, *Hive*, *Redis*, *Tarantool*, *CouchDB*. Они сохраняют высокую производительность даже при достижении больших объемов данных. В статье предложен подход по организации хранения ГМИ на базе СУБД *MongoDB*. Использование такого подхода позволило повысить оперативность доступа по наиболее частотным запросам более чем в 2 раза.

Следует отметить, что комбинация различных СУБД в соответствии с типами запросов ГМИ, распределения ролей и обязанностей между различными типами СУБД может привести к достижению более высоких показателей производительности АС ГМО.

Для увеличения производительности применяемых СУБД необходимо найти баланс между избыточностью метаинформации и ее недостаточностью для идентификации той или иной величины. Это позволит значительно сократить общий объем БД и уменьшить время выполнения запросов к СУБД.

Составление и назначение индексов в БД необходимо производить после тщательного анализа решаемых задач и запросов, обеспечивающих их выполнение. Избыточные индексы также значительно увеличивают объем БД, что, в свою очередь, увеличивает время обработки и выполнения запросов.

Список используемых источников

1. Большие данные. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Большие_данные (дата обращения: 23.12.2019).
2. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. – Л.: Гидрометиздат, 1963. – 288 с.
3. Готюр И.А., Костромитинов А.В. Методика уточнения поля геопотенциала над акваториями океанов // Навигация и гидрография / ГНИНГИ. – 2013. – № 36. – С. 97–102.
4. Иванов П.Д., Вампилов В.Ж. Технологии Big Data и их применение на современном промышленном предприятии // Наука и инновации: инженерный журн. – 2014. – Вып. 8. – <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1228.html> (дата обращения: 24.12.2019).
5. Костромитинов А.В., Мешков А.Н., Прохоренко П.А. Способ организации физического уровня СУБД автоматизированных систем гидрометеорологического обеспечения // Материалы V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб., 2018. – С. 203–218.
6. Медетов А.А. Термин Big Data и способы его применения // Молодой ученый. – 2016. – № 11. – С. 207–210.
7. Новиков Б.А. Основы технологий баз данных. – М.: ДМК, 2019. – 239 с.

8. Руководство по глобальной системе обработки данных / ВМО. – 1997. – № 305. – 211 с.
9. *Стасышин В.А.* Базы данных, технологии доступа: учеб. пособие для СПО. – М.: Юрайт, 2019. – 165 с.
10. Introduction to Big Data. – URL: <https://www.coursera.org/learn/big-data-introduction> (дата обращения: 25.12.2019).
11. MongoDB. – URL: <https://docs.mongodb.com/manual/core/data-modeling-introduction> (дата обращения: 25.12.2019).
12. *Nathan Marz* – Big Data. Principles and best practices of scalable real-time data systems: Manning, 2019. – 309 p.

Г.Н. Мальцев,
доктор техн. наук, профессор;
С.А. Матвеев

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРЕОДОЛЕНИЯ НАРУШИТЕЛЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Разработаны марковские модели процесса преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации. В основе моделей лежит формализованное описание последовательного преодоления нарушителем рубежей защиты в пространстве состояний для трех базовых сценариев, отличающихся описанием переходов между состояниями в случае непреодоления очередного рубежа защиты. Базовый характер рассмотренных сценариев определяется возможностью их комбинирования для описания частных сценариев. Модели позволяют выявить изменение во времени вероятности реализации угрозы для заданных интенсивностей переходов между состояниями, которые определяются характеристиками системы защиты информации и нарушителя. Представлены результаты расчетов вероятности реализации угрозы, позволяющие качественно проанализировать характер ее изменения во времени в различных диапазонах значений и сравнить изменение защищенности информационной системы при различных базовых сценариях преодоления нарушителем рубежей защиты.

Ключевые слова: защита информации, угрозы информационной безопасности, граф состояний, сценарии преодоления рубежей защиты.

ВВЕДЕНИЕ

В современных информационно-телекоммуникационных системах при передаче и обработке критической информации могут быть реализованы различные методы защиты информации, обеспечивающие достижение определенного уровня информационной безопасности [1, 2]. Состав средств защиты информации определяется исходя из ожидаемых угроз, требований к информационной безопасности системы и предполагаемых целей нарушителей. В то же время в условиях информационного противоборства объективным свойством защищенности информационных систем является ее постепенное снижение при неизменном составе средств защиты или при их фиксированных параметрах [3, 4].

Для информационных систем, построенных в соответствии с архитектурой открытых систем, характерно многоуровневое представление информационных процессов согласно эталонной модели информационных систем [5, 6]. Соответствующее многоуровневое построение имеют и используемые системы защиты информации, а для реализации угроз информационной безопасности нарушитель должен последовательно преодолеть несколько средств защиты, находящихся на различных уровнях и образующих рубежи защиты. При этом возможны разные сценарии преодоления нарушителем различных рубежей защиты.

Анализ процессов преодоления нарушителем рубежей системы защиты информации позволяет определить характеристики защищенности информационной системы и выявить пути обеспечения требуемого уровня информационной безопасности. В настоящей статье рассмотрены и исследованы марковские модели процесса преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации, позволяющие анализировать изменение во времени вероятностных характеристик защищенности информационной системы для трех базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕОДОЛЕНИЯ НАРУШИТЕЛЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ МАРКОВСКИМИ МОДЕЛЯМИ

Под информационной безопасностью понимается состояние информационной системы, при котором на требуемом уровне обеспечивается ее защищенность от угроз информационной безопасности [2, 4]. Угроза информационной безопасности – это потенциально возможное воздействие нарушителя на информационную систему, которое прямо или косвенно может нанести ущерб ее информационной безопасности. При наличии многоуровневой системы защиты информации для реализации угрозы информационной безопасности нарушитель должен преодолеть все рубежи защиты, образуемые средствами системы защиты информации на различных уровнях.

Процесс преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации может быть представлен в пространстве состояний процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем. Дискретные состояния соответствуют попыткам нарушителя преодолеть различные рубежи защиты при реализации угроз информационной безопасности, а протекание этого процесса в непрерывном времени отражает то, что преодоление рубежей защиты происходит, в общем случае, в случайные моменты времени. В зависимости от принятых в информационно-телекоммуникационной системе способа доступа и технологии информационного обмена рубежи защиты информации могут быть связаны с преодолением тех или иных структурных элементов системы или уровней эталонной модели информационных систем. Такие процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем описываются марковскими моделями, которые получают широкое распространение при анализе в пространстве состояний процессов функционирования сложных технических и организационных систем, в том числе систем защиты информации [7, 8].

Марковские модели характеризуются графами состояний анализируемых процессов. Процесс преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации описывается направленным графом реализации угроз. Состояния графа реализации угроз соответствуют различной степени реализации угрозы, являющейся целью нарушителя, а переходы между состояниями – последовательностью преодоления рубежей защиты. Вид графа реализации угроз зависит от конкретной информационной системы, ее среды и целей безопасности. Будем полагать, что реализация угрозы информационной безопасности имеет место при преодолении нарушителем всех рубежей многоуровневой системы защиты информации, и при этом возможен один из трех базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты.

При первом базовом сценарии (сценарий 1) после каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты нарушителем происходит его возврат к исходному состоянию, и все рубежи необходимо преодолевать заново. При втором базовом сценарии (сценарий 2) после каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты нарушителем происходит его возврат к преодолению предыдущего рубежа защиты, и существует возможность возврата к исходному состоянию, когда все рубежи необходимо преодолевать заново. Данный сценарий является средним для нарушителя. При третьем базовом сценарии (сценарий 3) после каждой неудачной попытки преодоления нарушителем очередного рубежа защиты преодолевать предыдущие рубежи защиты ему не требуется, происходит переход к состоянию преодоления предыдущего рубежа защиты, и возврат к исходному состоянию, когда все рубежи необходимо преодолевать заново, невозможен. Для нарушителя сценарий 1 является наихудшим, сценарий 3 – наилучшим, а сценарий 2 занимает между ними промежуточное положение. С точки зрения обеспечения информационной безопасности, напротив, сценарий 1 является наилучшим, сценарий 3 – наихудшим, а сценарий 2 также занимает между ними промежуточное положение.

Базовый характер сценариев 1–3 определяется возможностью их комбинирования и описания различных частных сценариев (вариантов) преодоления нарушителем различных ру-

бежей многоуровневой системы защиты информации. Так, при преодолении одних рубежей защиты после неудачной попытки их преодоления для нарушителя может иметь место возврат к исходному состоянию, при преодолении других рубежей после неудачной попытки их преодоления для нарушителя может иметь место возврат к предыдущему рубежу защиты с возможностью или невозможностью возврата к исходному состоянию.

Будем без потери общности полагать, что анализируемая информационная система имеет многоуровневую систему защиты информации с четырьмя рубежами защиты (1–4-й рубежи), которые преодолеваются нарушителем последовательно. Реализация угрозы информационной безопасности происходит при преодолении всех четырех рубежей защиты – после преодоления 4-го рубежа.

Введем следующие состояния процесса преодоления нарушителем рубежей защиты: 1 – исходное состояние возникновения угрозы; 2 – состояние попытки преодоления 1-го рубежа защиты; 3 – состояние попытки преодоления 2-го рубежа защиты; 4 – состояние попытки преодоления 3-го рубежа защиты; 5 – состояние попытки преодоления 4-го рубежа защиты; 6 – состояние реализации угрозы. Данные состояния образуют графы состояний марковских моделей для сценариев 1 и 2 преодоления нарушителем рубежей защиты и описывают общий случай, когда при преодолении очередного рубежа защиты, кроме последнего 4-го рубежа, сохраняется возможность возврата к предыдущим рубежам и к исходному состоянию. С учетом содержания описываемого процесса преодоления нарушителем рубежей защиты начальным состоянием всегда является состояние возникновения угрозы 1 и при соответствующем задании интенсивностей переходов между состояниями процесс по истечении определенного времени приходит в состояние реализации угрозы 6.

На рис. 1 представлен граф состояний марковской модели для сценария 1 преодоления нарушителем рубежей защиты. В данном случае после каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты нарушителем происходит его возврат к исходному состоянию, и все рубежи необходимо преодолевать заново. Поэтому из состояний 2–5, соответствующих попыткам преодоления очередного рубежа защиты, осуществляется либо переход к следующему состоянию (преодоление рубежа защиты), либо к исходному состоянию 1 (непреодоление рубежа защиты).

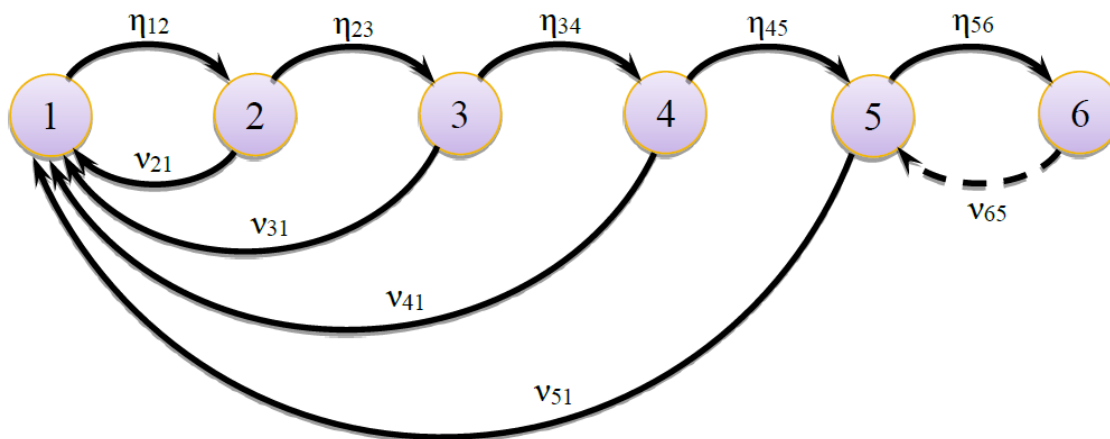


Рис. 1. Граф состояний марковской модели для сценария 1

На рис. 2 показан граф состояний марковской модели для сценария 2 преодоления нарушителем рубежей защиты. В данном случае после каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты нарушителем происходит его возврат к преодолению предыдущего рубежа защиты, и существует возможность возврата к исходному состоянию, когда все рубежи необходимо преодолевать заново. Поэтому из состояний 2–5, соответствующих по-

пыткам преодоления очередного рубежа защиты, осуществляется либо переход к следующему состоянию (преодоление рубежа защиты), либо к предыдущему состоянию (непреодоление рубежа защиты). Приведенный граф состояний соответствует графу состояний процесса гибели и размножения с линейной последовательностью переходов между состояниями, при которых переход из каждого состояния возможен только в предыдущее или последующее состояние. Он аналогичен графу состояний системы массового обслуживания [7, 10], но отличается соотношением между интенсивностями переходов.

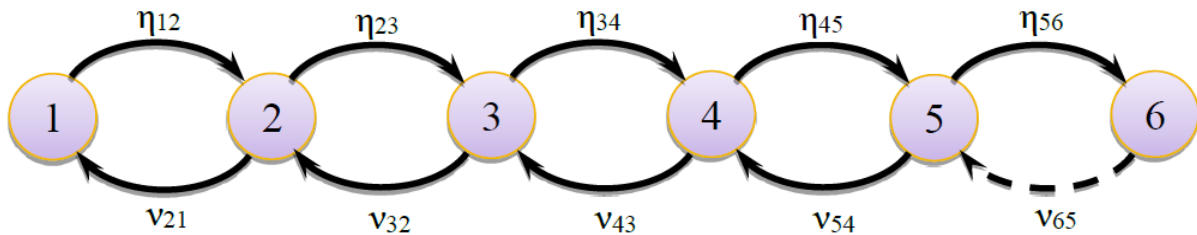


Рис. 2. Граф состояний марковской модели для сценария 2

Граф состояний марковской модели для сценария 3 преодоления нарушителем рубежей защиты включает те же состояния 1–6, что и графы состояний марковских моделей для сценариев 1 и 2, а также дополнительные состояния: 2а – состояние преодоления 1-го рубежа защиты, 3а – состояние преодоления 2-го рубежа защиты, 4а – преодоления 3-го рубежа защиты. Дополнительные состояния процесса преодоления средств защиты описывают случай, когда при преодолении очередного рубежа защиты возврат к предыдущим рубежам и исходному состоянию невозможен. Как и для сценариев 1 и 2, с учетом содержания описываемого процесса преодоления нарушителем рубежей защиты начальным состоянием всегда является состояние возникновения угрозы 1, и при соответствующем задании интенсивностей переходов между состояниями процесс по истечении определенного времени приходит в состояние реализации угрозы 6.

На рис. 3 изображен граф состояний марковской модели для сценария 3 преодоления нарушителем рубежей защиты. В данном случае после каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты нарушителем преодоление предыдущих рубежей защиты ему не требуется, происходит переход к состоянию преодоления предыдущего рубежа защиты, и возврат к исходному состоянию, когда все рубежи необходимо преодолевать заново, невозможен. Поэтому из состояния 2, соответствующего попытке преодоления 1-го рубежа защиты, осуществляется либо переход к следующему состоянию (преодоление

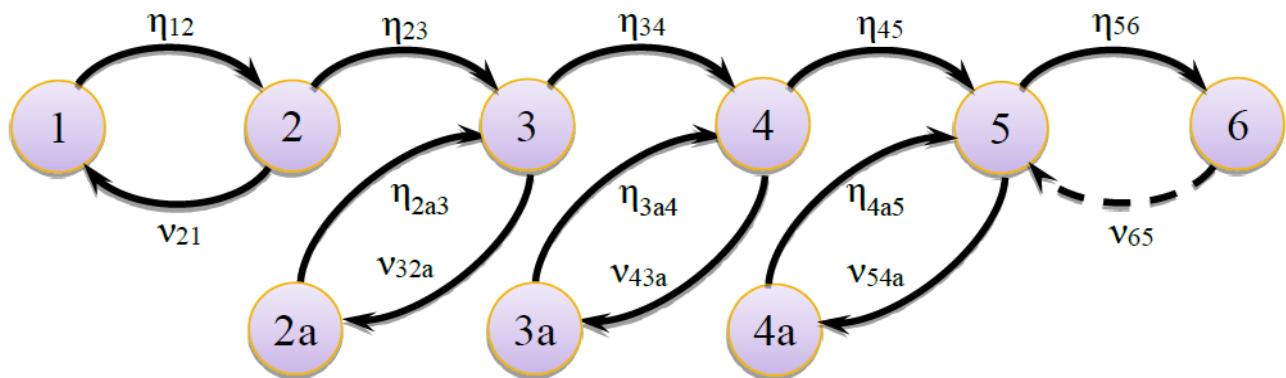


Рис. 3. Граф состояний марковской модели для сценария 3

рубежа защиты), либо к исходному состоянию (непреодоление рубежа защиты), а из состояний 3–5, соответствующих попыткам преодоления 2–4 рубежей защиты, осуществляется либо переход к следующему состоянию (преодоление рубежа защиты), либо к состояниям 2а–4а, соответствующим преодолению 1–3 рубежей защиты (непреодоление рубежа защиты).

На графах состояний, представленных на рис. 1–3, введены следующие интенсивности переходов: η_{12} – интенсивность возникновения угрозы, $\eta_{23} = \eta_{2a3}$ – интенсивность преодоления 1-го рубежа защиты, $\eta_{34} = \eta_{3a4}$ – интенсивность преодоления 2-го рубежа защиты, $\eta_{45} = \eta_{4a5}$ – интенсивность преодоления 3-го рубежа защиты, η_{56} – интенсивность преодоления 4-го рубежа защиты, v_{21} – интенсивность защиты на 1-м рубеже, $v_{32} = v_{31} = v_{32a}$ – интенсивность защиты на 2-м рубеже, $v_{43} = v_{41} = v_{43a}$ – интенсивность защиты на 3-м рубеже, $v_{54} = v_{51} = v_{54a}$ – интенсивность защиты на 4-м рубеже.

Интенсивности возникновения угрозы и преодоления рубежей защиты характеризуют нарушителя, а интенсивности защиты на рубежах защиты – систему защиты информации и используемые в ней средства защиты. В соответствии с принципами описания марковских процессов все интенсивности переходов могут быть связаны с соответствующими средними временами возникновения угроз, преодоления и поддержания рубежей защиты. Состояние 6 является поглощающим.

Во всех графах состояний вводится фиктивный переход из состояния 6 в состояние 5 с интенсивностью переходов $v_{65} = 0$ с тем, чтобы граф состояний был замкнутым и можно было бы описать его системой дифференциальных уравнений стандартного вида [9].

Для состояний 1–6 (включая состояния 2а–4а для сценария 3) вводятся вероятности нахождения процесса преодоления рубежей защиты в каждом состоянии F_i , $i = 1, \dots, 6, 2a, \dots, 4a$, и анализируется их изменение во времени $F_i(t)$. Для вероятностей $F_i(t)$ выполняется условие нормировки $\sum_{i=1}^6 F_i(t) = 1$. Реализации угрозы соответствует преодоление

нарушителем всех четырех рубежей защиты и нахождение процесса преодоления рубежей защиты в состоянии реализации угрозы 6. Поэтому вероятность реализации угрозы в момент времени t определяется вероятностью нахождения процесса преодоления нарушителем рубежей защиты в состоянии 6: $P_{\text{угр}}(t) = F_6(t)$.

Изменение во времени вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$ характеризует изменение во времени защищенности системы. В начальный момент времени $t = 0$ процесс преодоления нарушителем рубежей защиты находится в состоянии 1 и выполняется $P_{\text{угр}}(0) = 0$. С течением времени вероятность реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t) = F_6(t)$ увеличивается и, поскольку состояние 6 является поглощающим, при $t \rightarrow \infty$ достигает значения, равного 1. Скорость нарастания вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$ и интервал времени, в течение которого достигаются ее значения, близкие к 1, характеризуют опасность угрозы для анализируемой информационной системы и ее уязвимость.

Системы дифференциальных уравнений, описывающие графы состояний рассмотренных марковских моделей для базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты, имеют следующий вид:

– для сценария 1

$$\begin{cases} \dot{F}_1(t) = -\eta_{12}F_1(t) + v_{21}F_2(t) + v_{31}F_3(t) + v_{41}F_4(t) + v_{51}F_5(t) \\ \dot{F}_2(t) = -v_{21}F_2(t) + \eta_{12}F_1(t) - \eta_{23}F_2(t) \\ \dot{F}_3(t) = -v_{31}F_3(t) + \eta_{23}F_2(t) - \eta_{34}F_3(t) \\ \dot{F}_4(t) = -v_{41}F_4(t) + \eta_{34}F_3(t) - \eta_{45}F_4(t) \\ \dot{F}_5(t) = -v_{51}F_5(t) + \eta_{45}F_4(t) + v_{65}F_6(t) - \eta_{56}F_5(t) \\ \dot{F}_6(t) = -v_{65}F_6(t) + \eta_{56}F_5(t) \end{cases}; \quad (1)$$

– для сценария 2

$$\begin{cases} \dot{F}_1(t) = -\eta_{12}F_1(t) + \nu_{21}F_2(t) \\ \dot{F}_2(t) = -\nu_{21}F_2(t) + \eta_{12}F_1(t) + \nu_{32}F_3(t) - \eta_{23}F_2(t) \\ \dot{F}_3(t) = -\nu_{32}F_3(t) + \eta_{23}F_2(t) + \nu_{43}F_4(t) - \eta_{34}F_3(t) \\ \dot{F}_4(t) = -\nu_{43}F_4(t) + \eta_{34}F_3(t) + \nu_{54}F_5(t) - \eta_{45}F_4(t) ; \\ \dot{F}_5(t) = -\nu_{54}F_5(t) + \eta_{45}F_4(t) + \nu_{65}F_6(t) - \eta_{56}F_5(t) \\ \dot{F}_6(t) = -\nu_{65}F_6(t) + \eta_{56}F_5(t) \end{cases} \quad (2)$$

– для сценария 3

$$\begin{cases} \dot{F}_1(t) = -\eta_{12}F_1(t) + \nu_{21}F_2(t) \\ \dot{F}_2(t) = -\nu_{21}F_2(t) + \eta_{12}F_1(t) - \eta_{23}F_2(t) \\ \dot{F}_3(t) = -\nu_{32a}F_3(t) + \eta_{23}F_2(t) + \eta_{2a3}F_{2a}(t) - \eta_{34}F_3(t) \\ \dot{F}_4(t) = -\nu_{43a}F_4(t) + \eta_{34}F_3(t) + \eta_{3a4}F_{3a}(t) - \eta_{45}F_4(t) , \\ \dot{F}_5(t) = -\nu_{54a}F_5(t) + \eta_{45}F_4(t) + \eta_{4a5}F_{4a}(t) + \nu_{65}F_6(t) - \eta_{56}F_5(t) . \\ \dot{F}_6(t) = -\nu_{65}F_6(t) + \eta_{56}F_5(t) \\ \dot{F}_{2a}(t) = -\eta_{2a3}F_{2a}(t) + \nu_{32a}F_3(t) \\ \dot{F}_{3a}(t) = -\eta_{3a4}F_{3a}(t) + \nu_{43a}F_4(t) \\ \dot{F}_{4a}(t) = -\eta_{4a5}F_{4a}(t) + \nu_{54a}F_5(t) \end{cases} \quad (3)$$

Начальными условиями для решения систем дифференциальных уравнений (1)–(3) являются начальные значения вероятностей $F_i(0)$, $i=1, \dots, 6, 2a, \dots, 4a$, для момента времени $t = 0$: $F_1(0)=1$, $F_2(0)=F_3(0)=F_4(0)=F_5(0)=F_6(0)=F_{2a}(0)=F_{3a}(0)=F_{4a}(0)=0$.

При задании исходных данных по интенсивностям переходов между состояниями рассмотренных марковских моделей совместное решение систем дифференциальных уравнений (1)–(3) позволяет качественно и количественно исследовать защищенность анализируемой информационной системы при различных базовых сценариях преодоления нарушителем рубежей защиты, описываемых графами состояний, представленными на рис. 1–3.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРЕОДОЛЕНИЯ НАРУШИТЕЛЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Моделирование процесса преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации осуществлялось путем решения систем дифференциальных уравнений (1)–(3). Анализировалось изменение во времени вероятностей реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t) = F_6(t)$. Исходные данные по интенсивности возникновения угрозы, интенсивностям преодоления рубежей защиты и интенсивностям защиты на рубежах защиты задавались одинаковыми для всех рассматриваемых базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты. Это позволяет качественно проанализировать по полученным результатам изменение защищенности информационной системы в диапазоне изменения условий ее информационной безопасности от наилучших до наихудших в соответствии с базовыми сценариями 1–3.

На рис. 4 показаны расчетные зависимости изменения в относительном времени t вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$ для трех рассмотренных базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты. Кривые 1 и 2 соответствуют сценарию 1, кривые 3 и 4 соответствуют сценарию 2, кривые 5 и 6 – сценарию 3. Характеристики средств системы защиты информации во всех случаях задавались одинаковыми, и полагалось: $\nu_{21} = \dots = \nu_{51} = \nu_{32} = \dots = \nu_{54} = \nu_{32a} = \dots = \nu_{54a} = 0.1$. Характеристики нарушителя задавались для двух случаев: кривые 1–3 соответствуют $\eta_{12} = \dots = \eta_{56} = \eta_{2a3} = \dots = \eta_{4a5} = 0.1$, $\nu_{21} = \dots = \nu_{65} = \eta_{32a} = \dots = \eta_{54a} = 0.1$, кривые 4–6 соответствуют $\eta_{12} = \dots = \eta_{56} = \eta_{2a3} = \dots = \eta_{4a5} = 0.1$, $\nu_{21} = \dots = \nu_{65} = \eta_{32a} = \dots = \eta_{54a} = 0.2$.

Приведенные зависимости качественно иллюстрируют изменение защищенности анализируемой информационной системы при переходе от наихудшего для нарушителя сценария 1 к наилучшему для нарушителя сценарию 3 преодолению рубежей защиты, а также при усилении каждого из рубежей защиты. Как и следовало ожидать, для любого момента времени t при фиксированных исходных данных по интенсивностям переходов наибольшее значение вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$ соответствует сценарию 3, наименьшее значение $P_{\text{угр}}(t)$ соответствует сценарию 1, значение $P_{\text{угр}}(t)$ для сценария 2 занимает промежуточное положение между ними. В рассмотренных условиях при переходе от сценария 1 к сценарию 2 и от сценария 2 к сценарию 3 скорость увеличения во времени вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$ увеличивается, и время достижения значений, близких к 1, уменьшается в несколько раз.

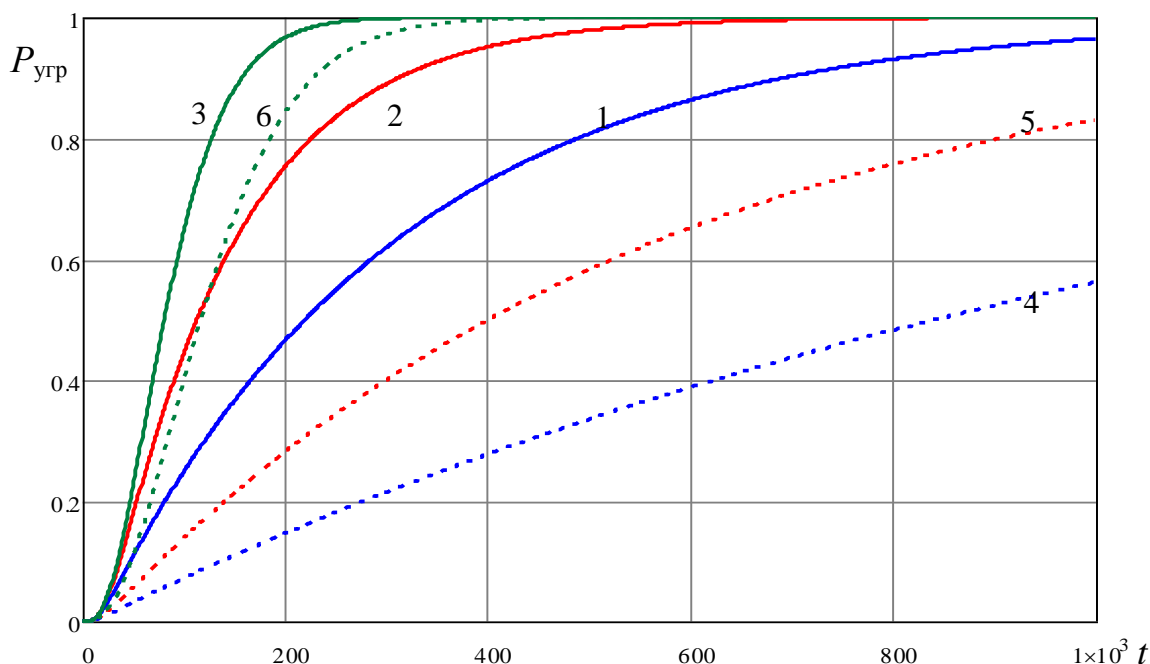


Рис. 4. Изменение во времени вероятности реализации угрозы для трех базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты

Увеличение отношений $v_{i(i-1)}/\eta_{i(i-1)}$ ($v_{i(i-1)a}/\eta_{i(i-1)}$, $v_{i(i-1)a}/\eta_{ia(i-1)}$), $i=2, \dots, 5$ для интенсивностей защиты и преодоления защиты соответствует усилению защиты на каждом рубеже. Это приводит к уменьшению скорости увеличения во времени вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$ и увеличению времени достижения значений, близких к 1. При этом наибольшее влияние на вероятность реализации угрозы усиление защиты на каждом рубеже оказывает при наименее благоприятном для нарушителя сценарии 1 и наименьшее влияние – при наилучшем для нарушителя сценарии 3. При анализе систем массового обслуживания величина, обратная величине $v_{i(i-1)}/\eta_{i(i-1)}$, называется приведенной интенсивностью потока [11]. В рассматриваемом случае изменение отношений $v_{i(i-1)}/\eta_{i(i-1)}$ при усилении защиты на каждом рубеже также может быть интерпретировано как изменение приведенной интенсивности потока попыток преодоления средств защиты.

На практике, как правило, требуется обеспечить малые значения вероятности реализации угроз информационной безопасности, и практический интерес представляют зависимости $P_{\text{угр}}(t)$ в области малых значений вероятности реализации угрозы. На рис. 5 показаны те же, что и на рис. 4, расчетные зависимости изменения в относительном времени t вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$, но в области малых значений ($P_{\text{угр}} < 0.1$). Обозначения кривых – те же, что и на рис. 4.

Приведенные зависимости показывают, что в области малых значений вероятности реализации угрозы сохраняется то же соотношение между значениями $P_{\text{угр}}(t)$ – для любого момента времени t наибольшее значение вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$ соответствует сценарию 3, наименьшее значение $P_{\text{угр}}(t)$ соответствует сценарию 1, значение $P_{\text{угр}}(t)$ для сценария 2 занимает промежуточное положение между ними. Усиление защиты на каждом рубеже приводит к уменьшению скорости увеличения во времени вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}(t)$. В то же время при фиксированных исходных данных по интенсивностям переходов на начальном участке зависимостей $P_{\text{угр}}(t)$ значения вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}$ оказываются близки для всех трех рассмотренных базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты. Это имеет место в области значений $P_{\text{угр}} < 0.001$ и обусловлено тем обстоятельством, что в области малых значений вероятности реализации угрозы ее величина практически определяется успешными однократными попытками преодоления нарушителем рубежей защиты.

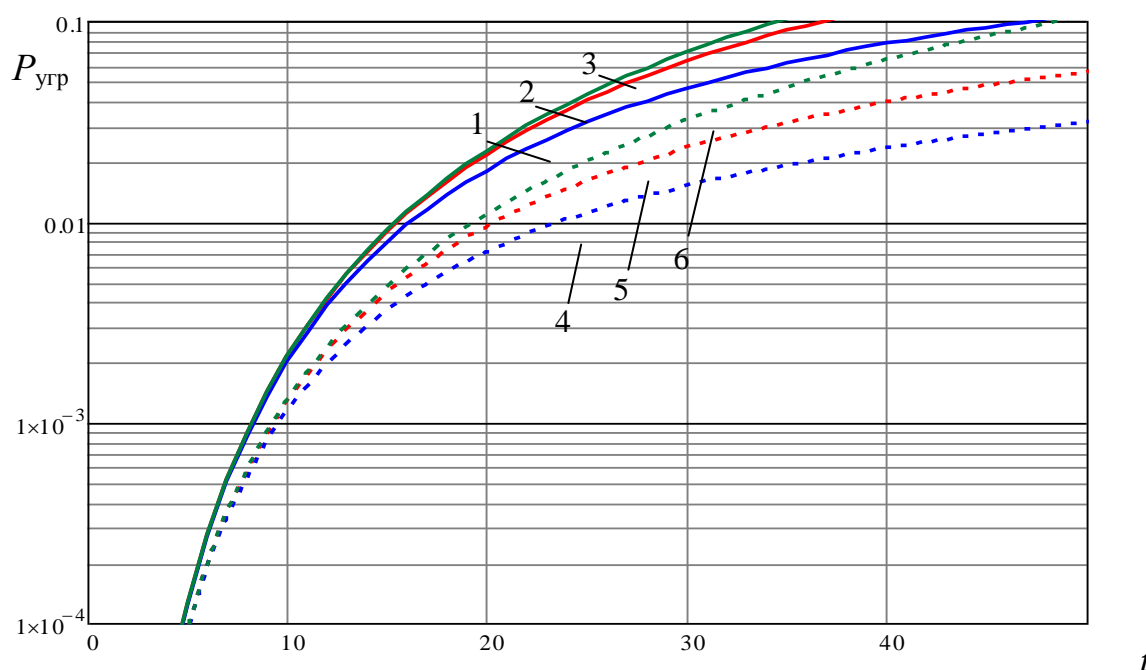


Рис. 5. Изменение во времени вероятности реализации угрозы в области ее малых значений для трех базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты

Полученные результаты показывают важность учета при анализе защищенности информационных систем сценария преодоления нарушителем имеющихся рубежей защиты. Для получения гарантированных оценок уровня защищенности, характеризуемого вероятностью реализации угрозы в заданный момент времени, необходимо ориентироваться на наилучший для нарушителя сценарий преодоления рубежей защиты. Из числа рассмотренных базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты таким сценарием является сценарий 3, когда после каждой неудачной попытки преодоления очередного рубежа защиты преодоление предыдущих рубежей защиты не требуется, происходит переход к состоянию преодоления предыдущего рубежа защиты, и возврат к исходному состоянию, когда все рубежи необходимо преодолевать заново, невозможен. В то же время в практически важной области малых значений вероятности реализации угрозы $P_{\text{угр}}$ (в рассмотренных условиях – при $P_{\text{угр}} < 0.001$) при фиксированных исходных данных по интенсивностям защиты и преодоления защиты для всех сценариев преодоления рубежей защиты (и наилучшего, и наихудшего, и среднего для нарушителя) значения вероятности реализации угрозы оказываются близки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные марковские модели процесса преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации позволяют анализировать изменение во времени вероятностных характеристик защищенности информационной системы для трех базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты. При этом использованная методика построения графов состояний марковских моделей позволяет перейти от базовых сценариев преодоления нарушителем рубежей защиты к комбинированному описанию на их основе различных сценариев преодоления различных рубежей защиты, а также может быть распространена на произвольное число рубежей защиты.

Практическая значимость рассмотренных моделей определяется возможностью их использования для прогнозирования защищенности информационной системы при заданных характеристиках средств системы защиты информации и нарушителя, приведенных к значениям используемых в моделях интенсивностей защиты и преодоления защиты на каждом рубеже. Общий принцип поддержания требуемого уровня защищенности информационных систем в условиях действия угроз информационной безопасности состоит в анализе изменения характеристик защищенности, в том числе вероятностей реализации угроз информационной безопасности, и в поддержании их требуемых (допустимых) значений за счет периодического внесения изменений в параметры средств системы защиты информации [4, 5]. Поэтому прогнозирование изменения во времени вероятности реализации угрозы позволяет определить периодичность управления параметрами используемых средств защиты информации с целью обеспечения требуемого уровня защищенности информационной системы от действующих угроз, например от несанкционированного доступа нарушителя к передаваемой или обрабатываемой критической информации [8, 12]. Для нарушителя, совершающего попытки преодоления средств защиты, изменение их параметров означает возврат к исходному состоянию возникновения угрозы и нулевому значению вероятности реализации угрозы.

Список используемых источников

1. Устинов Г.Н. Основы информационной безопасности систем и сетей связи. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 248 с.
2. Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. – М.: Радио и связь, 2001. – 376 с.
3. Гаценко О.Ю. Защита информации. Основы организационного управления. – СПб.: Издательский дом «Сентябрь», 2001. – 228 с.
4. Удостоверяющие автоматизированные информационные системы и средства. Введение в теорию и практику / С.В. Баушев, И.В. Аристархов, О.Ю. Гаценко и др.; под ред. С.В. Баушева, А.С. Кузьмина. - СПб.: БХВ-Петербург, 2016. - 304 с.
5. Инфокоммуникационные сети: архитектура, технологии, стандартизация / Л.Л. Блахов, В.Г. Игнатенков, В.Е. Кузнецов и др.; под ред. А.А. Сахнина – М.: Радио и связь, 2004. – 208 с.
6. Комашинский В.И., Максимов А.В. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации. Основы моделирования. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 176 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Сов. радио, 1972. – 552 с.
8. Щеглов А.Ю., Щеглов К.А. Защита информации: основы теории – М.: Юрайт, 2018. – 309 с.
9. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

10. *Мальцев Г.Н., Теличко В.В.* Оптимизация состава средств защиты в информационно-управляющей системе с каналами беспроводного доступа на основе графа реализации угроз // Информационно-управляющие системы. – 2008. – № 4. – С.29–33.
11. *Осипов В.Ю., Носаль И.А.* Обоснование периода пересмотра мероприятий по защите информации // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 1. – С.63–69.
12. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

А.А. Абдурахимов,
доктор техн. наук, доцент;
А.А. Авксентьев,
кандидат техн. наук, доцент;
А.А. Сасункевич,
кандидат техн. наук.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КООРДИНАТ МЕСТА УТЕЧКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ИЗ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Методика основывается на использовании телеметрической информации о скорости вращения космического аппарата и параметрах, позволяющих рассчитать момент силы, вырабатываемый исполнительными органами. Методика включает в себя алгоритм расчета координат места пересечения прямой известного направления с элементами гидравлического контура системы терморегулирования. Приведен пример расчета для конкретной кинематической схемы исполнительных органов. Результат может быть полезен при выполнении орбитального ремонта и для устранения предпосылок к появлению утечки на изготавливаемых космических аппаратах.

Ключевые слова: космический аппарат, утечка теплоносителя, исполнительный орган, момент силы, плечо силы.

ВВЕДЕНИЕ

В практике космических полетов встречаются случаи потери герметичности в системе терморегулирования космического аппарата (КА). Находящийся под давлением теплоноситель в течение некоторого времени истекает из образовавшейся щели или отверстия, создавая реактивную силу и в общем случае – возмущающий момент M_B . Система стабилизации КА с помощью исполнительных органов противодействует возмущающему моменту. При этом КА, как правило, не теряет работоспособности и по радиоканалам передает телеметрическую информацию о параметрах своего движения. В состав передаваемой информации входят величины, по которым могут быть рассчитаны управляющие моменты, создаваемые исполнительными органами. При использовании полученной информации вычисляется момент реактивной силы от истекающего теплоносителя. Если в процессе истечения реактивная сила меняет свое направление относительно корпуса КА, то могут быть рассчитаны координаты места утечки. Расчет является верным при отсутствии неточностей в телеметрической информации, а также при справедливости предположения о неизменности координат единственного места утечки.

ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ И СУЩНОСТЬ МЕТОДИКИ

Методика предназначена для расчета координат места утечки теплоносителя из системы терморегулирования КА. Использование результатов расчета существенно облегчает орбитальный ремонт в случае его выполнения. Кроме того, локализация места истечения способствует принятию мер по устранению предпосылок к появлению утечки на изготавливаемых КА.

Сущность методики состоит в расчете момента сил от струи теплоносителя на основе телеметрической информации о работе исполнительных органов и параметрах вращательного движения КА. С использованием рассчитанного момента сил вычисляется положение плоскости, в которой находится прямая, соединяющая центр масс КА и точку приложения воз-

мушающей силы. Направление реактивной силы с уменьшением давления теплоносителя может изменяться. Для двух направлений рассчитывается положение двух плоскостей, в которых находится прямая, «указывающая» на место утечки. Такой прямой является линия пересечения, если она у плоскостей есть.

Опишем содержание методики и ее основные этапы, от которых зависит точность расчета, более подробно. На рис. 1 схематически показан космический аппарат и связанная с КА (в дальнейшем – связанная) система координат $OXYZ$. Ее центр O лежит в центре масс КА, а оси неподвижны относительно элементов конструкции КА и направлены так, как показано на рис. 1. При отсутствии программных разворотов связанные оси направлены по одноименным осям орбитальной системы координат. Пусть средним местом, в котором прикладывается сила \mathbf{F} от истекающего теплоносителя, является точка R . Разложим \mathbf{F} на две составляющие: \mathbf{F}_R , направленную к точке O , и \mathbf{F}_1 , лежащую в перпендикулярной к отрезку RO плоскости.

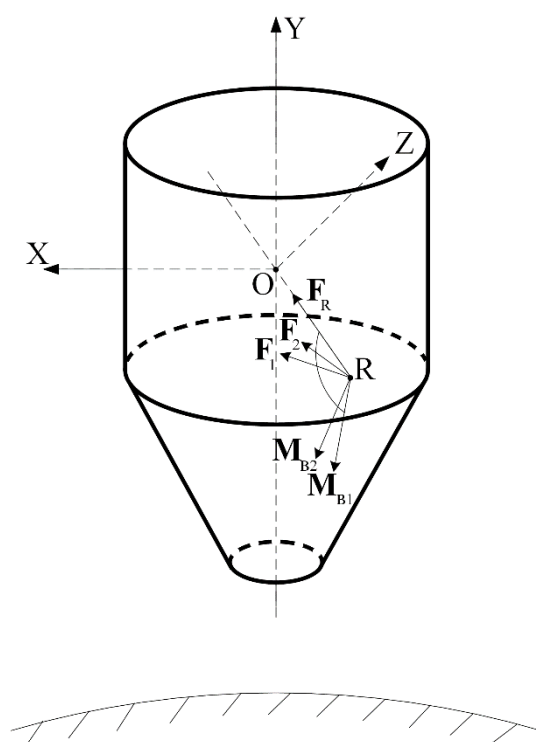


Рис. 1. Силы и моменты сил, действующие на КА при истечении теплоносителя

Составляющая \mathbf{F}_R не создает возмущающего момента, действующего на космический аппарат, поскольку линия ее действия проходит через центр масс КА. Составляющая \mathbf{F}_1 имеет плечо \mathbf{R} от точки O до точки R и создает возмущающий момент

$$\mathbf{M}_{B1} = \mathbf{F}_1 \times \mathbf{R}, \quad (1)$$

где \times – символ векторного произведения. В расчете координат места истечения особое значение имеет перпендикулярность \mathbf{M}_{B1} к \mathbf{R} .

Давление теплоносителя по мере его истечения падает, и появление нового места утечки в таких условиях маловероятно. Поэтому предполагается, что координаты места утечки не изменяются. В отличие от координат направление струи при изменении условий истечения может изменяться. Пусть через некоторое время сила \mathbf{F}_1 изменилась до \mathbf{F}_2 , а соответствующую

щий момент силы M_{B1} изменился до M_{B2} . Моменты M_{B1} и M_{B2} имеют одно и то же плечо R и в соответствии с формулой (1), а также с аналогичным соотношением для F_2 перпендикулярны к R . Тогда для расчета направления R необходимо найти прямую линию, перпендикулярную к M_{B1} и к M_{B2} . Пересечение этой линии с элементами гидравлического контура системы терморегулирования является местом (или местами) предполагаемого расположения точки R . С учетом изложенного методика расчета представляется в виде схемы, изображенной на рис. 2.

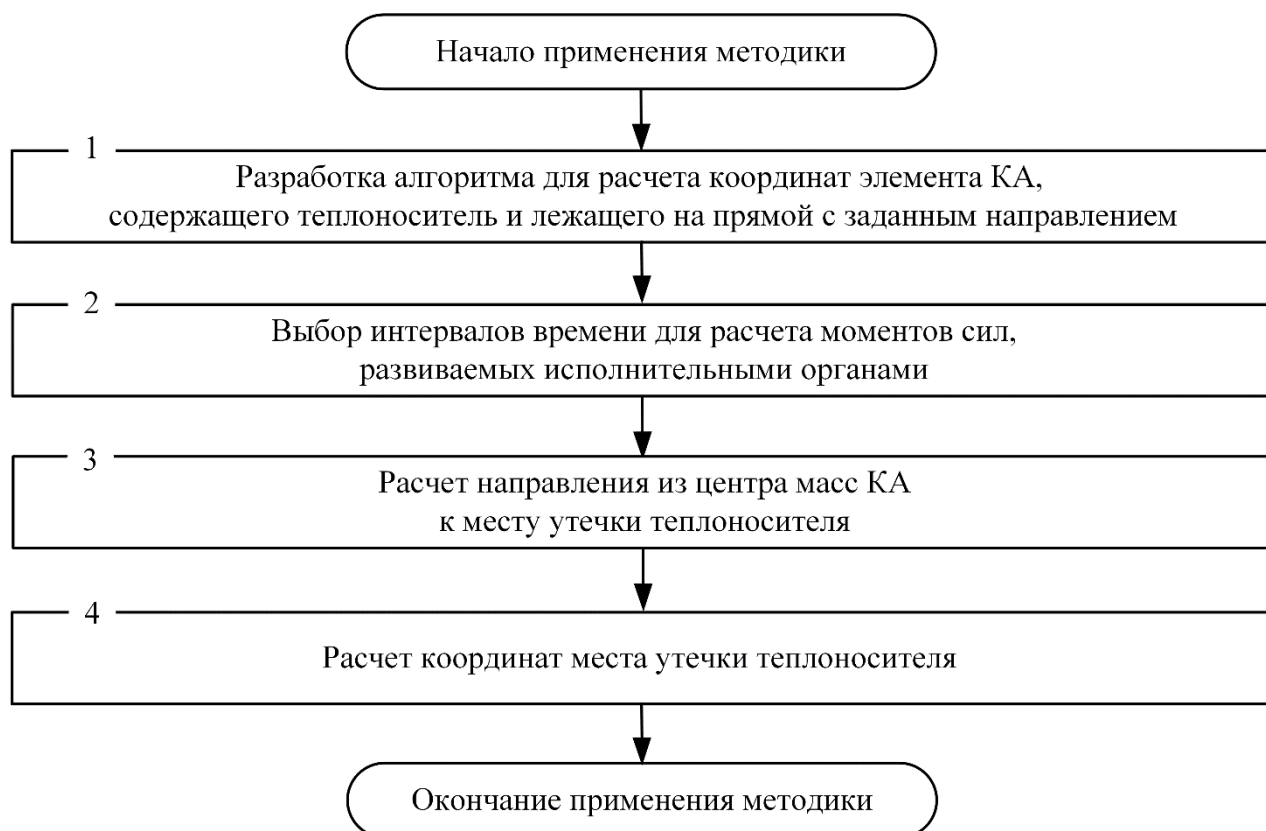


Рис. 2. Схема расчета по предлагаемой методике

В блоке 1 разрабатывается алгоритм для расчета координат точек пересечения прямой, проходящей через центр масс КА, с элементами конструкции, содержащими теплоноситель. Такой алгоритм чаще всего создается с помощью специальных программных средств, например: Blender, Open GL, Solid Work или 3ds max. Их описание не является результатом труда авторов данной статьи и не уложилось бы в ее рамки. Кроме указанных средств для расчета координат искомой точки может быть использован, например алгоритм, в основе которого лежит разбиение КА на достаточно малые кубы с ребрами длиной Δ , направленными по осям OX , OY и OZ связанной системы координат. Величина Δ должна быть меньше, чем минимальное расстояние между стенками элемента с теплоносителем. Вершина одного из кубов размещается в точке O связанной системы координат. Вводится в рассмотрение трехмерная матрица A , элементы которой a_{ijk} ставятся в соответствие вершинам кубов с координатами $[(i-io)\Delta, (j-jo)\Delta, (k-ko)\Delta]$, где i, io, j, jo, k, ko – целые числа. Если вершина с координатами $((i-io)\Delta, (j-jo)\Delta, (k-ko)\Delta)$ попадает в элемент КА с теплоносителем, то элементу матрицы a_{ijk} присваивается значение 1. Если же не попадает, то при-

сваивается значение -1 . Элемент $a_{i_0 j_0 k_0}$ имеет нулевые координаты и соответствует вершине, размещенной в точке O связанной системы координат. Получившаяся матрица позволяет для прямой, проходящей через центр масс O и имеющей известные направляющие косинусы, определить координаты точек входа и выхода из элементов системы терморегулирования.

В блоке 2 выбираются интервалы времени для расчета моментов сил, развиваемых исполнительными органами КА. Будем полагать, что система управления поддерживает близкую к постоянной скорость вращения КА в инерциальном пространстве. Сделанное предположение проверяется по постоянству сигналов, поступающих с датчиков угловых скоростей, и означает, что исполнительные органы создают управляющий момент, уравнивающий момент от истекающего теплоносителя.

Уравнивающий момент создается рядом имеющихся на борту КА исполнительных органов и элементов конструкции. К ним относятся: реактивные двигатели, силовой гироскопический комплекс, блок двигателей-маховиков, электрические и постоянные магниты, гравитационные стабилизаторы, антенны и солнечные батареи. Для расчета уравнивающего момента желательно выбрать интервал времени, на котором работало бы только одно из перечисленных устройств. Тогда ошибки расчета моментов сил от остальных устройств, которые увеличивают общую ошибку, будут нулевыми. В качестве работающего желательно выбрать устройство, управляющий момент от которого может быть рассчитан с минимальными ошибками. Таким устройством обычно является силовой гироскопический комплекс или блок двигателей-маховиков. Вместе с тем, и другие на одном борту не устанавливаются, поскольку повторяют функции друг друга, а их совместное использование приводит к ухудшению массовых и габаритных характеристик КА. Влияние остальных исполнительных органов и устройств на результаты расчетов, как правило, может быть исключено или учтено с приемлемыми ошибками следующим образом.

Реактивные двигатели включаются в работу кратковременно и в основном на участке начального успокоения космического аппарата. Интервалы времени для расчетов выбираются такими, на которых реактивные двигатели не работают.

В системах разгрузки силовых гироскопов и двигателей-маховиков, как правило, применяются магниты. Причем используются электромагниты, поскольку они при управлении не требуют разворотов магнитов и создают больший вращающий момент при равных массах устройств. Создаваемый вращающий момент рассчитывается по формуле [1]

$$\mathbf{M}_{\text{ЭМ}} = \mathbf{L} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

где $\mathbf{M}_{\text{ЭМ}}$ – вращающий момент, Нм;

\mathbf{L} – вектор магнитного момента катушек, установленных по связанным осям, Ам^2 . Для средних по массе и габаритам КА магнитный момент по каждой из осей во включенном состоянии обычно равен сотням Ам^2 . У больших КА – тысячам Ам^2 . Ток в катушках имеет три возможных значения: нулевое и два номинальных, направленных взаимно противоположно;

\mathbf{B} – индукция магнитного поля Земли [2], Тл. Вектор \mathbf{B} измеряется магнитометрами и телеметрируется.

Основным недостатком электромагнитной системы является невозможность создания $\mathbf{M}_{\text{ЭМ}}$ в направлении вектора \mathbf{B} . На практике это приводит к тому, что электромагнитная система временами не может создать вращающий момент в полезном направлении и включается в работу лишь на отдельных интервалах времени. При решении задачи выбора интервала для расчета, как правило, может быть выбран промежуток, на котором электромагнитная си-

стема не работала. Если же это невозможно, то влияние $M_{\text{ЭМ}}$ может быть учтено с использованием зависимости (2).

Кроме сказанного существует причина, по которой допустимо не учитывать моменты сил, создаваемые магнитами, гравитационными стабилизаторами, антеннами и панелями солнечных батарей. Такой причиной является сравнительная малость величин создаваемых ими моментов, которые, как правило, в десятки раз меньше, чем у силовых гироскопов или двигателей-маховиков.

Желательно, чтобы на выбранных для расчетов интервалах времени работали лишь силовые гироскопы или двигатели-маховики. Для примера рассмотрим систему, состоящую из трех парок двухступенных силовых гироскопов, схематически показанную на рис. 3.

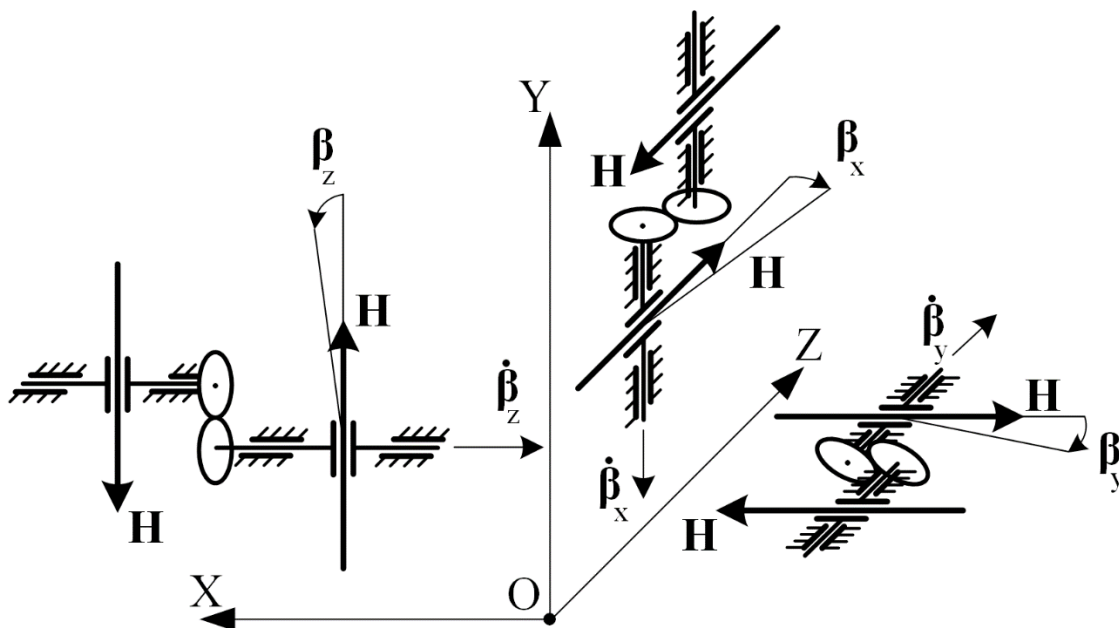


Рис. 3. Схема расположения силовых гироскопов на борту КА

Составляющие управляющего момента, создаваемого такой системой, определяются по формулам [3]:

$$\begin{cases} M_{xCG} = 2H(\beta_x \cos \beta_x + \omega_y \sin \beta_z - \omega_z \sin \beta_y), \\ M_{yCG} = 2H\beta_y \cos \beta_y + \omega_z \sin \beta_x - \omega_x \sin \beta_z, \\ M_{zCG} = 2H\beta_z \cos \beta_z + \omega_x \sin \beta_y - \omega_y \sin \beta_x, \end{cases} \quad (3)$$

где M_{xCG} , M_{yCG} , M_{zCG} – составляющие управляющего момента сил в проекциях на оси связанной системы координат, Нм;

H – кинетический момент одного ротора, Нмс. Является постоянной величиной;

$\beta_x, \beta_y, \beta_z$ – скорости поворотов роторов по осям управления, рад/с;

$\beta_x, \beta_y, \beta_z$ – углы разворотов роторов относительно показанного на рис. 3 исходного положения;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора абсолютной скорости вращения КА на связанные оси, рад/с.

В таких системах обычно телеметрируются значения углов $\beta_x, \beta_y, \beta_z$. При условии привязки ко времени $\beta_x(t), \beta_y(t), \beta_z(t)$ позволяют вычислить $M_{xCG}, M_{yCG}, M_{zCG}$. Телеметрическая информация поступает с датчиков углов, установленных по осям управления, и в силу дискретной природы датчиков может быть представлена ступенчатыми графиками. Типичный вид таких графиков показан на рис. 4.

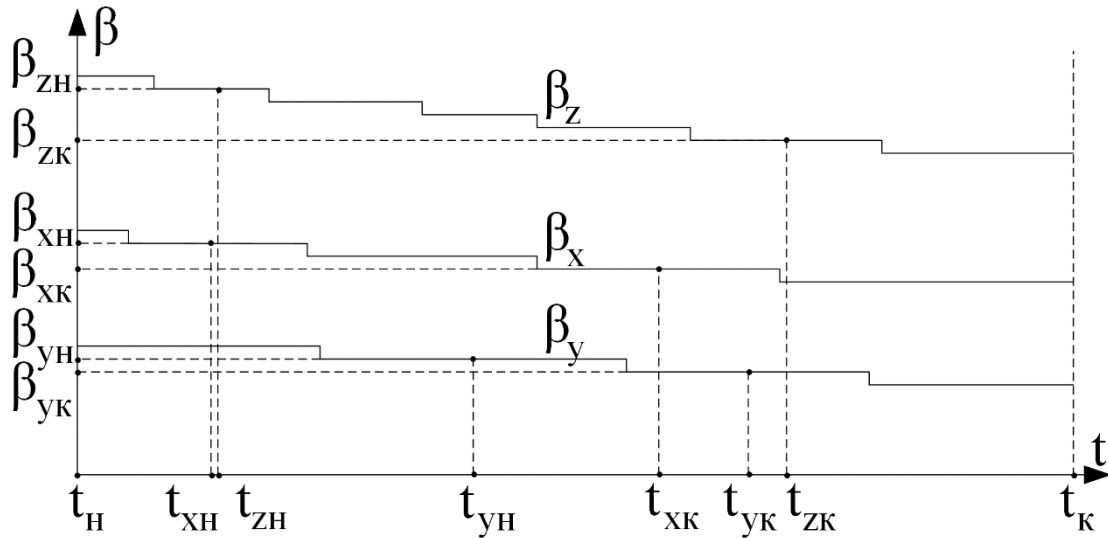


Рис. 4. Вид графиков $\beta_x(t), \beta_y(t), \beta_z(t)$, построенных по телеметрической информации

Управляющие моменты рассчитываются при допущении о постоянстве скоростей $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ на выбираемых интервалах времени. Это означает, что углы $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ меняются линейно и вследствие дискретности датчиков лишь в середине интервалов постоянства приближаются к истинным значениям, а в моменты перехода от одного уровня сигнала к соседнему имеют наибольшие отличия от истинных. Поэтому на интервале (t_H, t_K) для усреднения по каждому из углов выбираются значения, лежащие в середине интервалов постоянства: $\beta_{xH} = \beta_x(t_{xH}), \beta_{xK} = \beta_x(t_{xK}), \beta_{yH} = \beta_y(t_{yH}), \beta_{yK} = \beta_y(t_{yK}), \beta_{zH} = \beta_z(t_{zH}), \beta_{zK} = \beta_z(t_{zK})$. Для усреднения ошибок начальные и конечные значения, например, β_{zH} и β_{zK} желательно удалить друг от друга в пределах интервала (t_H, t_K) . Получающееся размещение начальных и конечных точек показано на рис. 4.

В блоке 3 производится расчет орта R_0 , направленного из центра масс КА к месту утечки теплоносителя. Для нахождения R_0 выбираются два интервала (t_H, t_K) и для каждого из них рассчитываются составляющие $M_{xCG}, M_{yCG}, M_{zCG}$. При этом в зависимостях (3) мгновенные значения заменяются усредненными:

$$\begin{cases} M_{xCG} = 2H(\beta_{xcp} \cos \beta_{xcp} + \omega_y \sin \beta_{zcp} - \omega_z \sin \beta_{ycp}), \\ M_{yCG} = 2H(\beta_{ycp} \cos \beta_{ycp} + \omega_z \sin \beta_{xcp} - \omega_x \sin \beta_{zcp}), \\ M_{zCG} = 2H(\beta_{zcp} \cos \beta_{zcp} + \omega_x \sin \beta_{ycp} - \omega_y \sin \beta_{xcp}). \end{cases} \quad (4)$$

Входящие в уравнения (4) усредненные значения вычисляются по соотношениям:

$$\begin{aligned} \beta_{xcp} &= \frac{\beta_{xk} - \beta_{xn}}{t_{xk} - t_{xn}}, & \beta_{ycp} &= \frac{\beta_{yk} - \beta_{yn}}{t_{yk} - t_{yn}}, & \beta_{zcp} &= \frac{\beta_{zk} - \beta_{zn}}{t_{zk} - t_{zn}}, \\ \beta_{xcp} &= \frac{\beta_{xk} + \beta_{xn}}{2}, & \beta_{ycp} &= \frac{\beta_{yk} + \beta_{yn}}{2}, & \beta_{zcp} &= \frac{\beta_{zk} + \beta_{zn}}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Составляющие M_{xCG} , M_{yCG} , M_{zCG} образуют вектор управляющего момента, который влияет на вращательное движение КА, описываемое динамическими уравнениями Эйлера [4]:

$$\begin{cases} J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y)\omega_y \omega_z = M_x, \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z)\omega_z \omega_x = M_y, \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x)\omega_x \omega_y = M_z, \end{cases} \quad (6)$$

где J_x , J_y , J_z – моменты инерции КА относительно связанных осей, кг·м²;

$\frac{d\omega_x}{dt}$, $\frac{d\omega_y}{dt}$, $\frac{d\omega_z}{dt}$ – проекции вектора вращательного ускорения КА на связанные оси, рад/с;

M_x , M_y , M_z – проекции вектора момента активных сил на связанные оси, Н·м. Для первых интервалов времени, на которых действуют только $\mathbf{M}_{B1} = (M_{xB1}, M_{yB1}, M_{zB1})$ и $\mathbf{M}_{CG} = (M_{xCG}, M_{yCG}, M_{zCG})$:

$$M_x = M_{xB1} + M_{xCG}, \quad M_y = M_{yB1} + M_{yCG}, \quad M_z = M_{zB1} + M_{zCG}. \quad (7)$$

Если $\omega_x(t)$, $\omega_y(t)$, $\omega_z(t)$ телеметрируются, то $\frac{d\omega_x}{dt}$, $\frac{d\omega_y}{dt}$, $\frac{d\omega_z}{dt}$ могут быть определены, и из выражения (6) с учетом формулы (5) рассчитывается \mathbf{M}_{B1} :

$$\begin{cases} M_{xB1} = J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y)\omega_y \omega_z - M_{xCG}, \\ M_{yB1} = J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z)\omega_z \omega_x - M_{yCG}, \\ M_{zB1} = J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x)\omega_x \omega_y - M_{zCG}. \end{cases} \quad (8)$$

Затем выбирается второй интервал (t_h, t_k) и для него аналогично \mathbf{M}_{B1} рассчитывается \mathbf{M}_{B2} .

Поскольку $\mathbf{R}_0 \perp \mathbf{M}_{B1}$ и $\mathbf{R}_0 \perp \mathbf{M}_{B2}$, то

$$\mathbf{R}_0 = \frac{\mathbf{M}_{B2} \times \mathbf{M}_{B1}}{|\mathbf{M}_{B2} \times \mathbf{M}_{B1}|}. \quad (9)$$

В блоке 4 производится расчет координат места утечки теплоносителя. Для этого используется алгоритм, разработанный в блоке 1. Если алгоритм содержит трехмерное изображение КА, то, как правило, допускается добавление в него прямой с направлением \mathbf{R}_0 , проходящей через центр масс КА. В результате зрительно отображаются места пересечения прямой с элементами конструкции, содержащими теплоноситель. Они являются местами расчетного расположения места утечки теплоносителя.

Если используется алгоритм с разбиением конструкции на кубы, описанный в данной статье, то с некоторым шагом перебираются точки, лежащие на найденной прямой. Чтобы не пропустить возможные места истечения, шаг перебора $\Delta_{ш}$ выбирается меньшим, чем минимальное расстояние между стенками деталей конструкции с теплоносителем.

Затем производится поочередный анализ попадания точек с координатами $\Delta_{ш}\mathbf{R}_0\mathbf{n}$, где $\mathbf{n} = \overline{-\mathbf{m}, \mathbf{m}}$, в детали с теплоносителем. Значение m выбирается из соотношения: $m = R_{\max} / \Delta_{ш} + 1$, где R_{\max} – расстояние от центра масс КА до наиболее удаленной детали с теплоносителем. Во время перебора анализируется знак элемента матрицы \mathbf{A} , соответствующего ближайшей из вершин, вписанных в конструкцию КА кубов. Если знак меняется с «-» на «+», то происходит вход точки в элемент конструкции с теплоносителем, а если – с «+» на «-», то – выход. В любом из этих случаев исследуемая точка является расчетным местом утечки теплоносителя.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Пусть во время утечки составляющие скорости вращения космического аппарата $\omega_x = \omega_y = 0$, а $\omega_z = 8,73 \cdot 10^{-4}$ 1/с.

Пусть, кроме того, на основании полученной телеметрической информации выбраны два интервала, на первом из которых возмущающий момент $\mathbf{M}_{в1}$, а на втором – $\mathbf{M}_{в2}$, уравновешивался моментом только от силовых гироскопов.

Значения углов и соответствующих им моментов времени, показанных на рис. 4, выбраны и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения углов и соответствующих им моментов времени

Порядковый номер интервала	$\beta_{хн}(t_{хн})$ рад(с)	$\beta_{хк}(t_{хк})$ рад(с)	$\beta_{ун}(t_{ун})$ рад(с)	$\beta_{ук}(t_{ук})$ рад(с)	$\beta_{зн}(t_{зн})$ рад(с)	$\beta_{зк}(t_{зк})$ рад(с)
1	0,0169(24)	0,0180(74)	-0,0051(26)	-0,0054(68)	0,0148(25)	0,0157(70)
2	0,0465(1807)	0,0469(1849)	-0,0073(1805)	-0,0074(1851)	0,0390(1804)	0,0393(1855)

Полагая, что все указанные значения не содержат ошибок, необходимо рассчитать орт прямой, проходящей через центр масс КА и место утечки теплоносителя.

Проведем расчет с использованием описанной методики. Если $\omega_x = \omega_y = 0$; $\omega_z = \text{const}$, то моменты сил, входящие в левые части уравнений (6) равны нулю. Тогда с учетом выражений (4) и (5) из соотношений (8) для первого интервала получаем

$$\begin{cases} M_{x_{в1}} = -2H \left(\left(\frac{\beta_{xк} - \beta_{xн}}{t_{xк} - t_{xн}} \right) \cos \left(\frac{\beta_{xк} + \beta_{xн}}{2} \right) - \omega_z \sin \left(\frac{\beta_{yк} + \beta_{yн}}{2} \right) \right), \\ M_{y_{в1}} = -2H \left(\left(\frac{\beta_{yк} - \beta_{yн}}{t_{yк} - t_{yн}} \right) \cos \left(\frac{\beta_{yк} + \beta_{yн}}{2} \right) + \omega_z \sin \left(\frac{\beta_{xк} + \beta_{xн}}{2} \right) \right), \\ M_{z_{в1}} = -2H \left(\frac{\beta_{zк} - \beta_{zн}}{t_{zк} - t_{zн}} \right) \cos \left(\frac{\beta_{zк} + \beta_{zн}}{2} \right). \end{cases} \quad (10)$$

Подставив в уравнения (10) значения из табл. 1, рассчитываем для первого интервала $\mathbf{M}_{в1} = (-2H \cdot 1,7413 \cdot 10^{-5}, 2H \cdot 2,2376 \cdot 10^{-5}, -2H \cdot 1,9998 \cdot 10^{-5})$. Аналогично для второго интервала получаем $\mathbf{M}_{в2} = (-2H \cdot 0,3097 \cdot 10^{-5}, 2H \cdot 4,2928 \cdot 10^{-5}, -2H \cdot 0,5878 \cdot 10^{-5})$. Подставив значения $\mathbf{M}_{в1}$ и $\mathbf{M}_{в2}$ в выражение (9), находим орт искомого направления:

$$\mathbf{R}_0 = (-0,7306, 0,0406, 0,6816).$$

Заметим, что заданное в примере воздействие на КА может оказать утечка, происходящая из места, расположенного как в положительном, так и в отрицательном по отношению к \mathbf{R}_0 направлении. Поэтому необходимо провести поиск мест пересечения рассчитанной прямой с элементами конструкции, содержащими теплоноситель, не только в направлении \mathbf{R}_0 , но и в направлении $-\mathbf{R}_0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика расчета координат места утечки теплоносителя из системы терморегулирования КА. Оригинальность методики основывается на предположении об изменении направления истечения теплоносителя при неизменности места истечения. Изменение направления истечения объясняется изменением формы щели под действием падающего давления теплоносителя. Неизменность места истечения объясняется тем, что появление нового места истечения в условиях уменьшающегося давления маловероятно. Без указанных предположений область истечения локализуется до перпендикулярной к $\mathbf{M}_{в1}$ плоскости. В отличие от такого решения предлагаемая методика сужает область поиска места истечения до отдельных точек, расчет координат которых описан в разработанной методике.

Результат может быть полезен при выполнении орбитального ремонта КА и для устранения предпосылок к появлению утечки на изготавливаемых КА.

Список используемых источников

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики: в 2 т. – М.: Наука, 1965. – Т. 2. – 366 с.
2. Васильев В.Н. Системы ориентации космических аппаратов. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
3. Петрищев В.Ф. Элементы теории гироскопа и его применение для управления космическими аппаратами: учеб. пособие. – Самар. гос. аэрокосм. ун-т Самара, 2004. – 68 с.
4. Бутенин Н.В., Лунц Я.Р., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики: в 2 т. – М.: Наука, 1979. – Т. 2. – 544 с.

Д.Р. Абсалямов,
доктор техн. наук, доцент;
Р.Р. Хальметов;
Д.В. Шаповалов,
кандидат техн. наук

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ГЕЛИОСИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье показаны преимущества гелиосистемы теплоснабжения в сравнении с традиционными системами теплогенерации и теплоснабжения. Представлены перспективные схемные решения по совместному производству тепловой и электрической энергии. Обоснована необходимость применения новых схемных решений для достижения энергоэффективного теплоснабжения в специальных технических системах наземных комплексов. Показана целесообразность применения схемных решений с альтернативными, возобновляемыми и низкопотенциальными источниками тепловой энергии. Продемонстрирована возможность производства электроэнергии за счет комплексного использования солнечной, ветровой и штатной систем энергоснабжения. Подтверждена актуальность решаемых задач для снабжения всеми видами энергии малочисленных, автономных воинских подразделений, в том числе и подразделений КВ ВКС, расквартированных в арктических районах полярного круга, прибрежного шельфа вдоль Северного морского пути РФ, измерительных средств ИКП 1 ГИК МО РФ (полигон «Кура») и др.

Ключевые слова: гелиосистемы теплоснабжения, теплоснабжение, солнечная энергия, регулируемые параметры, солнечно-аккумуляционное теплоснабжение.

ВВЕДЕНИЕ

Масштабы и темпы вовлечения в энергетический комплекс специальных технических систем (СТС) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – солнца, термальных вод, ветра и т. п. – зависят не только от правильного методического подхода к оценке эффективности их использования, но и в значительной мере – от решения поставленных технических задач их использования. В последние годы в результате решения задачи по возобновлению и развитию военного присутствия в районах Арктики, полярного круга, прибрежного шельфа вдоль Северного морского пути РФ измерительных средств ИКП 1 ГИК МО РФ (полигон «Кура») возникают проблемы, связанные с энергообеспечением малочисленных, автономных воинских подразделений, в том числе и подразделений КВ ВКС, расквартированных в указанных районах. Кроме того, вследствие развития стратегии военного присутствия и принуждения к миру в странах Ближнего Востока повышаются требования к системе энергоснабжения объектов ВКС по автономности и энергоэффективности.

Рассмотрим основные подходы алгоритмов оценки целесообразности использования ВИЭ на примере солнечной энергии (СЭ) для систем жизнеобеспечения, таких как системы электроснабжения, горячего водоснабжения и отопления специальных технических систем.

Освоение новых территорий и обеспечение присутствия на них малочисленных воинских подразделений, подразделений, эксплуатирующих объекты наземной космической инфраструктуры в отдельных труднодоступных районах размещения, – всё это приводит к появлению особых требований к системам их энергоснабжения. Важную роль при поддержании топливно-энергетического баланса рассматриваемых групп потребителей играют ВИЭ. Применение ВИЭ в сочетании с системами гарантированного электропитания (СГЭП) позволяет повысить надежность систем электроснабжения (СЭС), а утилизация тепловых выбросов в

окружающую среду от дизелей СГЭП – решать еще и задачу теплоснабжения обитаемых модулей. Использование ВИЭ и в частности СЭ позитивно сказывается и на решении проблем охраны окружающей среды. Это подтверждается и сокращением масштабов использования традиционных видов топлива, и снижением объема вредных выбросов и тепловых излучений. Использование солнечной энергии имеет очевидные преимущества как в ближайшие годы, так и в долгосрочной перспективе, поскольку солнечная энергия характеризуется неистощаемостью, большими потенциальными ресурсами, экологичностью и чистотой.

Поток тепловой энергии на земной поверхности достигает [5, 7] $1,5 \cdot 10^{28}$ МДж/год, но при этом плотность излучения сравнительно невелика. Так, на границе с атмосферой она составляет 1353 Вт/м², а на поверхности Земли – в среднем 240 Вт/м² [5]. Плотность теплового излучения СЭ во многом является функцией, зависящей от времени суток и года, географического расположения, условий климата. В перспективных для использования энергии Солнца районах [5, 7] (в районах размещения наземных комплексов) приход суммарной радиации на горизонтальную поверхность колеблется от 1000 до 2000 кВт*ч/(год*м²). Число часов солнечного сияния на полосе земной поверхности от европейской части России до Дальнего Востока составляет 1800–2500 ч.

Наиболее доступное в технической реализации направление использования СЭ в системах жизнеобеспечения наземных комплексов – это теплоснабжение контуров горячего водоснабжения и отопления. Несмотря на доступность и простоту реализации способов использования СЭ, возникает вопрос о количественных соотношениях задействования в схемных решениях энергообеспечения традиционных систем теплогенерации и альтернативных на основе СЭ.

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ГЕЛИОСИСТЕМ К ПРИМЕНЕНИЮ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Использованию ВИЭ в последние годы уделяется значительное внимание в рамках национальных программ многих стран, так как преследуется цель – уйти от расходования дорогих природных углеводородов, добытых из недр земли. Расчеты специалистов в области энергоресурсосбережения показали, что наряду с ростом энергоемкости всех отраслей современного общества, в 2020–2022 годах применение солнечной энергии позволит высвободить до 35 млн. тонн условного топлива в год [1, 5].

Созданием и внедрением новых схемных решений отопления и горячего водоснабжения сооружений, эксплуатируемых в климатических условиях Севера, заняты многие энергетические компании России, Канады, Голландии, Швеции и других стран северных и арктических регионов. Невысокая солнечная активность и условия низких температур в указанных регионах предполагают отказ от традиционных однополюсных схемных решений энергообеспечения. Приоритетными становятся более эффективные – комбинированные или поливалентные системы трансформации потенциальной энергии ресурсов в энергию полезного потребления. Повышение эффективности в теплоснабжении обитаемых и технологических сооружений предполагается осуществить за счет совместного использования энергии двигателей внутреннего сгорания, низкопотенциального тепла технологического оборудования, систем с солнечными коллекторами и устройств аккумулирования солнечной энергии, полученной в дневное время, так называемых гелиосистем теплоснабжения (ГСТС) в специально спроектированных строительных конструкциях.

На сегодняшний день в России и за рубежом накоплен громадный теоретический и практический опыт, с помощью которого можно дать оценку различным комбинациям поливалентных схемных решений на эффективность применения ГСТС в целом [2, 5]. Технико-экономический анализ, проведенный по материалам ряда источников [2, 5], показал, что

ГСТС присущи нестабильные процессы приема и трансляции СЭ. Поэтому эффективность комплексной работы всех источников, задействованных в ГСТС, в большей мере зависит от степени автоматизации и применения элементов искусственного интеллекта в системе управления, способного обеспечить поддержку в принятии решений по оптимальному задействованию всех имеющихся источников, учитывая пределы регулирования рабочих параметров и имеющиеся ограничения. Также опыт показывает, что заметного снижения затрат на эксплуатацию и автоматизацию ГСТС можно достичь путем регулирования числа абонентов, их перераспределением между соседними ГСТС и уменьшением или укрупнением самих геосистем. Одна из разработанных структурных схем такой ГСТС, так называемой солнечно-топливной котельной, представлена на рис. 1.

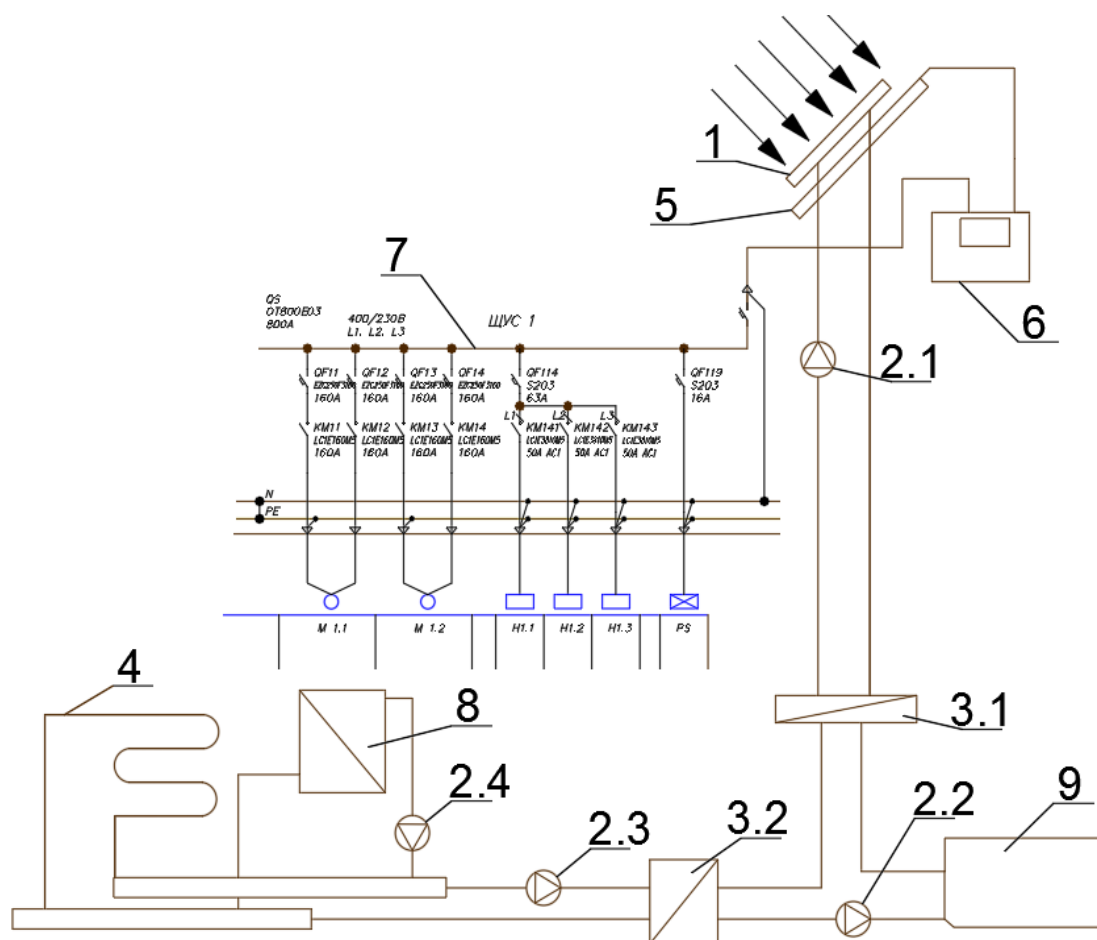


Рис. 1. Комбинированная геосистема теплоснабжения

Накопление тепла в баке-накопителе (БН) 9 происходит от трех источников теплоснабжения: геосистемы, теплового насоса и системы охлаждения дизельной электростанции (ДЭС).

Энергия Солнца в виде тепловой энергии поступает в БН (9). Включение циркуляционного насоса геосистемы 2.1 происходит, если температура на поверхности теплоприемника 1 превышает температуру воды в БН 9. Отключение геосистемы предусмотрено при значениях температур не ниже чем в БН 9.

Энергия низкопотенциальных источников отбирается приемником тепла теплового насоса (ТН) 4 и циркуляционным насосом 2.3, сбрасывается через теплообменник 3.2 в БН 9. Отключение контура ТН предусмотрено при значении температуры в БН 9 выше установленной на конденсаторе ТН.

Отбор тепла от системы охлаждения ДЭС 8 происходит в периоды включения в работу ДЭС – в периоды затенения теплоприемника 1. Таким образом, ДЭС вырабатывает и тепловую энергию, и электроэнергию, потребляя дизельное топливо.

В солнечную погоду включается в процесс выработки электроэнергии солнечная батарея 5. Через аккумуляторные батареи и инвертор 6 электроэнергия поступает в распределительную сеть электроэнергии 7.

Рассматриваемая схема позволяет осуществить построение коллекторных полей теплоприемников за счет их модульного исполнения, при этом оказывая влияние на величину потерь и на эффективность солнечных коллекторов, управляя распределением теплоносителя в элементах контура.

Представленное комбинированное схемное решение ГСТЭС со всеми очевидными преимуществами имеет и очевидную проблему – как распределить нагрузку на генерирующие тепловую и электрическую энергии установки, чтобы обеспечить:

- 1) надежность поставки потребителям СТС ОНКИ электрической и тепловой энергии, которая будет не ниже требуемой;
- 2) минимальную удельную стоимость единицы вырабатываемых мощностей ГСТЭС;
- 3) равномерность расходования технического ресурса генерирующих установок;
- 4) учет при работе ГСТЭС сведений о ее текущем техническом состоянии и остаточном ресурсе элементов.

Решение этой группы задач, актуальных при создании ГСТЭС, связано с противоречивыми требованиями: с одной стороны, необходимо обеспечивать создание системы управления и эксплуатации комплексной, отвечающей современным требованиям по надежности и себестоимости системы тепло- и энергоснабжения, а с другой стороны, ГСТЭС нового поколения должна отвечать современным технико-экономическими требованиям по мобильности, автономности и энергоэффективности как самой ГСТЭС, так и обеспечиваемых ею СТС систем жизнеобеспечения ОНКИ, в частности систем, обеспечивающих параметры микроклимата.

Исходя из решаемых задач и потребностей в энергоресурсах обеспечиваемого подразделения, ГСТЭС можно подразделять на конфигурации исполнений в зависимости от величины удельной энерговооруженности объема обитаемых и технологических помещений (q , Вт/м²), что позволит классифицировать источники по составу в зависимости от мощности [6]:

- при $q \leq 50$ кВт*ч/м² – класс А – один источник;
- при $46 \leq q \leq 75$ кВт*ч /м² – класс В – один основной, один резервный источники;
- при $76 \leq q \leq 95$ кВт*ч /м² – класс С – два основных и один резервный источники;
- при $76 \leq q$ кВт/м² – класс D – два основных и один резервный источники.

Представленная классификация энергоемкости потребителей позволяет определять количество источников согласно схеме, представленной на рис. 1. Данное правило назначения того или иного источника энергии работ существует для идеальных условий стационарного размещения ГСТЭС. В реальных условиях приходится оперировать имеющимися ВИЭ. Поэтому становится актуальной следующая постановка задачи.

ПОСТАНОВКА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ГСТЭС И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ГСТЭС

Дано: структурная схема комплексной ГСТЭС в составе гелиосистемы электроснабжения, ветрогенераторной установки, аккумуляторных батарей системы бесперебойного питания; воздушные линии электропередач и дизельная электростанция, их рабочие характеристики (N – потребность в электроэнергии, кВт; q – удельный тепловой поток, кВт/м²; Q – суммарные тепловые излучения, кВт; Δt_B – перепад температур в теплоприемнике, °С); модели энергоресурсопотребления СТС СЖО.

Требуется: для оптимального применения по назначению энергосистемы найти вектор управляющих воздействий на элементы ГСТЭС k^* (1), координатами которого приняты коэффициенты применения гелиосистемы электроснабжения k_1 и ветрогенераторной установки k_2 , обеспечивающие минимально возможное потребление топлива традиционными источниками энергии (дизель-генераторами) и обращение к госсетям. Тогда

$$\vec{k}^* = \arg \min_{\vec{k} \in D} \{E_1(\vec{k})\}; \vec{k}^T = [k_1, k_2]; \quad (1)$$

где

$$E_1(k_1, k_2) = Q_T(k_1, k_2) C_{ДТ}/C_{УТ} = \vec{r}^T \vec{t} + \vec{t}^T R \vec{t} + \vec{a}^T \vec{k} + \vec{k}^T A \vec{k} \text{ кг.у.т./сут.} \quad (2)$$

В этой формуле E_1 – функция энергоресурсопотребления ГСТЭС, приведенная к расходу условного топлива. Кроме того,

$$\vec{r} = [r_1, r_2]^T; \vec{a} = [a_1, a_2]^T; R = \begin{bmatrix} r_3 & r_5/2 \\ r_5/2 & r_4 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \text{ – коэффициенты при линейной}$$

и степенной частях функции энергоресурсопотребления (2); D – эксплуатационные ограничения и ограничения по затратам на модернизацию ГСТЭС.

Решение. Данная постановка задачи позволяет прибегнуть к следующему типу решения задач: задач выбора оптимального сочетания вклада существующих ВИЭ при заданных ограничениях по управляющим воздействиям k_1 и k_2 . В этом случае целесообразно использовать широко известный метод неопределенных множителей Лагранжа [3–5].

Для функции (1) при заданных ограничениях D функция Лагранжа примет вид

$$L(k_1, k_2) = \vec{a} \vec{k} + \vec{k}^T A \vec{k} + \lambda \vec{b}^T \vec{k} - \lambda C_M = \vec{k}^T A \vec{k} + (\vec{a} + \lambda \vec{b}^T) \vec{k} - \lambda C_M. \quad (3)$$

В данном выражении λ – множитель Лагранжа; $\vec{b} = [1, \gamma]^T$ – вектор угловых коэффициентов изокосты. Для нахождения точки экстремума – минимального энергоресурсопотребления M_0 (k_1^0, k_2^0, λ^0) для модели (3) решена система уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \vec{k}} = 2A\vec{k} + \vec{a} + \lambda \vec{b} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = k_1 + \gamma k_2 - C_M = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Для исследования решения (4) на условный экстремум определялся знак определителя матрицы H порядка $m+n$ ($1+2$; $m=1$ – число ограничений; $n=2$ – число переменных):

$$H = \begin{bmatrix} 0 & G \\ G^T & L \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где

$$G^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial k_1}(M_0) \\ \frac{\partial g}{\partial k_2}(M_0) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial k_1^2}(M_0) & \frac{\partial^2 L}{\partial k_2 \partial k_1}(M_0) \\ \frac{\partial^2 L}{\partial k_2 \partial k_1}(M_0) & \frac{\partial^2 L}{\partial k_2^2}(M_0) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

При совпадении знака определителя H со знаком $(-1)^m = -1$ точка M_0 будет являться точкой условного минимума функции $E_1(k_1, k_2)$, что составляет достаточное условие условного экстремума.

Таблица 1
Результаты решения оптимизационной задачи для ГСТЭС при N=245 кВт

C_M	k_1^*	k_2^*	λ	$Q_{\text{Г.У.Т.}}^*$	$\Delta Q_{\text{Г.У.Т.}}$	Sign H
1,00	0,72	0,22	0,068	20,0	4,5	«←→»
1,20	0,75	0,34	0,056	18,7	5,8	
1,40	0,79	0,47	0,043	17,7	6,8	
1,60	0,83	0,59	0,031	16,9	7,6	
1,80	0,865	0,72	0,018	16,4	8,1	
1,85	0,874	0,75	0,015	16,3	8,2	

Таблица 2
Результаты решения оптимизационной задачи для ГСТЭС при N=125 кВт

C_M	k_1^*	k_2^*	λ	$Q_{\text{Г.У.Т.}}^*$	$\Delta Q_{\text{Г.У.Т.}}$	Sign H
0,70	0,71	0,00	0,10	17,8	0,0	«←→»
0,80	0,72	0,06	0,09	17,4	0,4	
1,00	0,75	0,19	0,08	17,1	0,7	
1,20	0,786	0,32	0,07	15,5	2,3	
1,25	0,795	0,35	0,069	13,8	4,0	
1,30	0,803	0,38	0,066	12,9	4,9	

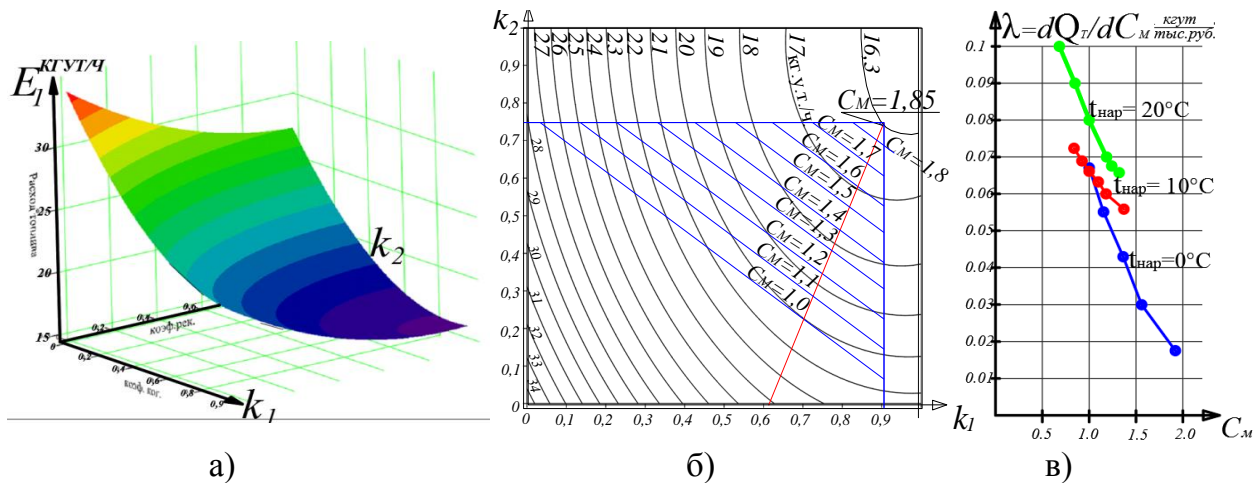


Рис. 2. Соотношение коэффициентов применения ВИЭ k_1 и k_2 :
 а – график зависимости расхода условного топлива при комплексном применении гелиосистемы электроснабжения и ветрогенераторной установки в ГСТЭС от коэффициентов применения их k_1 и k_2 соответственно; б – карта изоквант и изокост в зависимости от k_1 и k_2 при наличии ограничений на стоимость модернизации комплекса; в – зависимость чувствительности потребления условного топлива к вложению затрат на модернизацию от их величины

Представленные выкладки позволяют достаточно точно определить сочетание вкладов привлекаемого набора ВИЭ для минимального задействования топливно-энергетических ресурсов дизель-генераторных установок [2]. Результаты решения такой оптимизационной задачи на модели комплекса ГСТЭС при заданных параметрах сети представлены в табл. 1 и 2 соответственно, а их графическая интерпретация для различных внешних условий – на рис. 1.

Произведенный натурный эксперимент на модели комплекса ГСТЭС показал высокую степень сходимости результатов с теоретическими расчетами и эффективность предложенного подхода. Достигнуто оптимальное соотношение коэффициентов применения ВИЭ k_1 к k_2 на малых и средних значениях нагрузки (рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальная в последние годы проблема закрепления присутствия малочисленных воинских подразделений в районах арктической зоны, полярного круга, прибрежного шельфа вдоль Северного морского пути РФ, измерительных средств ИКП 1 ГИК МО РФ (полигон «Кура») приводит к необходимости решения задачи эффективного и надежного снабжения как традиционными, так и ВИЭ. Вопросы, связанные с эффективностью использования ГСТЭС, решаются только с помощью комплексной оптимизации управленческих, эксплуатационных и схемных решений гелиосистем. Среди публикаций по энергетической тематике все становится все больше работ, связанных с рассмотрением отдельных видов ВИЭ (по характеристикам солнечных полей-приемников, аккумуляторным батареям и др.) [2, 3, 5].

Реже анализируются предложения комплексного решения данной задачи и в том числе вопросы системного рассмотрения как новых схемных решений, так и научно обоснованных подходов к системе управления указанным гелиокомплексом.

Таким образом, всё вышеизложенное определяет область задач, рассмотрение которых позволит разработать научно-технические принципы проектирования ГС ТЭС специальных технических систем ОНКИ, как сейчас, так и в будущем.

Список используемых источников

1. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Перспективы развития гелиоэнергетики // Экологические системы. – 2005. – № 11. – С. 17–21.
2. Маркин В.В. Альтернативные виды топлива – пора или нет? // Инженерные системы. – 2009. – № 3. – С. 27–32.
3. Гликсон А.Л., Дорошенко А.В. Гелиосистемы и тепловые насосы в системах автономного тепло- и холодоснабжения // АВОК. – 2004. – №7. – С. 14–16.
4. Усманов Ю.У., Раджабов Н.К. Исследование процесса аккумуляции солнечной энергии в «солнечном пруде» // Промышленная энергетика. – 1991. – № 2. – С. 12–14.
5. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
6. Свод правил СП (EN 15217:2007). Энергетическая оценка зданий. Методы выражения энергетических характеристик зданий и сертификация энергопотребления зданий. – М., 2013.
7. Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы IX Международной научной конференции, 17–22 мая 2011 г., г. Кошалин / сост. А.Н. Гвоздков; Волгогр. гос. архитектурно-строит. ун-т. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2011. – 420 с.

Н.Ф. Аверкиев,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Кульвиц,
кандидат техн. наук, доцент;
А.Ю. Хасанов

ОЦЕНИВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ОПАСНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

В работе приведена оценка возможного развития опасной ситуации при разрушении космического аппарата (КА) на геостационарной орбите (ГСО). Исследована зависимость вероятности опасного сближения и столкновения фрагментов с КА из состава орбитальной группировки на ГСО.

Ключевые слова: космический аппарат, геостационарная орбита, разрушение КА, космический мусор, опасное сближение КА, столкновение КА.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема засорения космическим мусором околоземного пространства в XXI веке приобрела особую значимость. С каждым годом растет количество КА, выведенных на орбиту Земли, а вместе с этим и интенсивность засорения околоземного пространства. В результате космической деятельности более всего страдают орбиты, которые чаще всего используют для функционирования КА: низкие опорные орбиты, геостационарные орбиты и солнечно-синхронные орбиты [1]. Столкновение действующих КА с космическим мусором будет наиболее вероятным именно на этих орбитах. Возрастание вероятности столкновения может привести к реальной угрозе освоения околоземного космического пространства и ставит под сомнение возможность реализации перспективных космических программ. С учетом запланированных запусков КА в ближайшее десятилетие количество объектов в околоземном пространстве будет только возрастать, а следовательно, вероятность столкновения КА с космическим мусором еще больше увеличится. Такие столкновения могут повлечь за собой катастрофические последствия, начиная от повреждения корпуса КА до полного его разрушения. Развитие такой ситуации может спровоцировать так называемый «эффект Кessler», когда столкновения на околоземной орбите имеют лавинообразный характер, что, в свою очередь, может привести к полной непригодности ближнего космоса для практического использования [2]. Так, например, 10 февраля 2009 года произошел первый случай столкновения двух КА в космосе. Выработавший свой ресурс КА «Космос-2251» и действующий КА «Иридиум-33» разрушились полностью, образовав около 600 фрагментов [3]. А 12 января 2007 года Китай сбил баллистической ракетой среднего радиуса действия собственный спутник «Feng Yun 1C». В результате разрушения образовалось свыше 2000 фрагментов космического мусора [4].

Под разрушением КА понимается любое событие, в результате которого образуются фрагменты, попадающие на околоземную орбиту [5]. При этом существует вероятность столкновения фрагментов с другими КА на ГСО, что может усугубить ситуацию с космическим мусором в области функционирования КА на ГСО.

Причинами разрушения КА могут являться:

- взрыв, вызванный тепловой энергией компонентов ракетного топлива;
- разрыв под действием роста внутреннего давления;
- намеренное уничтожение КА;

– столкновение КА с другим объектом (естественного или искусственного происхождения) и т.п.

В связи со сказанным оценка вероятностей столкновения КА орбитальной группировки с фрагментами, образовавшимися после разрушения КА, представляется актуальной задачей, значимость которой с течением времени будет только возрастать.

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРУШЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Проанализируем влияние последствий разрушения одного из КА, находящегося на ГСО, на остальные КА из состава орбитальной группировки на ГСО. Под ГСО понимается такая орбита, на которой КА удерживается, насколько это возможно, неподвижным относительно поверхности Земли. В реальности на движение КА влияют возмущения, вызванные притяжением Луны, Солнца, нецентральности гравитационного поля Земли, поэтому орбиты КА непрерывно эволюционируют [2]. Влияние возмущений на движение КА будет вызывать уход по долготе (дрейф) точки стояния, неравномерность движения в плоскости орбиты, отклонение в наклонении и т.д.

В результате разрушения КА, образовавшиеся фрагменты будут постепенно распространяться около ГСО из-за различий в значениях их периодов обращений. Помимо этого, на фрагменты, равно как и на КА, оказывают влияние возмущения от Луны, Солнца, нецентральности гравитационного поля Земли. Действие возмущений на движение КА и фрагментов носит сложный труднопрогнозируемый характер, проявляясь по-разному в зависимости от характера и результатов действия возмущения [6]. При оценивании последствий разрушения КА необходимо учитывать весь перечень возмущающих факторов, действующих на КА и на фрагменты разрушенного КА. Учет влияния этих типов возмущений на КА и фрагменты позволяет получить оценку последствий разрушения КА, находящегося в составе орбитальной группировки.

При моделировании будем предполагать, что разрушение КА происходит в результате изотропного взрыва, а координаты каждого фрагмента совпадают с координатами разрушившегося КА. Проекция скорости фрагментов на оси абсолютной геоцентрической экваториальной системы координат (АГЭСК), связанной с центром масс КА, можно определить по формулам (рис. 1):

$$\begin{aligned} V_{x_i} &= V_{x_0} + \Delta V_{x_i}, \\ V_{y_i} &= V_{y_0} + \Delta V_{y_i}, \quad (i = 1, \dots, N_X), \\ V_{z_i} &= V_{z_0} + \Delta V_{z_i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $V_{x_0}, V_{y_0}, V_{z_0}$ – проекции скорости КА в момент разрушения в АГЭСК;
 $\Delta V_{x_i}, \Delta V_{y_i}, \Delta V_{z_i}$ – проекции скорости фрагментов разрушившегося КА в АГЭСК, рассматриваемые как случайные величины и определяемые с помощью метода обратных функций по заданным функциям плотности распределения;
 N_X – количество фрагментов, образовавшихся вследствие разрушения КА.

Изменение параметров движения фрагментов повлечет за собой изменение геометрических характеристик орбит фрагментов относительно орбиты взорвавшегося КА. Таким образом, для каждого i -го фрагмента формируются свои начальные условия движения, тем самым образовывается множество орбит фрагментов (рис. 2).

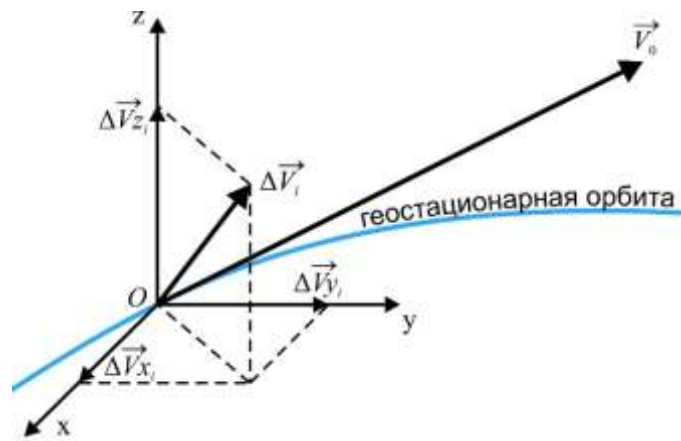


Рис. 1. Проекция импульса скорости фрагмента ΔV_i

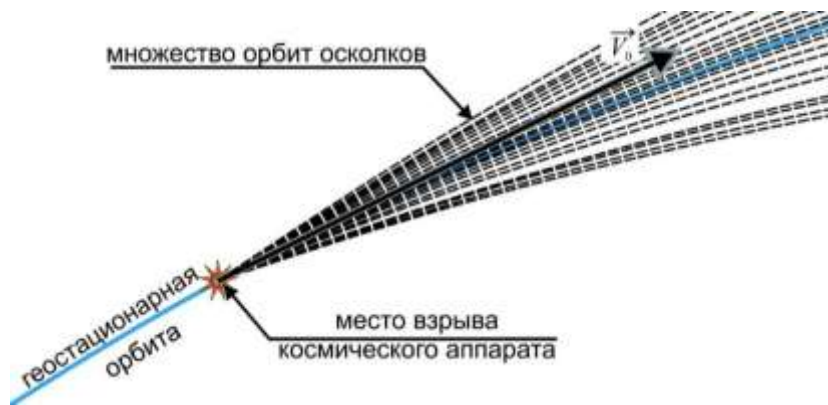


Рис. 2. Траектории движения фрагментов при разрушении КА на ГСО

Движение КА и образовавшихся фрагментов рассматривается в АГЭСК с учетом нецентральности гравитационного поля Земли, влияния возмущений гравитационных полей Луны и Солнца. Исходя из этого система дифференциальных уравнений движения КА и образовавшихся фрагментов будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{\mu x}{r^3} + j_{xл} + j_{xнптз} + j_{xc}; \\ \ddot{y} = -\frac{\mu y}{r^3} + j_{yл} + j_{yнптз} + j_{yc}; \\ \ddot{z} = -\frac{\mu z}{r^3} + j_{zл} + j_{zнптз} + j_{zc}, \end{cases} \quad (2)$$

где μ — гравитационная постоянная Земли;
 $j_{xл}, j_{yл}, j_{zл}$ — проекции возмущающих ускорений, вызванных притяжением Луны;
 $j_{xнптз}, j_{yнптз}, j_{zнптз}$ — проекции возмущающих ускорений, вызванных влиянием нецентральности гравитационного поля Земли;
 j_{xc}, j_{yc}, j_{zc} — проекции возмущающих ускорений, вызванных притяжением Солнца.

Поскольку система дифференциальных уравнений (2) не имеет аналитического решения, она может быть решена численным методом интегрирования Рунге – Кутта при заданных начальных условиях в момент t_0 .

Численное моделирование движения КА на ГСО и эволюции образовавшихся вследствие разрушения фрагментов проведено на основе следующих расчетных условий:

- количество действующих КА на ГСО $N_{КА} = 217$ [7];
- КА расположены равномерно на ГСО с шагом $2\pi/N_{КА}$ и имеют соответствующие координаты в АГЭСК $\{x_j, y_j, z_j, V_{x_j}, V_{y_j}, V_{z_j}\}$;
- максимальное значение проекций импульсов скорости фрагментов после разрушения $\Delta V_{x_i}, \Delta V_{y_i}, \Delta V_{z_i}$ не превышает 0,1 км/с;
- КА представляют собой сферы с радиусами $R_{КА} = 50$ м;
- фрагменты разрушившегося КА представляют собой материальные точки;
- интервал испытаний равен 1 году;
- расстояние, при котором сближение фрагмента и КА является опасным, $L = 1$ км;
- движение КА и фрагментов происходит под влиянием возмущений от Луны, Солнца и нецентральной гравитационного поля Земли.

В работе рассмотрено три варианта развития событий: в результате разрушения КА на ГСО образовалось $N_X = 200$, $N_X = 400$ и $N_X = 600$ фрагментов.

Условие столкновения КА с образовавшимся в результате столкновения фрагментом определяется следующим образом:

$$d_{ij} < R_{КА}, \quad (3)$$

где d_{ij} – расстояние между i -м фрагментом и j -м КА,

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad i = 1, \dots, N_X, \quad j = 1, \dots, N_{КА}.$$

Для определения случая столкновения КА и фрагмента на каждом шаге интегрирования необходимо проверять условие (3) для каждого i -го фрагмента и j -го КА. При выполнении этого условия считается, что фрагмент столкнулся с КА. Уменьшение шага прогнозирования позволяет обнаружить момент столкновения КА с фрагментом.

Условие опасного сближения КА с образовавшимся в результате столкновения фрагментом на расстояние L определяется следующим образом:

$$d_{ij} < L. \quad (4)$$

Для определения случая опасного сближения КА и фрагмента на расстояние L (км) на каждом шаге интегрирования необходимо проверять условие (4) для каждого i -го фрагмента и j -го КА. При выполнении этого условия считается, что фрагмент находится на расстоянии, при котором сближение с КА является опасным.

По результатам проведенных m испытаний рассчитывается вероятность столкновения и опасного сближения на расстояние менее L (км) фрагментов разрушенного КА и остальных КА на ГСО. Для каждого n -го испытания определяется количество столкновений N_C и опасных сближений N_{OC} на расстояние менее L (км) в течение 1 года.

Вероятность столкновения P_C и опасного сближения P_{OC} на расстояние менее L (км) по результатам проведенных m испытаний можно определить по формулам:

$$P_C = \frac{\sum_{n=1}^m N_C}{m}; \quad P_{OC} = \frac{\sum_{n=1}^m N_{OC}}{m}. \quad (5)$$

Если достоверные данные об орбите не позволяют считать, что опасность столкновения является ничтожно малой, то следует учитывать возможность проведения КА уклоняющих маневров [8]. Таким образом, в случае разрушения одного из КА на ГСО вероятность столкновения с фрагментами можно снизить путем маневрирования КА.

При расчетах было принято, что КА на ГСО имеют двигательные установки для коррекции их положения на орбите и удержания в заданной точке стояния. Однако периодичность коррекции положения КА различна и лежит в пределах от нескольких часов до нескольких недель. В связи с этим моделирование проводилось для двух случаев:

- 1) движение КА происходит под влиянием возмущений от Луны, Солнца и нецентральности гравитационного поля Земли, что соответствует отсутствию коррекции КА;
- 2) влияние $j_L, j_{НГПЗ}, j_C, j_{СД}$ на КА приближено к нулю, а значит КА удерживают свое положение на орбите в заданных точках стояния.

Для моделирования последствий разрушения КА на ГСО с учетом указанных расчетных условий было проведено 450 испытаний. По результатам моделирования получен график зависимости вероятности опасного сближения на расстояние менее L (км) фрагментов с КА с течением времени от момента разрушения КА (рис. 3).

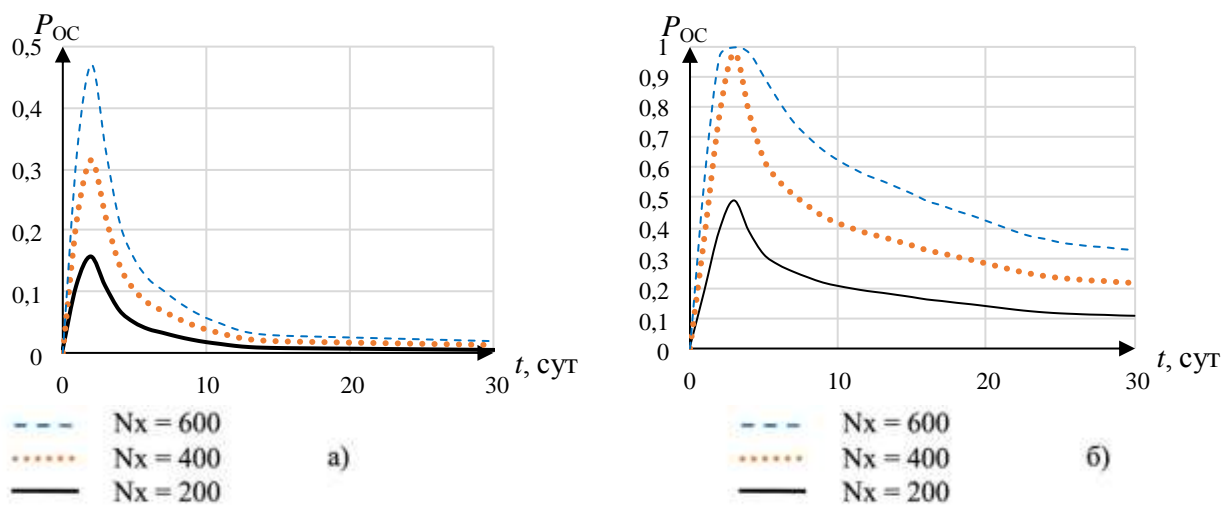


Рис. 3. График зависимости вероятности опасного сближения фрагментов с КА, находящимся на ГСО, на расстояние менее L (км) с течением времени от момента разрушения КА:
 а – в случае удержания КА в заданных точках стояния;
 б – при отсутствии коррекции положения КА

Максимальная вероятность опасного сближения фрагментов с КА на ГСО на расстояние менее L (км) при $N_x=200$ для первого случая составляет примерно 0,15 во вторые сутки и примерно 0,05 в третьи сутки. В течение первых пяти суток фрагменты разрушенного КА будут сближаться с соседними КА, а в дальнейшем будут происходить сближения с остальными КА по мере рассеивания фрагментов в области ГСО. С течением времени возмущения от Луны, Солнца и нецентральности гравитационного поля Земли, оказывая влияние на образовавшиеся после разрушения КА фрагменты, «уводят» их от исходной орбиты разрушенного КА, тем самым очищая область ГСО и, соответственно, снижая вероятность опасного сближения (рис. 4).

Испытания также показали, что максимальная вероятность столкновения КА на ГСО с фрагментами в течение проводимого интервала в 1 год для первого случая составляет менее 0,004, а во втором случае – около 0,083 %. При увеличении количества фрагментов, образовавшихся после разрушения КА, прямо пропорционально повышается вероятность столкновения (опасного сближения). Вероятность возникновения «эффекта Кesslerа» в области ГСО, когда будут разрушены, к примеру, 10 КА, приведена в табл. 1.

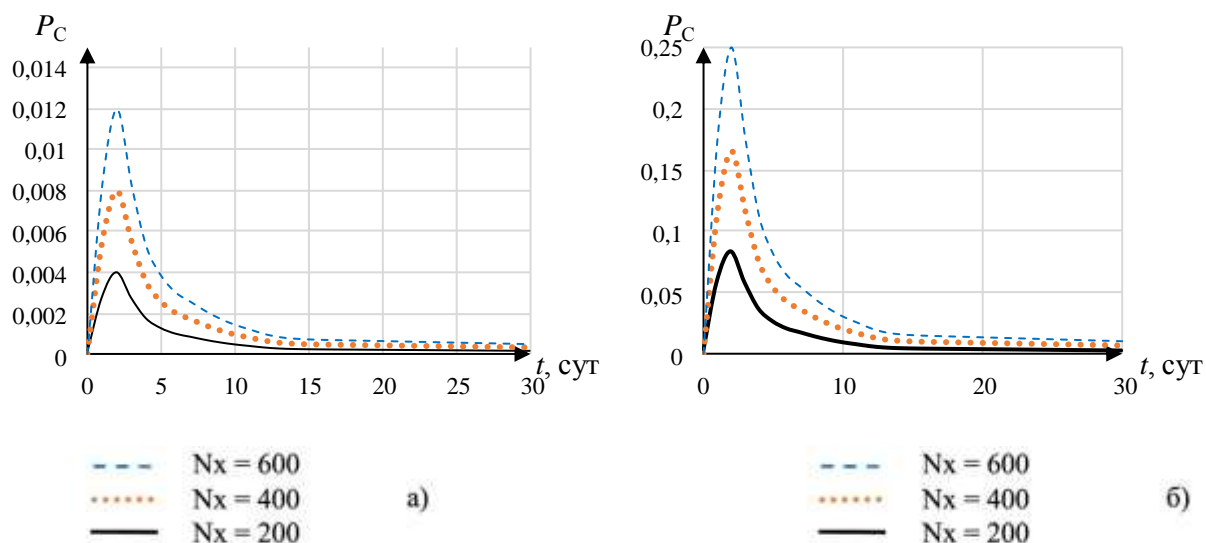


Рис. 4. График зависимости вероятности столкновения фрагментов с КА, находящимся на ГСО, с течением времени от момента разрушения КА:
 а – в случае удержания КА в заданных точках стояния;
 б – при отсутствии коррекции положения КА

Таблица 1

Вероятность возникновения «эффекта Кesslerа» на ГСО

N_x	В случае удержания КА в заданных точках стояния	При отсутствии коррекции положения КА
200	10^{-18}	10^{-5}
400	10^{-15}	0,001
600	10^{-13}	0,09

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрушение КА на ГСО может вызвать опасные последствия. Фрагменты КА уже в первые сутки способны опасно сблизиться с действующими КА на ГСО, однако с течением времени вероятность как столкновения, так и опасного сближения будет снижаться за счет рассеивания фрагментов из-за влияния на них возмущений, вызванных притяжением Луны и нецентрального гравитационного поля Земли. Для уменьшения вероятности столкновения КА с фрагментами, образовавшимися при разрушении одного из КА на ГСО, необходимо остальным КА производить коррекцию орбиты для удержания в заданных точках стояния.

Возникновение «эффекта Кesslerа» на ГСО при разрушении одного из КА маловероятно из-за геометрических характеристик ГСО, а также влияния различного рода возмущений на движение образовавшихся фрагментов.

Список используемых источников

1. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, С.А. Богачёв и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 302 с.

2. *Soop M.* Handbook of Geostationary Orbits – Space Technology Library. – Kluwer Academic Publishers, 1994. – 309 p.
3. Над Сибирью столкнулись российский и американский спутники. – Лента.ру. – URL: <https://lenta.ru/news/2009/02/12/collision/> (дата обращения: 06.11.2019).
4. Китай сбил ракетой собственный спутник. – Лента.ру. – URL: <https://lenta.ru/articles/2007/01/19/test/> (дата обращения: 06.11.2019).
5. Руководящие принципы предупреждения образования космического мусора / Комитет по использованию космического пространства в мирных целях Генеральной Ассамблеи ООН. – Вена, 2003.
6. *Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А.* Теория движения искусственных спутников Земли. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2007.
7. Online Satellite Calculations. – 2019. – URL: <https://satellite-calculations.com/Satellite/Catalog/> (дата обращения: 11.11.2019).
8. *Новиков Л.С.* Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: учеб. пособие. – М.: Университетская книга, 2009. – 104 с.

А.В. Антропова;
А.В. Баталов;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Лагун,
кандидат техн. наук, доцент

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТИРОВКИ РАКЕТНЫХ БЛОКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Представлены основные положения математической модели, позволяющей выполнить оценочные расчеты динамических нагрузок, действующих на ракетные блоки при их транспортировке по железнодорожным путям. Из большого числа факторов, влияющих на динамику транспортирования ракетных блоков, рассмотрены лишь два, наиболее значимых: волнообразность железнодорожного полотна и наличие между рельсами стыков. В качестве основных оценочных параметров в расчетах приняты перегрузки, действующие на перевозимые ракетные блоки, и амплитуды их колебаний при транспортировании. Несмотря на то, что скоростной режим транспортирования по отечественным железнодорожным магистралям может достигать 120 км/ч, в расчетах скорость движения ограничена 90 км/ч. Кроме того, модельный зазор в рельсовом пути выбран равным 5 мм, тогда как его значение по нормам РЖД может достигать 21 мм. Результаты выполненных расчетов, несмотря на падающие исходные данные, показывают на превышение назначенного уровня поперечных перегрузок для корпусов ракетных блоков.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, ракетный блок, перегрузка, рельсы, стыки рельсов, динамика движения, профиль железнодорожного полотна.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ технической и нормативной литературы, а также практика сегодняшней транспортировки ракетных блоков по железнодорожным магистралям показывает на ведомственную разобщенность между РЖД и Роскосмосом. В результате такой разобщенности, по оправданным экономическим соображениям, технические средства РЖД не могут быть приспособлены под специфические требования транспортировки ракетных блоков. Вместе с тем эксплуатируемые сегодня специальные средства транспортировки ракетных блоков, как видно из открытых источников, не в полной мере оснащены дополнительными устройствами для сглаживания динамических воздействий на ракетные блоки при движении по железнодорожным магистралям. Нам представляется, что известные системные технические и технологические недостатки при производстве космической техники, приводящие к авариям, могли коснуться и специальных транспортных средств ракетно-космических комплексов (РКК). В этой связи представляет определенный интерес даже оценочное моделирование процессов динамических воздействий на ракетные блоки при их транспортировке по железнодорожным магистралям. Результаты таких оценок могут определить пути совершенствования математических моделей и в дальнейшем предложить технические решения по снижению уровня транспортных нагрузок на ракетные блоки.

ОЦЕНИВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Перевозка технических средств – одна из самых распространенных операций, выполняемых в процессе функционирования РКК. В силу особенностей дислокации отечественных РКК и заводов-изготовителей ракетной техники железнодорожный транспорт в них используется достаточно широко. Железнодорожные транспортные средства применяются и для транспортировки на большие расстояния по всем коммуникациям страны и для внутриполигонных перевозок. В силу своих конструкторских особенностей корпус РКН (РН, КА) имеет малый вес и недостаточную жесткость, поэтому требования, предъявляемые к транспортировке РКН (РН, КА), отличаются от требований, предъявляемых к транспортировке обычных грузов, перевозимых железнодорожным транспортом. Кроме того, указанные особенности влекут за собой необходимость принятия специальных мер сохранности перевозимых грузов при их транспортировке. Перевозка ракетной техники по железной дороге сопровождается рядом возмущающих факторов, приводящих к динамическим нагрузкам, которые под час могут превышать допустимые значения. К основным возмущающим факторам движения по железной дороге обычно относят: единичные неровности пути; криволинейные участки дороги; стыки рельс; износ рельсового пути; неуравновешенность колесных пар; износ колесных пар; конусность поверхности катания колесных пар и др. Действие этих факторов приводит к колебательным движениям как вагона, так и перевозимого в нем груза по всем шести степеням свободы.

Всякое возмущение, воспринимаемое вагоном и грузом, находящимся в нем, носит периодический характер, а следовательно, является источником возможных резонансных процессов, вызывающих опасные перегрузки для ракетных блоков. Безопасность транспортировки ракетных блоков по железной дороге сводится к соблюдению специальных требований, основным из которых является допустимый уровень перегрузок, испытываемый ракетной техникой при транспортировке. Для существующих РН и КА допускаются предельные перегрузки в поперечном направлении в районе 1,5–2, а в продольном направлении порядка 4–5. Важными параметрами транспортировки являются также частота и амплитуда колебаний груза. При движении железнодорожного транспорта должно быть обеспечено надежное крепление РН к транспортному средству, одновременно исключающее появление в корпусе РН недопустимых напряжений. Кроме того, не должно появиться статически неопределенное нагружение РН в опорных ложементов. Их крепление должно обеспечить свободу термических расширений корпуса. В местах соприкосновения корпуса с опорой транспорта не должно возникать местных деформаций (удельное давление по всей опорной поверхности не должно превышать 0,4 МПа). Для исключения общей деформации корпуса прогиб между опорами не должен превышать $\frac{1}{400}$ от расстояния между опорами. При значительных деформациях рамы транспортного средства опоры и узлы крепления должны исключать передачу на корпус РН изгибающих и крутящих моментов.

Транспортировка специальной техники железнодорожным транспортом от предприятий-изготовителей и арсеналов до позиционных районов РКК должна производиться по правилам и нормам РЖД, которые не удовлетворяют жестким ограничениям, существующим для космических средств [1] (известны случаи, когда ступени РН разрывались в результате ударов вагонов на станциях сортировки). Поэтому кроме стандартного железнодорожного шасси транспортные средства РКК оснащены специальным (дополнительным) оборудованием. Вместе с тем в последнее время практикуется перевозка ракетных блоков в специальных контейнерах (рис. 1), устанавливаемых на стандартную четырехосную платформу.

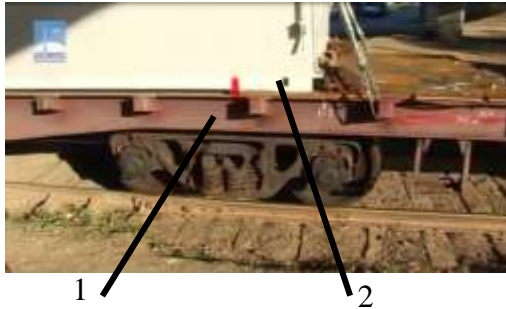


Рис. 1. Платформа (1) и контейнер(2)



Рис. 2. Ложементы (1) и контейнер (2)

Как видно из рис. 1 и 2, крепление ракетных блоков выполнено по жесткой схеме, без специальных амортизирующих устройств. Это обстоятельство послужило причиной разработки математической модели для оценивания динамических процессов транспортировки ракетных блоков по железной дороге.

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

При создании математической модели динамических процессов транспортировки ракетных блоков ставилась задача получения лишь оценочных параметров состояния груза при движении. Для этого были использованы основные соотношения, приведенные в [2]. В силу этого применялись следующие допущения: расчетная схема объекта «платформа – ракетный блок» плоская двухмерная (рис. 3)

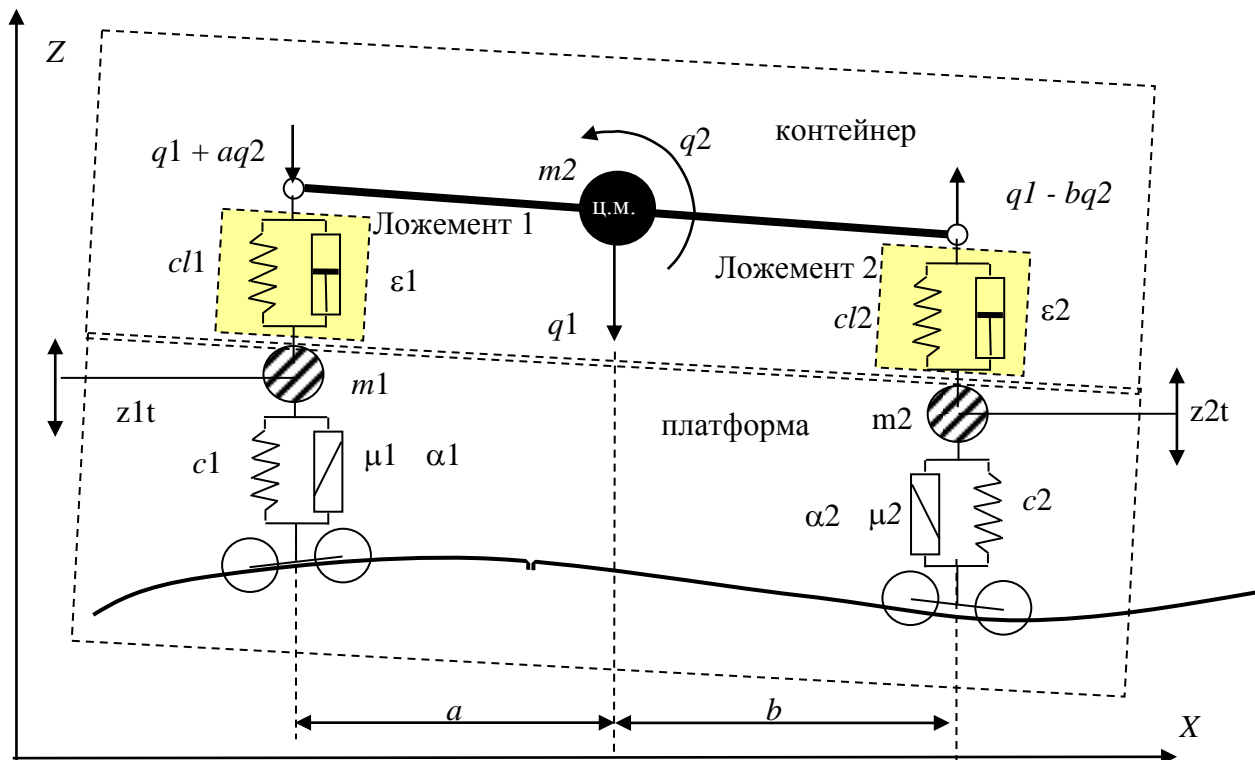


Рис. 3. Расчетная схема

На рис. 3 использованы следующие обозначения: $m1$ – масса наддрессоренной части половины платформы, $m1 = mt + mp + mkt$, где mt – масса половины ходовой тележки; mp – масса по-

ловины платформы; mkt – половина массы контейнера; $m2$ – масса ракетного блока; $q1$ – координата осадки центра масс ракетного блока; 2 – угловая координата вращения оси ракетного блока; $c1=c2$ – коэффициент жесткости пружин подвески тележки; $\mu1=\mu2$ – коэффициент трения в демпфере сухого трения ходовой тележки; $\alpha1=\alpha2$ – угол клина в демпфере сухого трения ходовой тележки; $c11=c12$ – коэффициент жесткости ложементов; $\varepsilon1=\varepsilon2$ – коэффициент демпфирования ложементов; a, b – расстояние ложементов от центра масс ракетного блока; $(q1+aq2)$ и $(q1-bq2)$ – осадки упругих опор ложементов; $z1t, z2t$ – перемещение первой и второй тележки по оси Z .

Перемещения $z1t$ и $z2t$ связывались с перемещениями колес ходовых тележек следующими соотношениями:

$$z1t = \frac{z11k + z12k}{2}; \quad z2t = \frac{z21k + z22k}{2}.$$

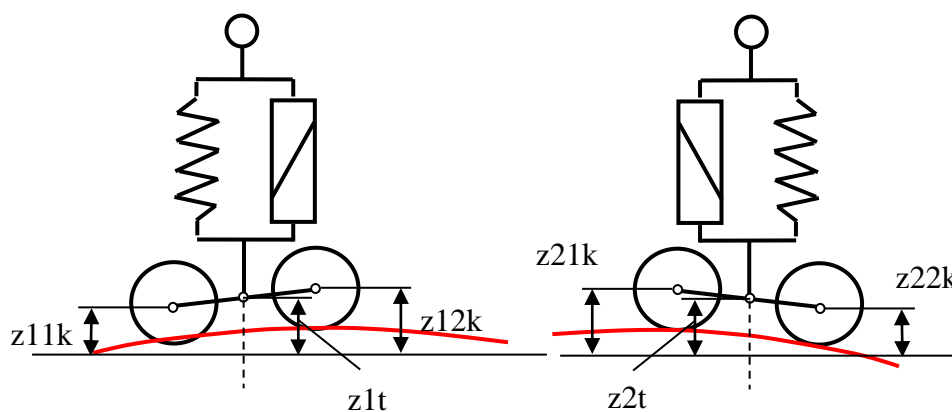


Рис. 4. Перемещение ходовых тележек и ходовых колес

На рис. 4 использованы следующие обозначения: $z11k, z12k$ – перемещения первой и второй колесных пар первой тележки соответственно; $z11k, z12k$ – перемещения первой и второй колесных пар второй тележки соответственно.

Связь между координатами $q1, q2, z1t, z2t$ выполнялась по соотношениям:

$$q1 = \frac{z1t}{b - \frac{b-a}{2}} \cdot \frac{b-a}{2}; \quad q2 = \frac{z1t}{b - \frac{b-a}{2}}; \quad z2t = \frac{z1t}{b - \frac{b-a}{2}} \left(a + \frac{b-a}{2} \right).$$

Для проведенных оценочных расчетов использовались лишь два наиболее значимых фактора, оказывающих возмущение на движение системы «платформа – ракетный блок», во-первых, это неровность рельсового профиля (рис. 5), которая задавалась гармонической функцией типа

$$z = z_0 \sin(k1 \cdot t).$$



Рис. 5. Волнообразный профиль рельсового пути

Здесь $k_1 = \frac{2\pi V}{L_g}$, где k, V, L_g – частота возмущений, скорость движения и длина петли из рельсов, близко описывающих реальный профиль дороги с амплитудой z_0 .

По данным, опубликованным в [3], невязка в ходе определяется по соотношению

$$z = h\sqrt{L},$$

где $h = \pm 50$ мм – разновысотность рельсового пути на мерной базе L , которая измеряется в метрах (рис. 6). Несмотря на то, что длина сварных петель может достигать 800 м и более, в расчетах она составила $L_s = 250$ м.

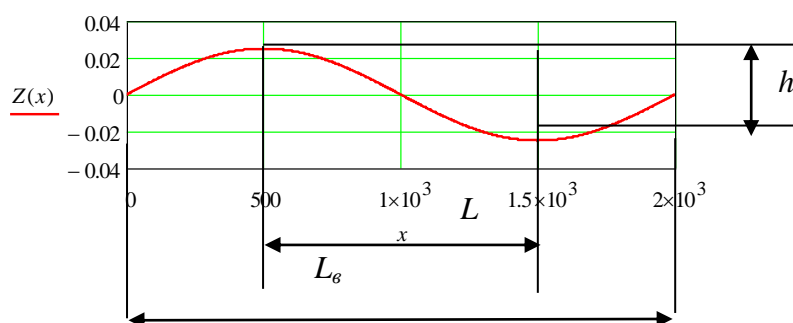


Рис. 6. Профиль железнодорожного полотна

На основании документа [3] параметры z_0, L_g в расчетах имели следующие значения:

$$z_0 = 25 \text{ мм}; L_g = 2000 \text{ м.}$$

Вторым возмущающим фактором в расчете принимались стыки рельсов (рис. 7), величина зазора в которых, в соответствии с [4, 5], не должна превышать 20 ± 1 мм. При этом в расчетах использовано значение стыкового зазора 5 мм.



Рис. 7. Стык железнодорожного рельса

Для описания процессов ударного импульса, воздействующего на транспорт при перекачивании ходовых колес через стыки рельсов, использовалась гипотеза профессора А.М. Годыцкого-Цвирко, согласно которой количество движения, приобретенное колесной парой за время удара, равно импульсу сил, сообщенному телу за то же время. На основании этой гипотезы импульс силы может быть оценен по соотношению $S(t) = m_k V \theta_{ст}$, где m_k – масса колесной пары с учетом неподрессоренной части тележки, $\theta_{ст}$ – угол, имеющий дугу, примерно равную расстоянию между точками касания колеса двух рельсов. Значение $\theta_{ст}$ может быть оценено по соотношению $\theta_{ст} = \frac{st}{r_k}$, где st, r_k – величина зазора стыков рельсов и радиус ко-

леса тележки соответственно. Тогда для описания силы, воздействующей на ходовые колеса (AS), можно воспользоваться соотношением

$$AS = m_k V \frac{st}{r_k td},$$

где td – длительность импульса силы. Для проведения модельного расчета динамики движения транспорта с ракетным блоком значение td , согласно [6], было выбрано равным 0,0025 с для скорости движения $V = 90$ км/ч. Поскольку расчеты проведены в среде Mathcad, то сила импульса задавалась встроенной функцией $if(cond, x, y)$, которая использовалась при описании импульсного воздействия для каждой колесной пары в виде соотношений:

– для первой колесной пары первой ходовой тележки:

$$S11(t) = \sum_{i=0}^m if(\tau(i) \leq t \leq (\tau(i) + td), AS, 0);$$

– для второй колесной пары первой ходовой тележки:

$$S12(t) = S11\left(t + \frac{lt}{V}\right);$$

– для первой колесной пары второй ходовой тележки:

$$S21(t) = S12\left(t + \frac{LPH + 0.5lt}{V}\right);$$

– для второй колесной пары второй ходовой тележки:

$$S22(t) = S21\left(t + \frac{lt}{V}\right).$$

В приведенных выше выражениях lt, LPH обозначены база ходовой тележки и расстояние между осями ходовых тележек, а функция $\tau(i)$ задавала значение текущего времени наезда на стык рельсов (рис. 8)

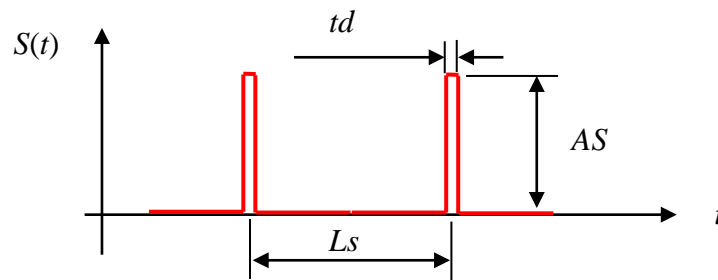


Рис. 8. Ударный импульс при проезде стыка

Для выполнения расчетов использовалась следующая система уравнений:

– уравнение колебания первого колеса левой тележки:

$$\frac{d^2}{dt^2} z_{11k} + \frac{F_{11}(t)}{mk} + p_1^2 z_{11k} = H \sin(k_1 \cdot t + \beta_1) + \frac{S_{11}(t)}{mk};$$

– уравнение колебания второго колеса левой тележки:

$$\frac{d^2}{dt^2} z_{12k} + \frac{F_{12}(t)}{mk} + p_1^2 z_{12k} = H \sin(k_1 \cdot t + \beta_1 + \beta_2) + \frac{S_{12}(t)}{mk};$$

– уравнение колебания первого колеса правой тележки:

$$\frac{d^2}{dt^2} z_{21k} + \frac{F_{21}(t)}{mk} + p_1^2 z_{21k} = H \sin(k_1 \cdot (t + T_1) + \beta_1) + \frac{S_{12}(t)}{mk};$$

– уравнение колебания второго колеса правой тележки:

$$\frac{d^2}{dt^2} z_{22k} + \frac{F_{22}(t)}{mk} + p_1^2 z_{22k} = H \sin(k_1 \cdot (t + T_1) + \beta_1 + \beta_2) + \frac{S_{22}(t)}{mk};$$

– уравнение вертикального колебания центра масс кузова:

$$\frac{d^2}{dt^2} q_1 + \frac{d}{dt} q_1 \cdot A_1 + q_1 \cdot B_1 + \frac{d}{dt} q_2 \cdot A_2 + q_2 \cdot B_2 = \frac{d}{dt} q_{t1} \cdot A_1 + q_{t1} \cdot B_1 + \frac{d}{dt} q_{t2} \cdot A_2 + q_{t2} \cdot B_2;$$

– уравнение углового колебания центра масс кузова:

$$\frac{d^2}{dt^2} q_2 + \frac{d}{dt} q_1 \cdot C_1 + q_1 \cdot D_1 + \frac{d}{dt} q_2 \cdot C_2 + q_2 \cdot D_2 = \frac{d}{dt} q_{t1} \cdot C_1 + q_{t1} \cdot D_1 + \frac{d}{dt} q_{t2} \cdot C_2 + q_{t2} \cdot D_2.$$

Силы, действующие в демпферах сухого трения ходовых тележек, оценивались по соотношениям:

– половина силы демпфера сухого трения левой тележки:

$$F_{11}(t) = \frac{\mu \cdot c_1 \cdot z_{11k}(t) \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha) - \frac{|z_{11k}(t)|}{z_{11k}(t)} \cdot \mu \cdot \sin(\alpha)} \cdot \frac{1}{2};$$

– половина силы демпфера сухого трения правой тележки:

$$F_{12}(t) = \frac{\mu \cdot c_2 \cdot z_{12k}(t) \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha) - \frac{|z_{12k}(t)|}{z_{12k}(t)} \cdot \mu \cdot \sin(\alpha)} \cdot \frac{1}{2};$$

– половина силы демпфера сухого трения правой тележки:

$$F_{21}(t) = \frac{\mu \cdot c_1 \cdot z_{21k}(t) \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha) - \frac{|z_{21k}(t)|}{z_{21k}(t)} \cdot \mu \cdot \sin(\alpha)} \cdot \frac{1}{2};$$

– половина силы демпфера сухого трения правой тележки:

$$F_{22}(t) = \frac{\mu \cdot c_2 \cdot z_{22k}(t) \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha) - \frac{|z_{22k}(t)|}{z_{22k}(t)} \cdot \mu \cdot \sin(\alpha)} \cdot \frac{1}{2}.$$

Схема демпфера сухого трения показана на рис. 9, где α – угол клина в демпфере. Символом μ в формулах обозначен коэффициент трения демпфера.

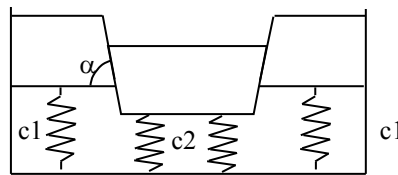


Рис. 9. Схема демпфера сухого трения

Частота собственных колебаний определяется выражением $p_1 = \sqrt{\frac{c_1}{m_1}}$, а сдвиг по фазе суммарного возмущения – $\beta_1 = \arctg\left(\frac{2 \cdot n_1 \cdot k_1}{p_1^2 - k_1^2}\right)$, где n_1 – коэффициент сопротивления. В расчетах, в силу симметрии платформы, коэффициенты сопротивления в демпферах приняты одинаковыми:

$$n_1 = n_{11} = n_{12} = n_{21} = n_{22} = \frac{F_{11}}{m_1 \cdot \frac{d}{dt}(z_{11k})}.$$

Амплитуда возмущающей силы $H = z_0 \cdot \sqrt{p_1^4 + 4n_1^2 \cdot k_1^2}$.

Сдвиг по фазе в долях угла 2π между перемещениями первой и второй колесных пар определялся соотношением

$$\beta_2 = 4\pi \cdot lt / L_6.$$

Сдвиг наезда первого колеса правой тележки на неровности пути относительно первого колеса левой тележки определялся соотношением

$$T_1 = \frac{LPH + lt}{V}.$$

Вертикальное перемещение левого ложемента определялось соотношением

$$q_{1t} = b \cdot \left(\frac{z_1 t + \frac{a}{b} z_2 t}{a + b} \right).$$

Вертикальное перемещение правого ложемента определялось соотношением

$$q_{2t} = \frac{z_1 t + \frac{a}{b} z_2 t}{a + b} - \frac{z_2 t}{b}.$$

В модели были использованы вспомогательные коэффициенты:

$$A_1 = \frac{\xi_1 + \xi_2}{m_2}; A_2 = \frac{\xi_1 \cdot a - \xi_2 \cdot b}{m_2}; B_1 = \frac{cl_1 + cl_2}{m_2}; B_2 = \frac{cl_1 \cdot a - cl_2 \cdot b}{m_2};$$

$$C_1 = \frac{\xi_1 \cdot a - \xi_2 \cdot b}{J}; C_2 = \frac{\xi_1 \cdot a^2 + \xi_2 \cdot b^2}{J}; D_1 = \frac{cl_1 \cdot a - cl_2 \cdot b}{J}; D_2 = \frac{cl_1 \cdot a^2 + cl_2 \cdot b^2}{J}.$$

Исходными данными для расчетов послужили технические параметры ходовой тележки ЦНИИ-ХЗ-О, платформы для перевозки большегрузных контейнеров, масса и габариты контейнеров для перевозки ракетных блоков РКН «Союз», а также масса и самих блоков этой РКН.

Результаты решений были направлены на получение оценочных зависимостей для перегрузок и перемещений перевозимых ракетных блоков (рис. 10–14).

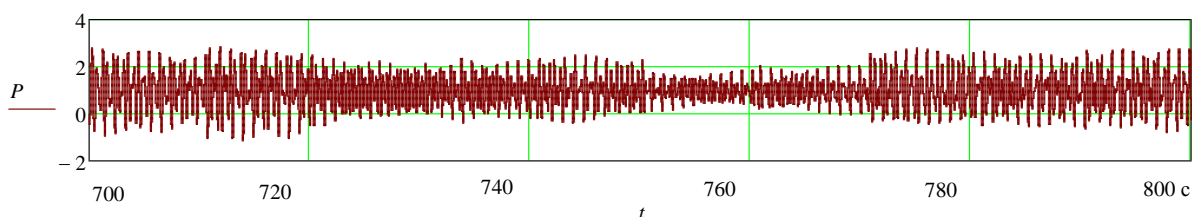


Рис. 10. Перегрузки центра масс перевозимого ракетного блока

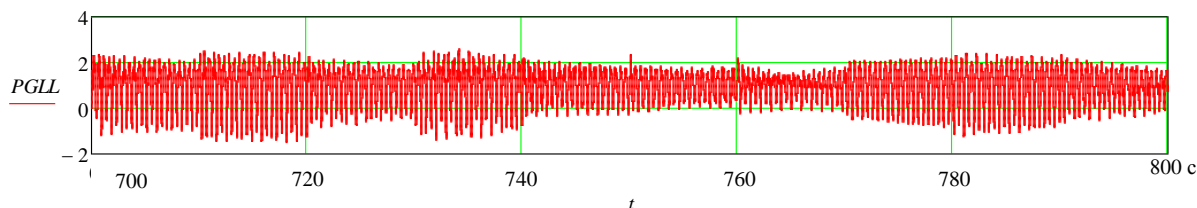


Рис. 11. Перегрузки, действующие на перевозимый ракетный блок в левом ложемента

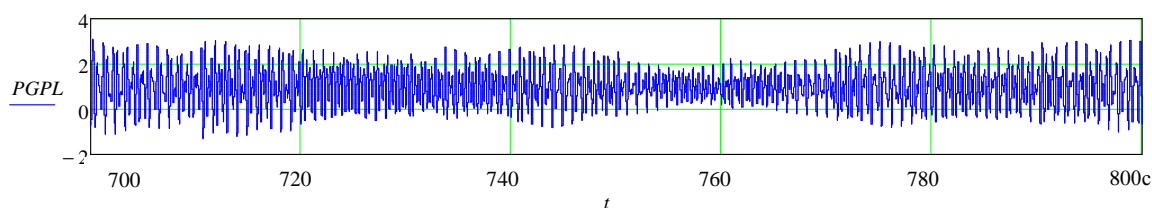


Рис. 12. Перегрузки, действующие на перевозимый ракетный блок в правом ложементе

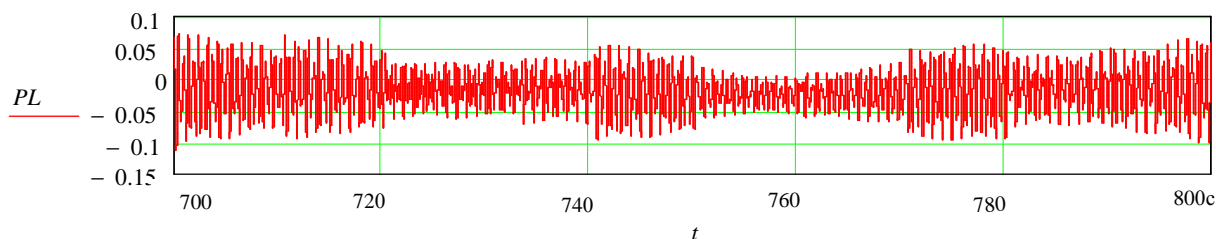


Рис. 13. Амплитуды колебаний в правом ложементе платформы

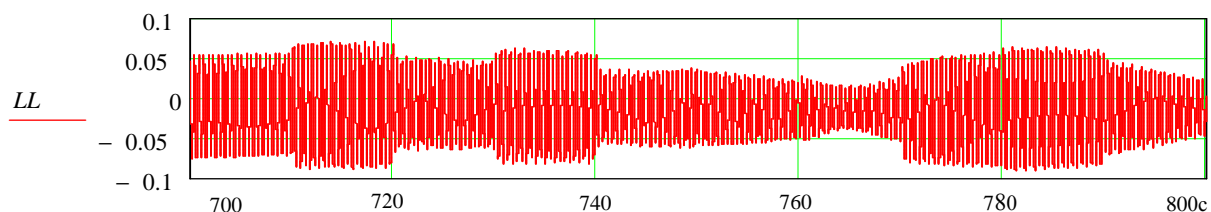


Рис. 14. Амплитуды колебаний в левом ложементе платформы

По результатам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Перегрузки, испытываемые ракетным блоком при его транспортировке, носят периодический характер. Уровень значений поперечных перегрузок колеблется от 1,5 до 3, что превышает допустимые значения в верхнем их значении.
2. Колебание транспортной платформы и перевозимого на ней груза соответствует галопированию.
3. Уровень перегрузок вдоль обечайки ракетного блока неодинаковый. В соответствии с выбранным расположением ракетного блока его правая сторона испытывает большие нагрузки, по сравнению с левой, т.е. большие нагрузки испытывает легкая часть ракетного блока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная здесь математическая модель динамических процессов, происходящих в ходе транспортировки ракетной техники железнодорожным транспортом, является лишь первым приближением в описании реальных процессов транспортирования. Полученные в расчетах оценочные параметры динамики перевозки ракетных блоков доказывают необходимость, с одной стороны, более подробного моделирования процесса транспортирования, а с другой – вызывают опасения в отношении недостаточной системы амортизации, применяемой сегодня в транспортных железнодорожных агрегатах, предназначенных для транспортировки ракет, космических аппаратов и их составных частей от предприятий-изготовителей до мест эксплуатации по железнодорожным путям общего пользования.

Список используемых источников

1. ГОСТ 22235-2010. Вагоны грузовых магистралей железных дорог. Колея 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. – М.: Стандартинформ, 2019.
2. Бутенин Н.В., Луц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1979. – Т.2: Динамика. – 544 с.
3. ЦПТ-54/26 от 17.12.2008 г. Методические указания по составлению продольных профилей специальных путей и перегонов. Утверждено вице-президентом ОАО «РЖД» В.Б. Воробьевым, 17.12.2008. – URL:<http://tdesant.ru> (дата обращения: 21.07.2020).
4. ГОСТ 33185-2014. Накладки для изолирующих стыков железнодорожных рельсов. Требования безопасности и методы контроля. – М.: Стандартинформ, 2014.
5. ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М.: Изд-во ВНИ-ИЖТ, 2014. – 101 с.
6. Кузьмицкий Я.О., Шевченко Д.В., Беляев А.К. Конечно-элементное моделирование процесса перекачивания железнодорожного колеса через стыки рельсов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. – 2015. – № 4(231). – С. 170–178.

И.А. Апевалов;
Н.В. Груздев,
кандидат военных наук, доцент;
С.Ю. Пирогов,
доктор техн. наук, доцент;
Е.А. Прокопенко,
кандидат техн. наук

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ЭНЕРГОМАССОВАЯ МОДЕЛЬ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ «ТАНДЕМ» С СИСТЕМОЙ СПАСЕНИЯ РАКЕТНЫХ БЛОКОВ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ

Рассмотрен один из вариантов построения энергомассовой модели ракеты-носителя (РН) с учетом применения системы спасения первой ступени РН. Представлены ограничения и дополнительные условия, которые необходимо включить в энергомассовую модель ракеты-носителя для определения значений целевой функции относительной массы полезной нагрузки.

Ключевые слова: ракета-носитель, масса полезной нагрузки, система спасения ступени.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития средств выведения космических аппаратов одной из основных задач, которую решают разработчики РН, является снижение стоимости выведения полезной нагрузки (ПН) на орбиту. Кроме того, обеспечение безопасности вдоль трасс запусков космических аппаратов и в районах падения (РП) отделяющихся частей ракет-носителей является важным вопросом осуществления космической деятельности. В настоящее время рассматривается несколько направлений решения указанных задач. Наиболее перспективным представляется применение системы спасения на ракетных блоках (РБ) первой ступени РН, так как районы падения РБ первой ступени требуют значительных по площади зон отчуждения и находятся в доступности от населенных пунктов.

Имеющиеся подходы энергомассового анализа РН, оборудованной системой спасения, позволяют получать оценки значений относительной массы системы спасения РН при ограничениях на стартовую массу РН и массу выводимой полезной нагрузки на заданную целевую орбиту. Однако для повышения эффективности применения той или иной системы спасения РБ необходимо не только знать энергомассовые характеристики системы спасения, но и решать задачу оптимального распределения масс по ступеням РН, так как это напрямую влияет на снижение стоимости выведения полезной нагрузки на орбиту и уменьшение районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения (РКН).

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СПАСЕНИЯ СТУПЕНИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Среди различных вариантов спасения, предлагаемых отечественными и зарубежными разработчиками РН, следует отметить следующие способы [1–4]:

- парашютная (парашютно-реактивная) система спасения РБ первой ступени (ССПРБ), РН «Энергия»;
- парашютная система спасения двигательной установки РБ первой ступени (ССПДУ);
- система спасения РБ с использованием гибкого крыла типа «дельтаплан» (ССДРБ);

- система спасения РБ на базе несущего винта (ССВРБ);
- система спасения РБ с использованием несущего крыла (ССКРБ);
- ракетодинамическая система спасения РБ первой ступени (ССРРБ).

Характеристики указанных способов спасения с точки зрения возможности применения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики способов спасения ракетного блока первой ступени

Качественная характеристика системы спасения	ССПРБ	ССПДУ	ССДРБ	ССВРБ	ССКРБ	ССРРБ
Уровень термомеханических нагрузок на РБ на этапе спуска и приземления	Низкий	Высокий	Средний	Высокий	Средний	Средний
Необходимость системы управления	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Требуется	Требуется	Требуется
Масса системы спасения (% от общей массы РН)	30%	5–10%	20–25%	10%	30%	10–20%
Возможность посадки в заданную точку	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть	Есть
Возможность возвращения в точку старта	Нет	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть
Техническая сложность системы спасения	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая	Средняя
Степень изменения конструкции РБ	Незначительная	Значительная	Незначительная	Значительная	Значительная	Незначительная
Степень ухудшения аэродинамических характеристик РБ	Низкая	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая	Низкая
Сложность транспортных операций (после приземления)	Высокая	Чрезвычайно высокая	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая
Задействование районов падения	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет
Реализуемость способа спасения	Реализован на РН	Проект	Проект	Проект	Проект	Реализован на РН

Анализ представленных в табл. 1 основных характеристик систем спасения РБ первой ступени позволяет сделать вывод, что ни одна из схем не имеет ярко выраженного преимущества. Таким образом, анализ эффективности той или иной системы спасения РБ может быть выполнен только с использованием комплексного энергомассового и функционально-стоимостного анализа РН со спасаемым РБ первой ступени.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭНЕРГОМАССОВОЙ МОДЕЛИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С СИСТЕМОЙ СПАСЕНИЯ СТУПЕНЕЙ

Для сравнительной оценки различных способов спасения и их влияния на энергомассовые характеристики РН необходимо модифицировать имеющиеся модели оценивания энергомассового совершенства РН [5, 6] с учетом применения принципа оптимизации распределения массы по ступеням.

В качестве прототипа для исследования используется двухступенчатая РН легкого класса (типа «Ангара-А1»), оснащенная жидкостным ракетным двигателем (ЖРД) на компонентах топлива жидкий кислород и керосин. Для анализа предлагается сравнить между собой наиболее проработанные типы систем спасения ССПРБ, ССКРБ, ССРРБ.

Исходная энергомассовая модель РН, состоящей из n ступеней, включает в себя два уравнения [7]: массовое уравнение РН и уравнение для конечной скорости РН на базовой орбите:

$$\begin{cases} \bar{m}_{\text{пн}} = \prod_{i=1}^2 \left[1 - (\bar{m}_{\text{нб}i} + \varphi_{0i} \gamma_{\text{дв}i}) - a_i \bar{m}_{\text{т}i} \right], \\ V_{\text{к}} = - \sum_{i=1}^2 K_{0i} I_{\text{уп}i} \ln(1 - \bar{m}_{\text{т}i}) - \sum_{i=1}^2 \frac{\bar{m}_{\text{т}i} I_{\text{у}0i}}{\varphi_{0i}} J_{\text{г}i}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{m}_{\text{нб}i}$ – относительная масса конструкции небаковых отсеков i -й субракеты;

$\bar{m}_{\text{т}i}$ – общий относительный запас топлива i -й субракеты с учетом гарантийного запаса и незабора топлива;

φ_{0i} – начальная тяговооруженность i -й субракеты;

$\gamma_{\text{дв}i}$ – удельный вес двигательной установки i -й субракеты;

$I_{\text{у}0i}$ – удельный импульс ЖРД i -й субракеты в начале работы;

$I_{\text{уп}i}$ – удельный импульс ЖРД i -й субракеты в пустоте;

K_{0i} – коэффициент потерь скорости;

$J_{\text{г}i}$ – интеграл гравитационных потерь.

Значения коэффициента a_i в системе уравнений (1) рассчитываются с помощью выражения, представленного в [7]:

$$a_i = 1 + (\varepsilon_{\text{гар}i} + \varepsilon_{\text{ост}i}) + \frac{K_{mi} \xi_{\text{ок}i} + \xi_{\text{г}i}}{K_{mi} + 1}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{гар}i}$ – доля гарантийного запаса топлива i -й субракеты;

$\varepsilon_{\text{ост}i}$ – доля незабора топлива i -й субракеты;

K_{mi} – соотношение компонентов топлива i -й субракеты;

$\xi_{\text{ок}i}$ – коэффициент конструкции бака окислителя i -й субракеты;

$\xi_{\text{г}i}$ – коэффициент конструкции бака горючего i -й субракеты.

Коэффициенты, используемые в выражении (2), представлены в материале статьи «Методика энергомассового анализа двухступенчатой ракеты-носителя, оборудованной системой спасения ступеней» [5].

Коэффициент потерь скорости K_{0i} в системе уравнений (1) определяется следующим выражением:

$$K_{0i} = K_{ai} K_{упрi} K_{ггi}, \quad (3)$$

где K_{ai} – коэффициент аэродинамических потерь i -й субракеты, $K_{ai} \in [0,93;1]$;
 $K_{упрi}$ – коэффициент потерь на управление i -й субракеты, $K_{упрi} \in [0,96;0,99]$;
 $K_{ггi}$ – коэффициент потерь на газогенератор i -й субракеты, $K_{ггi} \in [0,98;1]$.

Субракетой называется ракета космического назначения в целом или ее часть, предназначенная для движения на активном участке траектории, причем полезной нагрузкой для первой субракеты является вторая субракета, для второй – третья.

Применение системы спасения ступеней приводит к изменению ряда характеристик РН. Во-первых, возникает дополнительная масса РН, обусловленная массой системы спасения. Эта масса может включать в себя как пассивную массу (например, для ССПРБ), так и дополнительную массу топлива (например, для ССКРБ, ССРРБ). Во-вторых, меняется аэродинамика ракетных блоков и всей ракеты космического назначения, что необходимо учитывать в интеграле аэродинамических потерь, входящем в уравнение для конечной скорости. Следует отметить, что в настоящее время применение систем спасения представляется целесообразным только для нижних ступеней (1-я ступень для двухступенчатой РН, 1-я и 2-я ступени для трехступенчатой РН), поэтому далее будет рассматриваться вариант использования системы спасения только на первой ступени РН.

Для учета включения пассивной массы, связанной с использованием системы спасения, массовое уравнение можно модифицировать следующим образом: в массовое уравнение для первой ступени ввести дополнительную массу парашютной системы, которая зависит от сухой массы ракетного блока.

Масса ракетного блока без топлива ($m_{рб\text{сух}1}$) в первом приближении будет определяться по следующему выражению:

$$m_{рб\text{сух}1} = m_{нб1} + m_{бo1} + m_{дв1}, \quad (4)$$

где $m_{нб1}$ – масса небаковых отсеков РБ первой ступени РН;
 $m_{бo1}$ – масса баковых отсеков РБ первой ступени РН;
 $m_{дв1}$ – масса двигательной установки первой ступени РН.

Для учета массы системы спасения (СС) используется коэффициент увеличения массы, который учитывает долю массы СС от массы спасаемого РБ:

$$k_{m\text{cc}} = \frac{1}{1 - \bar{m}_{\text{cc}}}, \quad (5)$$

где \bar{m}_{cc} – относительная масса СС, рассчитанная по отношению к сухой массе РБ.

Данные по этому параметру представлены, например, в работе [7]. Тогда сухая масса РБ с системой спасения первой ступени ($m_{рб\text{сух}}^{\text{cc}1}$) с учетом выражений (4) и (5) будет иметь следующий вид:

$$m_{рб\text{сух}}^{\text{cc}1} = k_{m\text{cc}} m_{рб\text{сух}1} = k_{m\text{cc}} (m_{нб1} + m_{бo1} + m_{дв1}). \quad (6)$$

В этом случае массовое уравнение для РБ с системой спасения первой ступени может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{m}_{\text{пн}1} = 1 - k_{m\text{cc}} (\bar{m}_{нб1} + \varphi_{01} \gamma_{дв1}) - a'_1 \bar{m}_{г1}, \quad (7)$$

где

$$a'_1 = 1 + (\varepsilon_{\text{гапл}} + \varepsilon_{\text{ост1}}) + k_{m\text{cc}} \left(\frac{K_{m1} \xi_{ок1} + \xi_{г1}}{K_{m1} + 1} \right). \quad (8)$$

Для учета дополнительных затрат топлива для системы спасения необходимо ввести корректировку в выражение (8) для расчета коэффициента a'_1 . Так как относительные затраты

топлива на работу СС могут достигать до 30% от общего запаса топлива, следовательно, данная величина не может считаться малой по сравнению с общим запасом топлива ступени и выражение (8) необходимо переписать в виде [5]

$$a'_1 = (1 + \varepsilon_{\text{rap1}} + \varepsilon_{\text{ocrl}}) \cdot \left(1 + k_{m\text{cc}} \left(\frac{K_{m1} \xi_{\text{okl}} + \xi_{\text{r1}}}{K_{m1} + 1} \right) \right). \quad (9)$$

Тогда, с учетом дополнительных запасов топлива на функционирование системы спасения выражение (9) будет иметь вид:

$$a''_1 = (1 + \varepsilon_{\text{cc1}} + \varepsilon_{\text{rap1}} + \varepsilon_{\text{ocrl}}) \cdot \left(1 + k_{m\text{cc}} \left(\frac{K_{m1} \xi_{\text{okl}} + \xi_{\text{r1}}}{K_{m1} + 1} \right) \right), \quad (10)$$

где ε_{cc1} – дополнительные запасы (относительные) топлива на работу системы спасения ракетного блока первой ступени РН.

Таким образом, модифицированная энергомассовая модель двухступенчатой ракеты-носителя типа «тандем» с системой спасения может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{m}_{\text{пн}} = \prod_{i=1}^2 \left[1 - k_{m\text{cci}} (\bar{m}_{\text{нб}i} + \varphi_{0i} \gamma_{\text{дв}i}) - a''_i \bar{m}_{\text{т}i} \right], \\ V_{\text{к}} = - \sum_{i=1}^2 K_{0\text{cci}} I_{\text{уп}i} \ln(1 - \bar{m}_{\text{т}i}) - \sum_{i=1}^2 \frac{\bar{m}_{\text{т}i} I_{\text{y}i}}{\varphi_{0i}} J_{\text{g}i}, \end{cases} \quad (11)$$

где $k_{m\text{cci}}$ – коэффициент увеличения сухой массы за счет использования СС;

a''_i – коэффициент, учитывающий затраты топлива на работу системы спасения, а также увеличение сухой массы за счет использования СС;

$K_{0\text{cci}}$ – коэффициент потерь скорости, учитывающий возрастание аэродинамических потерь за счет наличия аэродинамических рулей СС.

Предложенная модифицированная энергомассовая модель позволяет оценивать энергомассовые характеристики РН типа «тандем» при использовании различных систем спасения за счет варьирования значений коэффициентов $k_{m\text{cci}}$, ε_{cci} и $K_{0\text{cci}}$.

В первом приближении на основе экспертных оценок и данных литературы [6, 8, 9] при использовании системы спасения на первой ступени двухступенчатой РН можно использовать коэффициенты, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты модифицированной энергомассовой модели для двухступенчатой РН, оснащенной СС

Коэффициент	Без СС	ССПРД	ССКРБ	ССПРБ
$k_{m\text{cc1}}$	1	1,35–1,5	1,8–2,2	1,09–1,11
ε_{cc1}	0	0	0,15	0,25
$K_{0\text{cci}}$	0,93–0,95	0,91–0,93	0,86–0,9	0,91–0,94

Исследование влияния типа системы спасения и ее параметров может быть осуществлено на основе решения задачи об оптимальном распределении масс по ступеням, которая достаточно подробно изложена в [7]. Методика основана на решении задачи максимизации относительной массы полезного груза двухступенчатой РН с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При использовании представленной модели были проведены оценочные расчеты влияния типа системы спасения на относительную массу полезного груза двухступенчатой РН на

компонентах топлива жидкий кислород – керосин. Результаты расчетов приведены в табл. 3. В расчетах для второй ступени РН значения соответствующих коэффициентов принимались равными: $k_{m\text{cc}2}=1$; значения коэффициентов $a_2'' = a_2$ рассчитывались по выражению (2); $\varepsilon_{\text{cc}2}=0$; значения коэффициентов $K_{0\text{cci}} = K_{02}$ рассчитывались по выражению (3).

В табл. 3 $\Delta\bar{m}_{\text{пн}}$ представляет относительное расхождение между параметром $\bar{m}_{\text{пн}}$ для вариантов ССПРД, ССКРБ, ССРРБ и варианта без системы спасения и позволяет подобрать способ спасения первой ступени РН в условиях ограничения на требуемое значение массы выводимой полезной нагрузки.

Таблица 3

Влияние типа СС первой ступени на относительную массу полезной нагрузки

Параметр	Без СС	ССПРД	ССКРБ	ССРРБ
\bar{m}_{T1}	0,756	0,711	0,56	0,575
\bar{m}_{T2}	0,758	0,797	0,856	0,851
$\bar{m}_{\text{пн}}$	0,025	0,0201	0,0101	0,0119
$\Delta\bar{m}_{\text{пн}}$	0	-0,196	-0,596	-0,524

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показывает, что наименьшее влияние на относительную массу полезного груза оказывает парашютная система спасения, несмотря на то, что ее масса составляет до 30% от сухой массы ракетного блока. Схемы спасения ССКРБ и ССРРБ приводят к снижению массы полезного груза до 60%. Это обусловлено необходимостью использования топлива для работы ступени на этапе возвращения.

Указанный подход может использоваться для анализа влияния систем спасения других типов, если известны параметры относительной массы системы спасения, рассчитываемой от сухой массы ракетного блока, а также относительные дополнительные запасы топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модифицированная энергомассовая модель позволяет учитывать влияние параметров системы спасения РБ первой ступени РН на относительную массу полезной нагрузки при решении задачи минимизации затрат на выведение полезной нагрузки. Кроме того, указанная модель может быть использована для исследования чувствительности изменения массы полезной нагрузки РН к изменению массовых и геометрических параметров системы спасения РБ.

Предварительный анализ влияния массовых параметров систем спасения различного типа на относительную массу полезной нагрузки показал, что наименьшее влияние оказывает парашютная система спасения ракетного блока первой ступени.

При проведении дальнейших исследований целесообразно изучить чувствительность разработанной модели к параметрам системы спасения. Дальнейший выбор типа системы спасения должен быть сопряжен с привлечением технико-экономических моделей, например рассмотренных в работе [10].

Список используемых источников

1. *Медведев А.А.* Предложения по повышению конкурентоспособности ракет-носителей среднего и тяжелого классов за счет применения многоразовых элементов в отечественных средствах выведения // Космонавтика и ракетостроение. – 2018. – № 3(102). – С. 111–121.

2. *Кузнецов И.И., Шохов Г.В.* Перспективный способ спасения многоразовой первой ступени ракеты-носителя, работающей на основе жидкого топлива // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2016. – № 7(92). – С. 37–41.
3. *Нестеров В.Е., Кузин А.И., Лехов П.А.* Многоразовые ракеты-носители – дальнейший этап развития ракетно-транспортных систем // *Авиакосмическая техника и технология*. – М.: ИИИ. – 2010. – № 1. – С. 1–8.
4. *Кузнецов Ю.Л., Украинцев Д.С.* Анализ влияния схемы полета ступени с ракетно-динамической системой спасения двухступенчатой ракеты-носителя среднего класса // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2016. – № 1(15). – С. 73–80.
5. *Прокопенко Е.А., Пирогов С.Ю.* Методика энергомассового анализа двухступенчатой ракеты-носителя, оборудованной системой спасения ступеней // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2018. – Вып. 665. – С. 231–236.
6. *Баранов Д.А., Еленев В.Д.* Определение массово-энергетических соотношений для параметрического ряда модификаций ракеты-носителя // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2011. – № 2(26). – С. 10–17.
7. *Шилимов В.Ф., Плясунов А.А.* Проектирование ракет: учеб. пособие. – Ленинград: ВИКИ имени А.Ф. Можайского, 1982. – Вып. 1: Энергомассовый анализ ракет. – 80 с.
8. *Аэрогидродинамика летательных аппаратов: учебник / А.С. Юрьев, И.Г. Грачёв, В.М. Низовцев и др.; под ред. А.С. Юрьева*. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – Ч.1: Газовая динамика и аэродинамика летательных аппаратов. – 435 с.
9. *Карп К.А., Кузнецов Ю.Л.* Синтез всеазимутальных ракет-носителей. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 124 с.
10. *Володин С.В.* Управление сроками, стоимостью и результатами наукоемких программ: На примере аэрокосмической отрасли. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 176 с.

Д.А. Баранов,
кандидат техн. наук;
Р.Р. Казаков,
кандидат техн. наук;
А.Н. Миронов,
доктор техн. наук, профессор;
О.Л. Шестопалова,
кандидат техн. наук, доцент

ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА СВОЙСТВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА КОСМИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

Описан формализованный метод определения состава множества свойств и соответствующего ему перечня показателей технического совершенства космического ракетного комплекса, основанный на методологическом приеме, заключающемся в формировании свойств качества процессов создания и функционирования объекта с использованием принципа последовательного системного анализа связей, процессов и свойств, выделяемых в системе его создания и функционирования. Метод позволяет сформировать условно полное множество единичных свойств технического совершенства космического ракетного комплекса и преобразовать его в усеченное подмножество существенных свойств, представляемых в виде дерева значимых свойств технического совершенства космического ракетного комплекса.

Ключевые слова: космический ракетный комплекс, система средств выведения.

ВВЕДЕНИЕ

Полнота состава, своевременность развертывания и восполнения орбитальных группировок космических аппаратов определяются возможностями системы средств выведения космических аппаратов военного и двойного назначения [1].

Под системой средств выведения будем понимать совокупность эксплуатируемых (применяемых или готовых к применению) ракет-носителей, разгонных блоков и иных средств, предназначенных для запуска космических аппаратов различного целевого назначения [2]. От состояния и возможностей системы средств выведения напрямую зависит уровень обороноспособности государства и эффективность функционирования его социально-экономического комплекса. Систему средств выведения можно с полным правом отнести к сложным техническим системам со всеми ее атрибутами: целостностью, эмерджентностью, сложностью и динамичностью структуры, неопределенностью [3, 4].

Основу системы средств выведения составляют космические ракетные комплексы (КРК). Под КРК понимается [5] совокупность базовой ракеты-носителя конкретного типа с ее возможными модификациями; технических средств; сооружений с техническими системами и коммуникациями, предназначенных для проведения заданной технологии работ с ракетами-носителями и (или) ракетами космического назначения, собранными на основе данной базовой ракеты-носителя; средств по их подготовке к пуску, содержанию в установленных готовностях, пуску и управлению на активном участке траектории полета.

В современных условиях крайне важно обеспечить передовой технический уровень отечественных КРК, который бы гарантировал безаварийное, своевременное восполнение состава существующих и перспективных ОК КА ВДН с выполнением ряда дополнительных требований по безопасности и экологичности процессов применения по назначению и технической эксплуатации. Данную задачу невозможно решить без разработки формализованного метода обоснования состава множества свойств технического совершенства (ТехС) КРК.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛНОГО МНОЖЕСТВА СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА КОСМИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

Базовой основой оценки качества любого объекта вообще и технического совершенства КРК в частности является выделение состава свойств, характеризующих способность объекта удовлетворять предъявляемым к нему требованиям (свойств качества или технического совершенства объекта).

В современной литературе, несмотря на достаточно большой объем работ, посвященный оценке и прогнозированию качества (см., например, [6 – 8]), вопросы обоснования номенклатуры свойств качества применительно к особенностям конкретного объекта на системном уровне глубоко не исследованы. Обычно и в научных работах, и в нормативных документах приводятся лишь перечень и состав основных групп показателей качества, например назначения, надежности, экономичности, безопасности, стандартизации и унификации и других, и даются общие рекомендации по их выбору в конкретных ситуациях. На практике такая задача, как правило, решается эвристически, на основе обработки результатов экспертного опроса. Исключение составляет работа [9], в которой предложено для обоснования перечня свойств качества процесса транспортирования использовать процедуру системного анализа связей и свойств составных частей транспортной системы.

По аналогии с подходом, описанным в [9], предложим формализованный метод определения состава множества свойств ТехС КРК, опирающийся на методологический прием, заключающийся в формировании свойств ТехС КРК на основе принципа последовательного системного анализа связей, процессов и свойств в системе создания и функционирования КРК.

На обобщенном уровне данный прием может быть пояснен следующей формальной схемой: «Система → Связь → Процесс → Единичное свойство → Значимое единичное свойство → Комплексное свойство → Дерево свойств».

Перечень и содержание основных этапов метода, реализующего данный методологический прием, представлены на рис. 1.

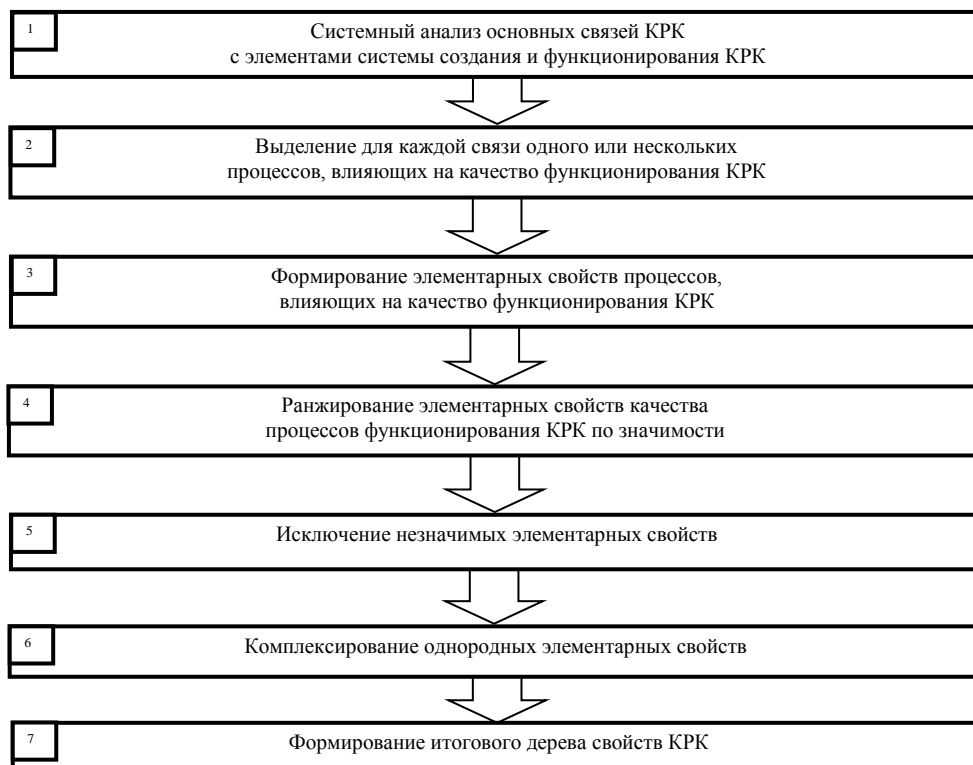


Рис. 1. Формализованный метод определения состава множества свойств ТехС КРК

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Начальным этапом анализа является изучение основных связей между элементами системы создания и функционирования КРК. При этом обобщенная структура системы создания и функционирования КРК может быть представлена в виде четырех элементов, взаимодействующих между собой, а именно: космического ракетного комплекса, противника (Пр), производственного комплекса (ПрК) и среды функционирования (Ср). Структура такой системы представлена на рис. 2.

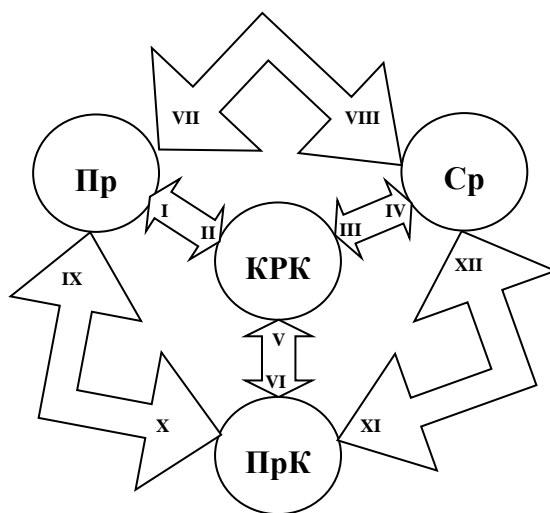


Рис. 2. Обобщенная структура создания и функционирования КРК

Выделим полное множество связей между элементами представленной на рис. 2 системы.

I. Связь «КРК – Противник» (КРК→Пр); II. Связь «Противник – КРК» (Пр→КРК); III. Связь «Среда – КРК» (Ср→КРК); IV. Связь «КРК – Среда» (КРК→Ср); V. Связь «Производственный комплекс – КРК» (ПрК→КРК); VI. Связь «КРК – Производственный комплекс» (КРК→ПрК); VII. Связь «Среда – Противник» (Ср→Пр); VIII. Связь «Противник – Среда» (Пр→Ср); IX. Связь «Производственный комплекс – Противник» (ПрК→Пр); X. Связь «Противник – Производственный комплекс» (Пр→ПрК); XI. Связь «Среда – Производственный комплекс» (Ср→ПрК); XII. Связь «Производственный комплекс – Среда» (ПрК→Ср)».

Далее выполним декомпозицию основных элементов (КРК, Пр, ПрК) на составные части с целью уточнения структуры процессов и соответствующих им свойств качества КРК на более детальном уровне рассмотрения.

Пример возможной декомпозиции приведен на рис. 3, из которого видно, что число анализируемых связей увеличилось с двенадцати (рис. 2) до двадцати трех (рис. 3).

На следующем этапе для каждой из выделенных 23 связей необходимо рассмотреть протекающие в системе процессы, прямо или косвенно влияющие на качество создания и функционирования КРК. Для каждого такого процесса выделяются частные свойства, называемые далее единичными свойствами качества. Приведем несколько поясняющих примеров.

Например, для связей № 7 и № 9 БР – РН (боевой расчет – ракета-носитель) основными процессами являются процессы технической эксплуатации РН, включающие вложенные процессы приведения РН в состояние готовности к применению и поддержания в готовности к применению.

Единичным свойством качества КРК, характеризующим качество приведения РН в состояние готовности к применению, является техническая готовность РН, которая отражает приспособленность РН к приведению из произвольного начального состояния в состояние

готовности к применению по назначению. Процесс поддержания РН в готовности к применению предполагает проведение операций контроля технического состояния, диагностирования отказов, технического обслуживания и ремонта РН.

Свойством, характеризующим качество процесса поддержания РН в готовности к применению является эксплуатационная технологичность РН, в свою очередь включающая единичные свойства контролепригодности, ремонтпригодности, а также свойство экономичности эксплуатации РН.

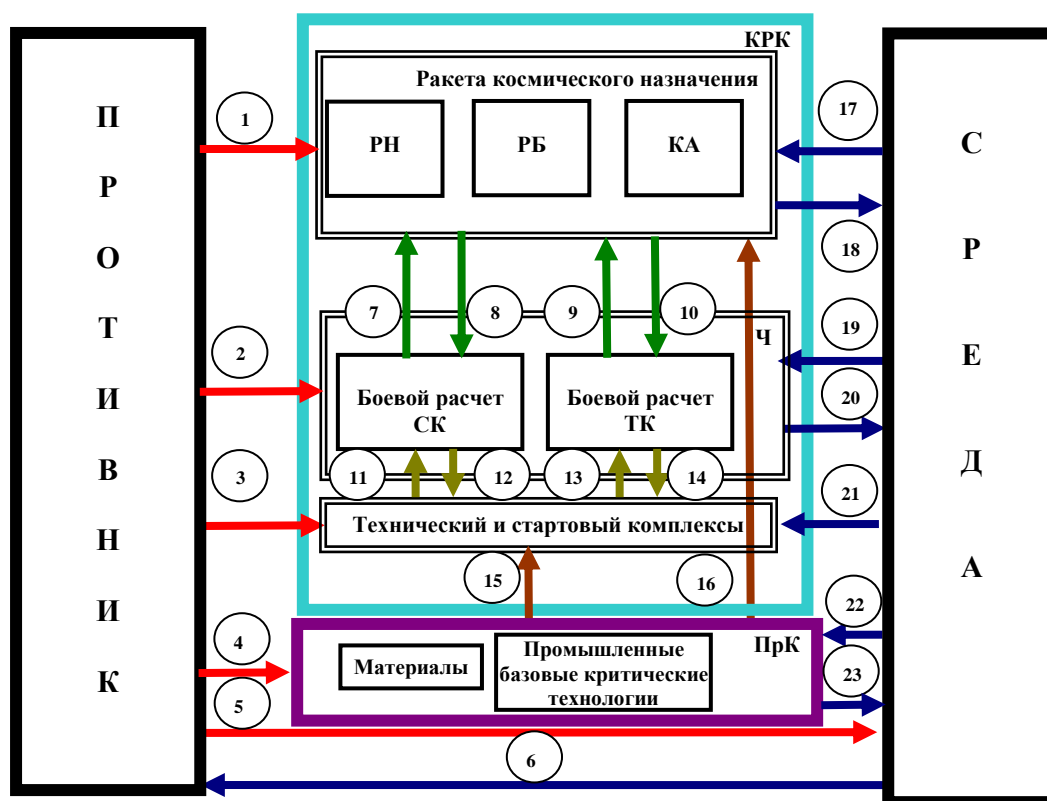


Рис. 3. Структурная схема КРК, полученная на основе его декомпозиции

Экономичность эксплуатации, в свою очередь, может быть декомпозирована на единичные свойства трудоемкости, материалоемкости, энергоемкости и себестоимости эксплуатации. К дополнительным свойствам в рамках рассматриваемой связи можно отнести квалифицированность эксплуатирующего РН персонала.

Для связи № 4 Пр→ПрК (противник – производственный комплекс) основными процессами являются процессы обеспечения необходимой устойчивости отечественного оборонно-промышленного комплекса от воздействия косвенных факторов, отражающих влияние противника политико-экономическими методами (например, санкциями) на технологические возможности и экономические параметры отечественного производства.

К единичным свойствам данных процессов можно отнести *патентно-правовую независимость, импортнезависимость по материалам, технологиям и комплектующим, а также кадровую независимость оборонно-промышленного комплекса от зарубежных структур.*

АНАЛИЗ МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Описанный выше метод позволяет построить условно полную структуру системы единичных свойств, определяющих техническое совершенство существующих и перспективных КРК, однако имеет две особенности.

Во-первых, не все единичные свойства обладают одинаковой важностью с точки зрения влияния на качество КРК как объекта вооружения и военной техники и нуждаются в ранжировании. Во-вторых, наблюдается дублирование отдельных свойств по различным связям, что обуславливает целесообразность применения процедуры их комплексирования по принципу объединения в группы однородных свойств.

Поэтому для ранжирования единичных свойств по важности в рамках рассматриваемого метода целесообразно построить отношение ранжирования на множестве единичных свойств с применением нечеткой непосредственной численной оценки альтернатив, отличающейся трехэтапной процедурой построения отношения ранжирования на множестве единичных свойств с последовательным переходом от нечетких оценок количественной степени предпочтительности единичных свойств по значимости к четким интервальным оценкам и, наконец, к четким точечным оценкам весовых коэффициентов единичных свойств.

Способ трехэтапного ранжирования единичных свойств по важности позволяет упростить для эксперта процедуру выбора значения степени предпочтительности единичного свойства, перейдя от процедуры выбора точечного числа на множестве чисел, что может вызвать определенные затруднения, к последовательному выбору области с нечеткими границами, затем – к интервалу с четкими границами и, наконец, к четкому числу.

Знание четких точечных оценок весовых коэффициентов единичных свойств позволяет решить задачу формирования подмножества значимых единичных свойств путем отбрасывания незначимых свойств, весовой коэффициент которых меньше заданного порогового значения.

Заключительным этапом предложенного метода формирования номенклатуры свойств ТехС КРК является выполнение эвристической процедуры комплексирования единичных свойств по принципу объединения в группы однородных свойств, которая заканчивается построением дерева свойств ТехС КРК и выделением для них группы показателей технического совершенства КРК.

Пример такого дерева приведен на рис. 4. На данном дереве показаны 40 единичных свойств, выделенных на предыдущем этапе анализа 23 связей.

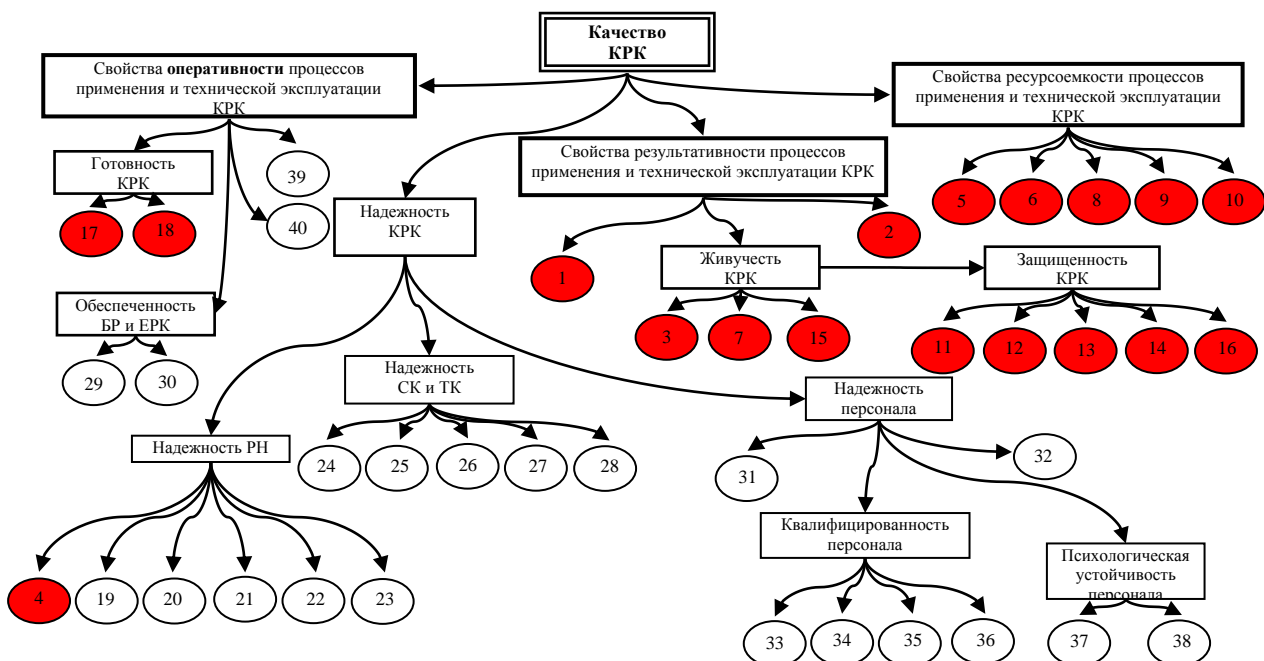


Рис. 4. Дерево свойств ТехС КРК

Единичные свойства объединены в группы однородных свойств. Кроме того, на рис. 4 выделены заливкой значимые единичные свойства, отражающие те свойства качества, которые, по мнению экспертов, представляют особую значимость на рассматриваемом интервале жизненного цикла КРК. В итоге, на основании составленного дерева свойств ТехС КРК далее можно естественным образом сформировать множество показателей технического совершенства КРК, используя при этом стандартные процедуры для каждой из групп однородных свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье описан метод обоснования состава множества свойств технического совершенства космического ракетного комплекса, основанный на системном анализе процесса формирования свойств качества, отличающийся применением нового способа формирования множества единичных свойств качества КРК, опирающийся на принцип «последовательного системного анализа связей, процессов и свойств» в системе создания и функционирования КРК. При этом применен способ нечеткой непосредственной численной оценки весов единичных свойств качества КРК с трехэтапной (нечетко-интервально-точечной) процедурой построения отношения ранжирования; введено правило формирования подмножества значимых единичных свойств, когда отбрасываются незначимые свойства, весовой коэффициент которых меньше заданного обоснованного порогового значения. Метод позволяет выделить полное множество единичных свойств технического совершенства КРК и преобразовать его в усеченное подмножество существенных свойств, представляемых в виде дерева значимых свойств технического совершенства КРК.

Список используемых источников

1. *Миронов А.Н., Сизяков Н.П., Шестопалова О.Л.* Обеспечение качества функционирования системы космического информационного обеспечения на основе оптимального распределения запусков космических аппаратов по элементам системы средств выведения // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2018. – № 4 (44). – С. 13–21. – URL:[http://iea.gostinfo.ru/2018_04\(44\)](http://iea.gostinfo.ru/2018_04(44)) (дата обращения: 09.09.2020).
2. Формирование требований к перспективной системе средств выведения космических аппаратов на основе нечеткой прогнозной информации о целях и ограничениях развития / О.П. Фролов, С.В. Загорный, Н.П. Сизяков, О.Л. Шестопалова // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 212–219.
3. Военная системотехника и системный анализ: учебник / под ред. Б.В. Соколова. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999.
4. *Москвин Б.В.* Принятие решений в сложных военно-технических системах. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2004. – 148 с.
5. *Сердюк В.К.* Проектирование средств выведения космических аппаратов: учеб. пособие для вузов / под ред. А.А. Медведева. – М.: Машиностроение, 2009. – 504 с.
6. *Семенов С.С.* Оценка качества и технического уровня сложных систем: Практика применения метода экспертных оценок. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 352 с.
7. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем / С.С. Семенов, Е.М. Воронов, А.В. Полтавский, А.В. Крянев // под ред. д-ра техн. наук, проф. Е.Я. Рубиновича. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 520 с.
8. *Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И.* Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. – М.: Радио и связь, 2004. – 552 с.

9. Оценивание качества транспортирования на основе совокупности вероятностно-статистических и нечетких экспертных оценок показателей потребительских свойств транспортной услуги / А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова, Ю.М. Ниязова, Д.А. Сидоров // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2017. – № 6 (40). – С. 13–34. – URL:[http://iea.gostinfo.ru/2017_06\(40\)](http://iea.gostinfo.ru/2017_06(40)) (дата обращения: 09.09.2020).

М.А. Бубликов;
Г.М. Завьялова,
кандидат техн. наук, доцент;
Е.Л. Лебедев,
доктор техн. наук, профессор

ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ГАЛЛИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В работе представлен анализ возможности применения галлия и сплавов на его основе в качестве теплоаккумулирующих материалов для обеспечения термической стабилизации бортовых систем космических аппаратов. Представлены результаты исследования термических кривых галлия и сплавов на его основе, данные по термодинамике этих сплавов и их теплофизическим свойствам.

Ключевые слова: теплоаккумулирующий материал, галлий, парафин, фазовое превращение, эвтектика.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения требуемых условий надежного функционирования бортовых систем космических аппаратов весьма актуальным является рассмотрение вопросов применения на их борту тепловых аккумуляторов. Необходимость в тепловых аккумуляторах обусловлена наличием пиковых нагрузок при функционировании бортовой аппаратуры и требованием поглощения выделяемой при этом тепловой энергии для недопущения нагрева элементов бортовых систем выше допустимого значения температуры.

Принцип функционирования тепловых аккумуляторов основан на поглощении тепловой энергии, выделяемой бортовой аппаратурой, рабочим телом – теплоаккумулирующим материалом (ТАМ). Механизмами поглощения тепловой энергии при использовании теплоаккумулирующего материала могут быть теплоемкостный механизм, когда затраты поглощаемого тепла расходятся на его нагрев (процесс осуществляется без фазовых превращений), а также фазовый – затраты поглощаемого тепла расходятся на фазовые превращения (плавление-кристаллизация, аллотропические превращения).

В качестве теплоаккумулирующего материала сегодня в основном применяют парафины различных модификаций [1–3], а также композиционные материалы со специальными свойствами (например, формосохранение), которые также созданы на основе парафинов [4].

Применение парафинов обусловлено тем, что температура их фазовых превращений (плавления-кристаллизации без аллотропических превращений) в зависимости от их состава может изменяться и находится в требуемом диапазоне от 0 до 50⁰С. Но следует отметить, что опыт применения парафинов в качестве термоаккумулирующих материалов выявил ряд их существенных недостатков [3, 4], таких как:

- низкая плотность парафинов, обуславливающая большой объем конструкции аккумулятора при использовании потребной массы теплоаккумулирующего материала;
- недостаточная теплопроводность для обеспечения быстрого и равномерного поглощения тепловой энергии, что приводит к необходимости применения теплообменника с дополнительными ребрами для увеличения поверхности теплообмена (рис. 1), при этом наличие данных ребер приводит к утяжелению конструкции;
- отсутствие смачивания парафинами поверхности теплообменника, что приводит к дополнительному снижению теплопроводности на границе раздела сред теплообменник-теплоаккумулирующий материал;

– изменение объема парафиносодеждающих теплоаккумулирующих материалов при кристаллизации, что является причиной образования пустот, трещин и, в свою очередь, приводит к недостаточному теплообмену.

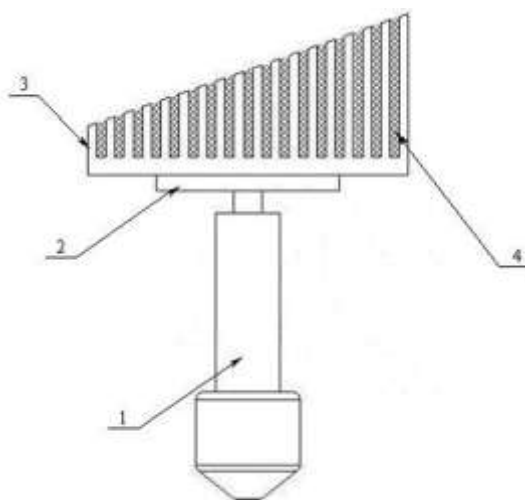


Рис. 1. Общий вид теплового аккумулятора с дополнительными ребрами для увеличения поверхности теплообмена [4]:

- 1 – источник тепловой энергии;
- 2 – теплоотвод;
- 3 – корпус теплового аккумулятора с дополнительными ребрами;
- 4 – теплоаккумулирующий материал

физические свойства галлия, термодинамика сплавов на его основе и проведен анализ возможности применения галлийсодержащих сплавов в качестве теплоаккумулирующего материала для обеспечения теплового режима бортовых систем космических аппаратов.

ТЕРМОДИНАМИКА ГАЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ И ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Применение галлия как основы термоаккумулирующего материала обосновано в первую очередь его способностью образовывать сплавы – как твердые растворы, так и механические смеси с металлами II–IV групп Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. При этом температуры плавления получаемых сплавов находятся в интервале температур, допустимых для функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Кроме этого, особые свойства галлию, как основе термоаккумулирующего материала, может обеспечить его полиморфизм. В зависимости от внешних условий галлий суще-

В качестве альтернативы парафиносодеждающим теплоаккумулирующим материалам в ряде работ [5–7] рассматриваются некоторые металлы и их сплавы с фазовым механизмом поглощения тепловой энергии, а именно: эвтектики K-Na, Al-Si-Cu, Al-Si-Ni, Al-Si-Mg, Li-Pb. Однако следует заметить, что данные сплавы легко воспламеняются на воздухе, что приводит к повышенной аварийности при производстве космических аппаратов, кроме того, температуры их фазовых превращений не находятся в требуемом диапазоне температур 0–50°С.

Перспективным и целесообразным направлением в производстве теплоаккумулирующих материалов является разработка новых тепловых аккумуляторов на основе галлия, которые лишены многих вышеперечисленных недостатков. Температура плавления галлия составляет 29,9°С. Галлий является нетоксичным металлом с давлением насыщенных паров более чем в 30 раз ниже, чем у ртути. По своим теплофизическим и технологическим свойствам тепловые аккумуляторы на основе галлия позволяют обеспечить как безопасное производство аккумуляторов, так и их безопасное применение при функционировании бортовых систем космических аппаратов. В данной статье представлены тепло-

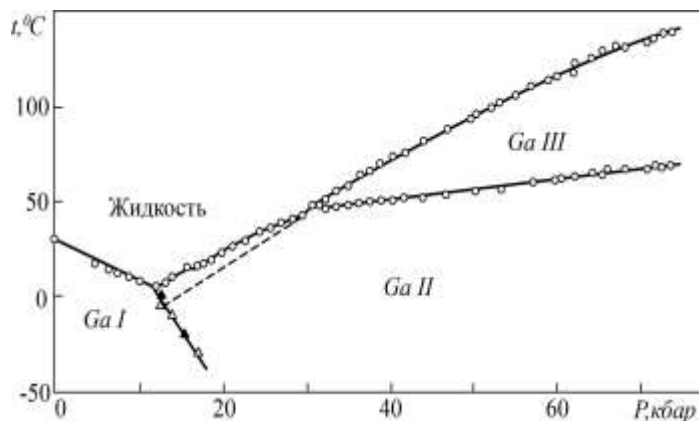


Рис. 2. Фазовая диаграмма галлия при различных значениях давления и температуры [8]

ствуется в нескольких модификациях. При атмосферном давлении стабильной фазой галлия является орторомбическая кристаллическая структура, обозначаемая α -Ga (Ga I). При повышении давления наблюдаются аллотропические превращения в структуры, близкие к структуре индия (тетрагональная кристаллическая решетка). Данные модификации обозначаются как β -Ga (Ga II, Ga III и т.д., всего у галлия имеется восемь модификаций). Фазовая диаграмма галлия показана на рис. 2. Следует отметить, что в сплавах на основе галлия наблюдаются аллотропические превращения при значениях давления и температуры, близких к значениям рабочих параметров бортовых систем при функционировании космических аппаратов. В этом случае в работе теплового аккумулятора может быть реализован не только теплоемкостный, но и фазовый (за счет аллотропических превращений, а не только плавления) механизм поглощения тепловой энергии теплоаккумулирующим материалом. Теплофизические свойства галлия и парафинов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные теплофизические свойства парафинов [1, 5-7] и галлия [8, 9]

ТАМ	Свойства									
	Температура плавления, °С	Кэф. теплопроводности, Вт/(м·К)	Уд. теплоемкость, кДж/(кг·К)		Плотность, 10 ⁻³ кг/м ³		Изменение объема при фазовом изменении, %	Объемная теплоемкость, 10 ⁻³ кДж/(м ³ ·К)		Теплота плавления, кДж/кг
			тв.	ж.	тв.	ж.		тв.	ж.	
Парафины	10–50	0,15–0,25	2,1	2,1	0,8	0,9	15	1,68	1,89	150–200
Ga	29,9	21	0,37	0,41	5,91	6,09	3,4	2,2	2,5	78

Согласно представленным данным, коэффициент теплопроводности галлия значительно выше аналогичного коэффициента парафинов. Это позволяет теплоаккумулирующему материалу на основе галлия более равномерно – по всему объему аккумулировать выделяемую тепловую энергию. Парафины по причине низкой теплопроводности будут, в основном, воспринимать выделяемую тепловую энергию только тем объемом (массой), который непосредственно примыкает к источнику тепла, что может привести к его перегреву. Также следует отметить, что изменение объема при фазовом изменении галлия значительно меньше, чем у парафина. Это позволяет сделать вывод, что при использовании в качестве термоаккумулирующего материала сплавов на основе галлия в процессе его кристаллизации давление на корпус теплового аккумулятора будет ниже, чем при использовании для этих целей парафинов.

Важным является то, что удельная теплоемкость парафинов больше, чем у галлия. Поэтому при реализации теплоемкостного механизма поглощения тепловой энергии температура теплоаккумулирующего материала из парафинов (определенной массы) будет повышаться медленнее, чем для галлийсодержащих сплавов. Однако следует отметить, что плотность галлия выше плотности парафинов в 6-7 раз, а удельная теплоемкость парафинов превосходит данный показатель галлия только в 5-6 раз, следовательно, объемная теплоемкость галлия выше, чем объемная теплоемкость парафинов примерно на 30 %.

При рассмотрении реализации фазового механизма поглощения тепловой энергии необходимо учитывать, что значение теплоты плавления парафинов выше, чем у галлия, но так как плотность галлия выше, следовательно, определенный объем теплоаккумулирующего материала на основе галлия будет поглощать тепловую энергию при фазовых превращениях на 250–300 % больше, чем теплоаккумулирующий материал на основе парафинов того же объема.

Таким образом, если при проектировании космического аппарата необходимо обеспечить теплоаккумулирующий материал определенной массы, то предпочтение имеют парафины. При реализации объемного критерия для проектирования космического аппарата галлийсодержащий сплав сможет аккумулировать тепловую энергию на 30 % больше при теплоем-

костном механизме и на 250–300 % больше при фазовом механизме поглощения тепловой энергии, чем парафин того же объема, хотя его масса будет меньше.

Поскольку конструкция тепловых аккумуляторов, использующих парафины, должна иметь ребра для обеспечения требуемой теплопроводности (см. рис. 1), а при использовании сплавов на основе галлия данные ребра не требуются (принимая во внимание высокий коэффициент теплопроводности галлия), следовательно, учитывая массу данных ребер, преимущество в массе парафиновых тепловых аккумуляторов будет сомнительным или незначительным.

Как было указано, для изменения температуры фазового перехода галлийсодержащих термоаккумулирующих материалов необходимо использовать его сплавы. Диаграммы сплавов на основе галлия, у которых температуры плавления эвтектик близки к требуемому диапазону, показаны на рис. 3.

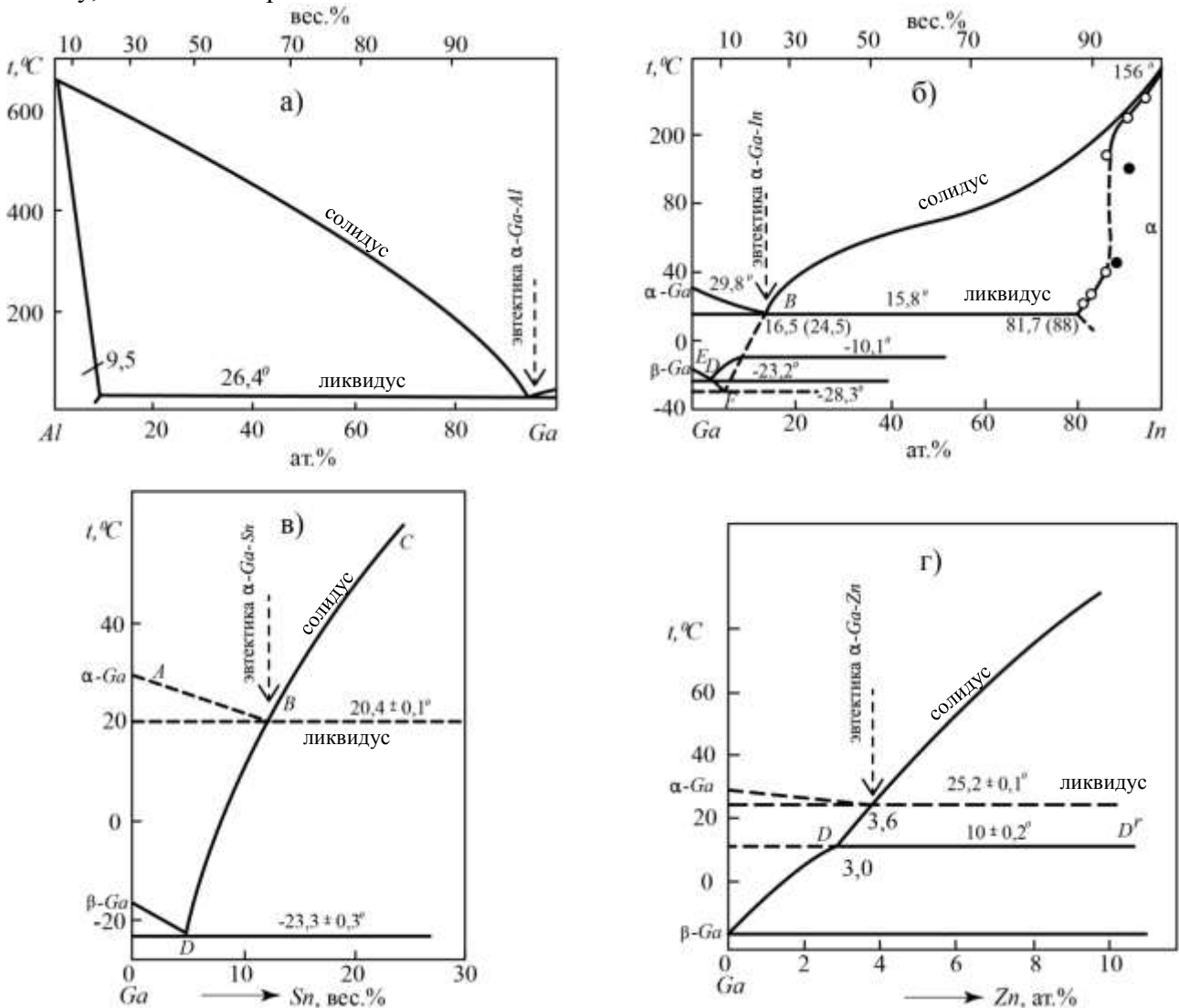


Рис. 3. Диаграммы состояния систем [8, 9]:

а – галлий-алюминий; б – галлий-индий; в – галлий-олово (фрагмент);
г – галлий-цинк (фрагмент)

Представленные на рисунках диаграммы отражают состояние простых бинарных эвтектических систем с ограниченной областью твердых растворов. Для данных систем изобарный потенциал соответствующего твердого компонента, находящегося в равновесии с жидким сплавом, изменяется с температурой и подчиняется уравнению равновесия Гиббса – Гельмгольца с учетом энтальпии и энтропии составляющих сплава. Поэтому температуры начала и

конца кристаллизации получаемых сплавов определяются по линиям ликвидус и солидус, а для определения теплофизических свойств сплавов возможно учитывать только пропорциональные соотношения их компонентов.

Теплофизические свойства указанных легирующих элементов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные теплофизические свойства легирующих элементов для формирования галлийсодержащего термоаккумулирующего материала [10]

Легирующие элементы	Свойства				
	Температура плавления, °С	Коэф. теплопроводности, Вт/(м·К)	Уд. теплоемкость, кДж/(кг·К)	Плотность, 10 ⁻³ кг/м ³	Теплота плавления, кДж/кг
Al	660	180	0,9	2,69	390
In	156	63	0,23	7,28	42
Sn	231	42	0,23	7,3	84
Zn	420	86	0,39	7,14	102

Согласно представленной диаграмме (рис. 3,а) и данным табл. 3, эвтектический сплав галлий-алюминий (~3% Al) имеет температуру плавления 26,4⁰С. При изменении соотношения компонентов, характерного для эвтектического сплава, наблюдается увеличение температуры начала кристаллизации данных сплавов по линии ликвидус, при этом в доэвтектических сплавах сначала кристаллизуется алюминий, а жидкая фаза стремится к эвтектике, в заэвтектических сплавах первым будет кристаллизоваться галлий. Кристаллизация и плавление эвтектического сплава осуществляется при одной температуре плавления. На кривой нагрева (остывания) будет наблюдаться горизонтальный участок – неизменное значение температуры при плавлении (кристаллизации) эвтектического сплава. Время, в течение которого температура будет сохранять свое значение, зависит от теплоты плавления сплава. На кривой нагрева (остывания) до- и заэвтектических сплавов горизонтального участка не наблюдается, но при превышении значения температуры выше линии солидус скорость роста температуры будет снижена. Поскольку у алюминия теплота плавления выше, а плотность ниже, чем у галлия, то получаемый сплав будет легче галлия и с повышенной теплотой плавления.

Для систем сплавов галлия с индием, оловом и цинком (см. рис. 3,б, в, г) характерно наличие аллотропических превращений α -Ga – β -Ga, при этом температуры эвтектических сплавов составляют: в системе β -Ga-In – около -23,2⁰С; β -Ga-Sn – около -23,3⁰С; β -Ga-Zn – около 10⁰С. Наличие аллотропических превращений способствует стабилизации температуры функционирующего оборудования, поскольку аккумулируемая галлийсодержащим сплавом тепловая энергия будет тратиться не на повышение температуры, а на преобразование кристаллических решеток α -Ga в β -Ga. Для модификации α -Ga эвтектические сплавы (In≈10%, Sn≈17%, Zn≈4%) имеют следующие температуры плавления: α -Ga-In – около 15,8⁰С; α -Ga-Sn – около 20,4⁰С; α -Ga-Zn – около 25,2⁰С. Динамика кристаллизации до- и заэвтектических сплавов данных систем аналогична кристаллизации сплавов галлий-алюминий. Температура начала кристаллизации будет определяться по линиям ликвидус, но в доэвтектических сплавах первым будет кристаллизоваться галлий, а в заэвтектических – легирующий элемент (In, Sn, Zn).

Возможно дополнительное снижение температуры плавления эвтектических сплавов. Для этого предлагается использование не бинарных, а тройных или четверных сплавов на основе галлия.

Термодинамика многокомпонентных сплавов, элементы которых образуют эвтектические системы с ограниченной областью твердых растворов, так же как и бинарные системы, под-

чиняется принципу равновесия изобарных потенциалов фаз сплава с учетом энтальпии и энтропии его элементов. Поскольку энтропия системы будет повышаться при увеличении числа ее компонентов, то получаемый тройной или четверной сплав будет отвечать большей степени беспорядка, чем указанные на рис. 3 бинарные сплавы. В этом случае справедливо ожидать снижение температуры фазовых превращений (плавления) по сравнению с температурами фазовых превращений бинарных сплавов.

На рис. 4 представлена зависимость температуры галлия и его сплавов массой 130 гр от времени при одинаковой мощности нагрева. Показано, что при теплоемкостном механизме аккумулирования тепла температура теплоаккумулирующего материала возрастает, при фазовом механизме тепловая энергия расходуется на плавление материала и его температура остается постоянной, при этом температура фазового преобразования (плавления) четверного сплава Ga-In-Sn-Zn составляет около 9°C .

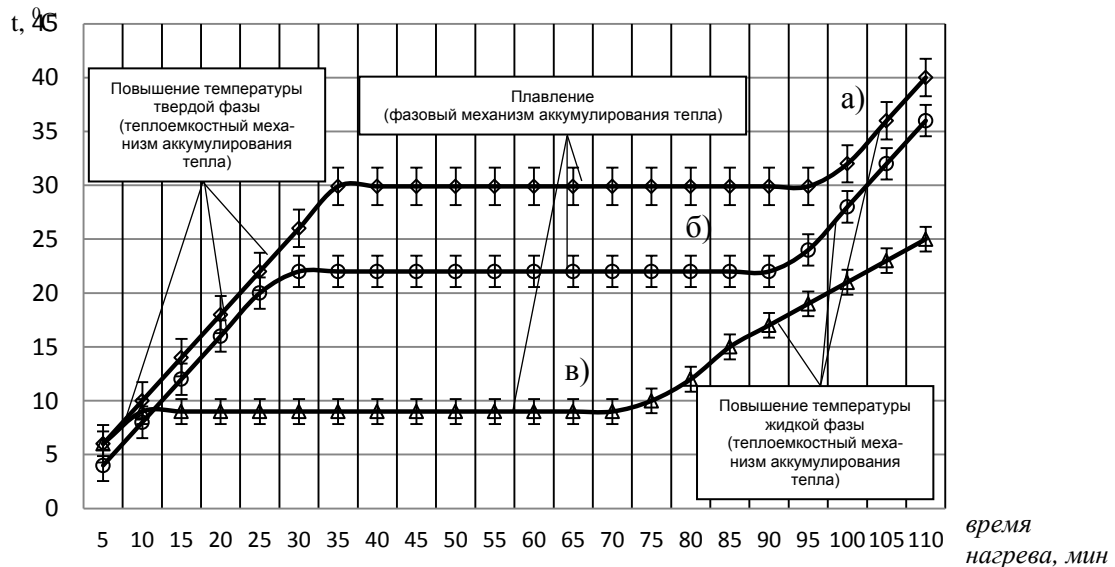


Рис. 4. Термические кривые нагрева:
а – галлий; б – эвтектика Ga-Sn; в – эвтектика Ga-In-Sn-Zn

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

- теплоаккумулирующие материалы на основе галлия позволяют использовать механизм поглощения тепловой энергии как теплоемкостный, так и фазовый, вследствие того, что у них имеются эвтектики и аллотропические превращения;
- высокая теплопроводность галлия позволяет более равномерно по всему объему аккумулировать выделяемую тепловую энергию;
- объемная теплоемкость галлия выше, чем объемная теплоемкость парафинов примерно на 30 %;
- определенный объем ТАМ на основе сплавов галлия будет поглощать тепловую энергию на 250–300 % больше, чем ТАМ на основе парафинов того же объема, но при меньшей массе последнего;
- формирование многокомпонентных сплавов на основе галлия позволят снижать температуру плавления их эвтектик.

Список используемых источников

1. *Алексеев В.А.* Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. – М.: Энергия, 1975.
2. *Алексеев В.А., Малоземов В.В.* Системы обеспечения теплового режима радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов // Полет. – 2000 – № 6. – С. 24–31.
3. Патент № 2236100. Устройство для охлаждения и термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих при циклических тепловых нагрузках / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Г.И. Аминов, Ш.А. Юсуфов. – Заявл. 19. 09.2002; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 10.09.2004.
4. *Алексеев В.А., Карабин А.Е.* Новый тип тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Труды МАИ. – 2018. – Вып. № 49. – URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/> (дата обращения: 11.03.2020).
5. Теплофизические свойства фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, применяемых в строительстве / И.О. Аймбетова, У.С. Сулейменов, М.А. Камбаров и др. // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 12, ч. 1. – С. 9–13.
6. *Резницкий Л.А.* Теплоаккумулирующие вещества и процессы // Журнал неорганической химии. – 1998. – Т. 43, № 8. – С. 1288–1298.
7. Термические свойства жидких сплавов литий-свинец околоэвтектического состава / Р.Н. Абдуллаев, А.Ш. Агажанов, Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, №2. – С. 257–234.
8. *Яценко С.П.* Галлий: взаимодействие с металлами. – М.: Наука, 1974.
9. *Щена И.А., Чаус И.С., Митюрева Т.Т.* Галлий. – Киев.: ГИТЛ УССР, 1963.
10. *Григорович В.К.* Электронное строение и термодинамика сплавов железа. – М.: Наука, 1970.

Е.Ю. Герасименко;
В.И. Поспишенко,
кандидат техн. наук;
Е.А. Прокопенко,
кандидат техн. наук

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Представлено описание стенда огневых испытаний модельных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Обозначены преимущества экспериментов на модельных двигателях перед испытаниями на полноразмерных штатных образцах ракетно-космической техники. Предложены перспективные методы контроля функционирования и испытаний ЖРД и результаты экспериментальных исследований, проводимых с целью их совершенствования.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, экспериментальный стенд, виброакустический способ контроля, электрофизический способ контроля.

ВВЕДЕНИЕ

Современные жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) являются дорогостоящими сложными техническими устройствами, неустойчивое функционирование которых может привести к срыву выполнения задачи на выведение полезного груза, а в случае аварии – к утрате дорогостоящего технологического оборудования.

На сегодняшний день с появлением высокопроизводительных программно-аппаратных средств контроля физических параметров и обработки результатов измерений открываются широкие возможности совершенствования методов контроля функционирования и испытаний ЖРД.

Вопросы разработки методов контроля технического состояния в большей степени связаны с экспериментальными исследованиями. Для изучения закономерностей изменения различных физических параметров, сопровождающих функционирование камеры сгорания как наиболее нагруженного и сложного по организации рабочего процесса составного элемента ЖРД, часто применяются модельные двигатели малых размеров.

Использование малоразмерного двигателя позволяет на стадии первоначальных исследований существенно сократить затраты ресурсов. Важным преимуществом модельных двигателей по отношению к штатным полноразмерным являются более широкие возможности по размещению датчиковой аппаратуры непосредственно в реакционной зоне. Малые значения параметров функционирования минимизируют ущерб при неблагоприятном исходе эксперимента до приемлемого уровня. Среди разрабатываемых в настоящее время перспективных способов контроля параметров функционирования ЖРД в данной работе для экспериментальных исследований выбраны электрофизический и виброакустический.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД

Метод основан на регистрации колебаний напряженности магнитного поля в окрестности факела ЖРД. Предпосылкой к развитию данного метода явилось наличие устойчивой зависимости напряженности магнитного поля струи продуктов сгорания от характера пульсации

давления в камере сгорания [1]. Метод отличается высокой чувствительностью по отношению к параметрам внутрикамерного процесса ЖРД и обеспечивает достижение высокой оперативности диагностирования режимов работы камер двигателя [2].

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД

В основе виброакустического способа лежит взаимосвязь колебательного движения конструкции агрегата и характера изменения во времени сил, действующих на него [3]. Механические колебания конструкции вызывают волны упругих деформаций, приводящих к колебательному движению точек на поверхности агрегатов. Информативными параметрами в данном методе являются параметры вибрации, такие как виброскорость, виброускорение.

СОСТАВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

В состав экспериментального стенда входят:

- камера сгорания модельного ЖРД;
- пневмогидравлическая система;
- система инициации процесса горения;
- система управления;
- информационно-измерительная система.

На рис. 1 представлена структурно-логическая схема взаимодействия систем стенда огневых испытаний модельных ЖРД.



Рис. 1 Структурно-логическая схема взаимодействия систем стенда огневых испытаний модельных ЖРД

КАМЕРА МОДЕЛЬНОГО ЖРД

Основным элементом лабораторной установки является модельная камера, общий вид которой представлен на рис. 2,а.

Разборная конструкция модельной камеры позволяет, в зависимости от задач эксперимента, реализовать различные параметры распыла горючей смеси, как путем изменения давле-

ния при подаче компонентов, так и за счет применения различных схем взаимного расположения форсунок, использовать различные типы форсунок горючего, окислителя, варьировать материалами (нержавеющая сталь, углеродистая сталь, бронза) и параметрами шероховатости огневой стенки со стороны газа благодаря применению ряда съемных огневых стенок (рис. 3), а также позволяет устанавливать в камере сгорания дополнительные измерительные средства.

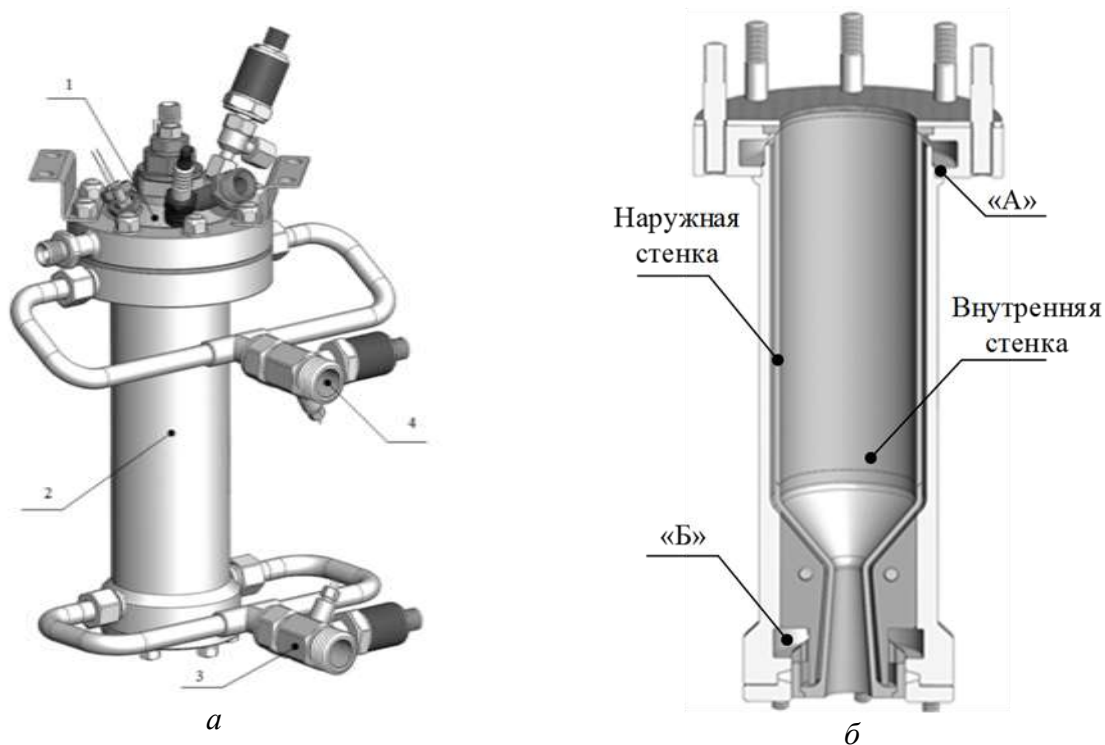


Рис. 2. Камера сгорания модельного ЖРД:

а – общий вид; *б* – сопловой блок; 1 – форсуночная головка в сборе; 2 – камера сгорания с сопловым блоком; 3, 4 – штуцеры подвода и отвода охладителя с датчиками давления и температуры соответственно; «А», «Б» – коллекторы отвода и подвода охлаждающей жидкости соответственно



Рис. 3. Набор огневых стенок модельной камеры сгорания

Конструкция форсуночной головки модельной камеры сгорания позволяет производить измерения температуры и пульсации давления непосредственно из реакционной зоны без вне-

сения возмущений в рабочий процесс (рис. 4), реализовать несколько схем взаимного расположения форсунок (рис. 5) и исследовать процессы горения в модельной камере при различных диаграммах распыла. В варианте с шестью форсунками окислителя в свободные отверстия могут устанавливаться дополнительные конструктивные элементы, индикаторы.

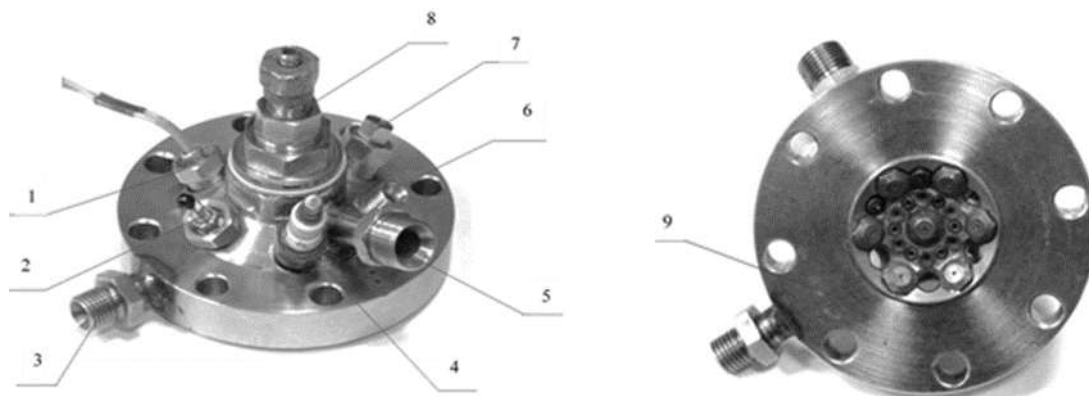


Рис. 4. Форсуночная головка:

1 – терморпара в корпусе; 2 – датчик динамического давления; 3 – щупец подвода горючего; 4 – свеча зажигания; 5 – щупец подвода окислителя; 6 – щупец тройника для низкочастотного датчика давления в камере сгорания показывающего манометра трубопровода продувки камеры; 7 – электронный микрофон в корпусе; 8 – центральная вставка; 9 – боковой канал

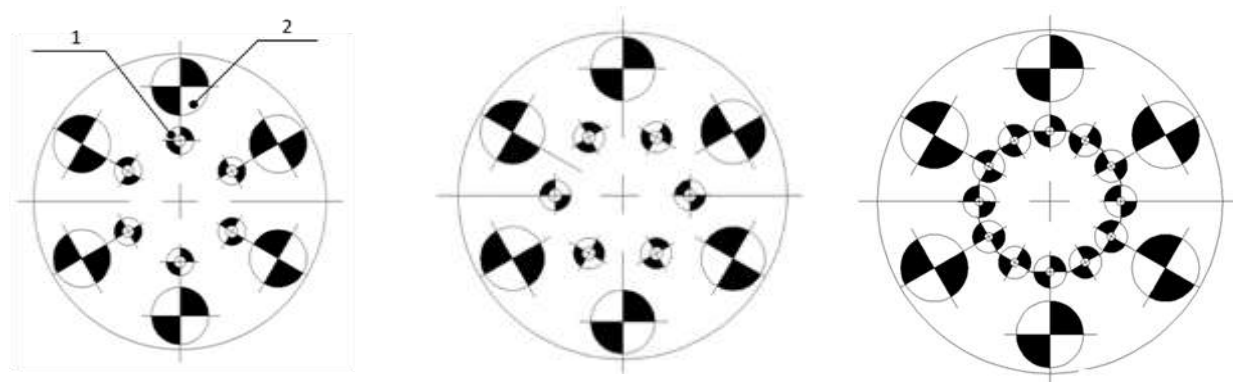


Рис. 5. Схемы размещения форсунок:

1 – форсунки горючего; 2 – форсунки окислителя

Для обеспечения функционирования модельной камеры используется вытеснительная система подачи топлива (СПТ), обеспечивающая давление в камере до 1,5 МПа. В качестве компонентов ракетного топлива (КРТ) используются газообразный кислород и спирт (96 %). Указанная пара компонентов соответствует условиям пожаровзрывобезопасности и экологичности. Вместе с тем используемые КРТ требуют применения электроискрового зажигания для воспламенения рабочей смеси, что в определенной степени усложняет конструкцию стенда. Значение расхода КРТ в камере находится в диапазоне 48,3–57,2 г/с. Величина коэффициента избытка окислителя варьируется в пределах 0,5–2,5.

Исследование внутрикамерных процессов проводится при различных вариациях давления в камере и коэффициента избытка окислителя. Варьирование параметрами реализуется за счет:

- изменения перепада давления на форсунках;
- использования форсунок с различными площадями проходных сечений.

Конструкция камеры позволяет производить замену огневых стенок. Образцы огневой стенки имеют одинаковую геометрию в пределах технологических допусков, но отличаются по типу материала и параметрам шероховатости со стороны газа. Данное свойство может быть использовано при исследовании процессов электризации камер и электромагнитных колебаний струи продуктов сгорания.

ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СХЕМА

Пневмогидравлическая система модельного ЖРД предназначена для подачи компонентов в камеру сгорания, регулирования работы двигателя, хранения компонентов топлива и сжатых газов, проведения подготовительных предпусковых операций, запуска, работы и выключения двигателя. Состоит из системы заправки и слива, системы подачи горючего, системы подачи окислителя, системы наддува и системы продувки камеры.

В установке применяется вытеснительный способ подачи компонентов топлива. Газообразный кислород (окислитель) из баллонов через газовый редуктор поступает в магистраль подачи компонента. Регулирование подачи, отсечки и расхода окислителя осуществляется переключением электроклапанов. Измерение текущего расхода газообразного кислорода осуществляется турбинным измерением объемного расхода газа и массовым тепловым расходомером, встроенными в магистраль подачи окислителя.

Горючее из бака вытесняется давлением азота и проходит к камере через сетчатый фильтр, дроссельную шайбу, турбинный расходомер. Расход горючего устанавливался давлением наддува бака горючего и подачей компонента через основную и предварительную магистрали путем переключения соответствующих электро-гидроклапанов.

В разработанной конструкции охлаждение огневой стенки камеры осуществляется водой. Система подачи воды – насосная. В процессе пуска вода через фильтр поступает на вход в межрубашечное пространство камеры, охлаждает стенки камеры сгорания и сбрасывается в емкость охлаждающей жидкости. На входе и выходе тракта охлаждения установлены датчики давления и температуры для регистрации потерь давления и подогрева охлаждающей жидкости.

Пневмогидравлическая схема позволяет варьировать основные режимные параметры работы ЖРД в следующих диапазонах:

- 1) давление в КС 0,8–1,5 МПа;
- 2) расход окислителя 28–40 г/с;
- 3) расход горючего 18–27 г/с;
- 4) коэффициент избытка окислителя 0,5–2,5.

Воспламенение топливной смеси в камере сгорания обеспечивает электроискровая система зажигания, состоящая из запального устройства (электросвеча), катушки зажигания и источника питания постоянного тока напряжением 12–24 В.

Исполнительными устройствами системы управления являются клапаны-регуляторы с электромеханическим приводом. Клапаны-регуляторы позволяют управлять как давлением в камере модельного двигателя, так и соотношением компонентов за счет изменения расхода обоих КРТ.

Возможность варьирования в широких пределах как соотношением компонентов, так и давлением позволяет, меняя состав продуктов сгорания, реализовывать различные режимы работы камеры, в том числе и неустойчивые.

Принципиальная схема пневмогидравлической системы ЖРДУ представлена на рис. 6.

Система управления экспериментального стенда предназначена для реализации заданной циклограммы работы, а также для безопасного запуска и выключения двигателя в автоматическом режиме. На рис. 7 показаны огневой бокс и пульт управления стенда огневых испытаний модельных ЖРД.

Исполнительными устройствами являются программируемый логический контроллер и клапаны-регуляторы с электрическим приводом. Клапаны-регуляторы позволяют регулировать соотношение компонентов посредством изменения расходов КРТ в широких диапазонах, что позволяет реализовывать различные режимы работы камеры, в том числе неустойчивые.

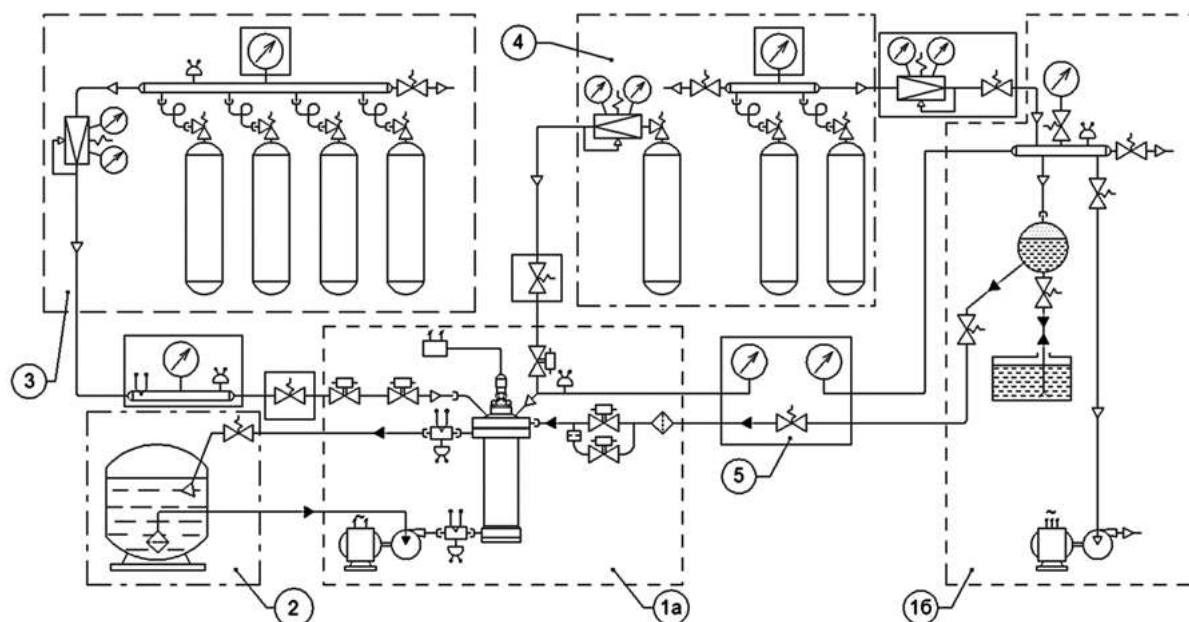


Рис. 6. Принципиальная схема пневмогидравлической системы ЖРДУ:
1а, 1б – элементы, размещенные в бронеканере; 2, 4 – оборудование, размещенное в ресиверной технической газов; 3 – кислородное хранилище; 5 – элементы ПГС, расположенные в пультовой



Рис. 7. Огневой бокс и пульт управления

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Информационно-измерительная система предназначена для измерения и регистрации необходимого для конкретного эксперимента объема параметров. В состав системы входят комплект датчиков, измерителей и преобразователей для регистрации термодинамических медленноменяющихся параметров (массовые расходы КРТ, давление и температура в маги-

стралях подачи), а также ряда быстроменяющихся параметров (пульсаций давления, параметров вибрации КС, колебаний напряженности магнитного поля струи продуктов сгорания), необходимых для исследования закономерностей, лежащих в основе методов контроля испытаний ЖРД. Структурная схема информационно-измерительной системы представлена на рис. 8.

Технический ресурс аппаратно-программных средств стенда огневых испытаний модельных ЖРД позволяет осуществить интеграцию информационно-измерительной системы и системы управления, обеспечивающих реализацию задач операторского интерфейса, регистрацию высокоскоростных потоков данных, циклограммы работы двигателя, аварийной защиты и контроллера единого реального времени.

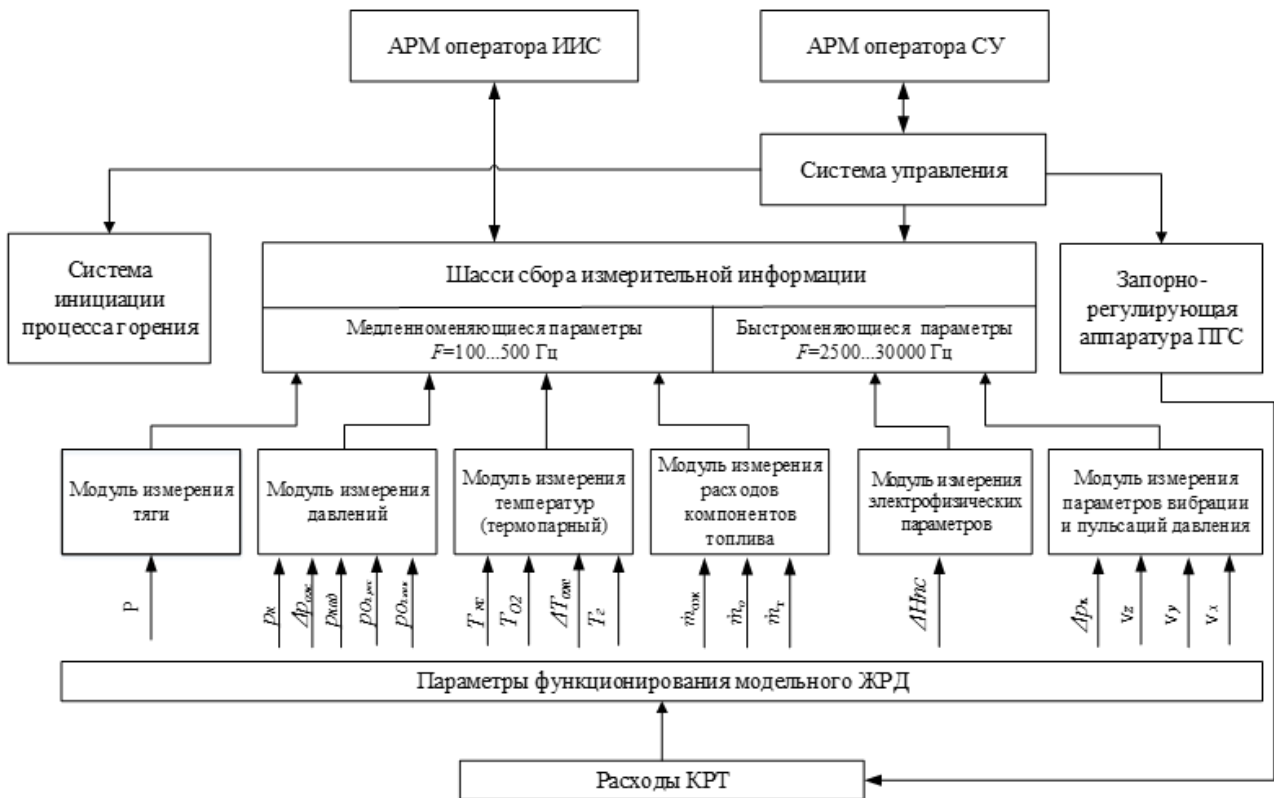
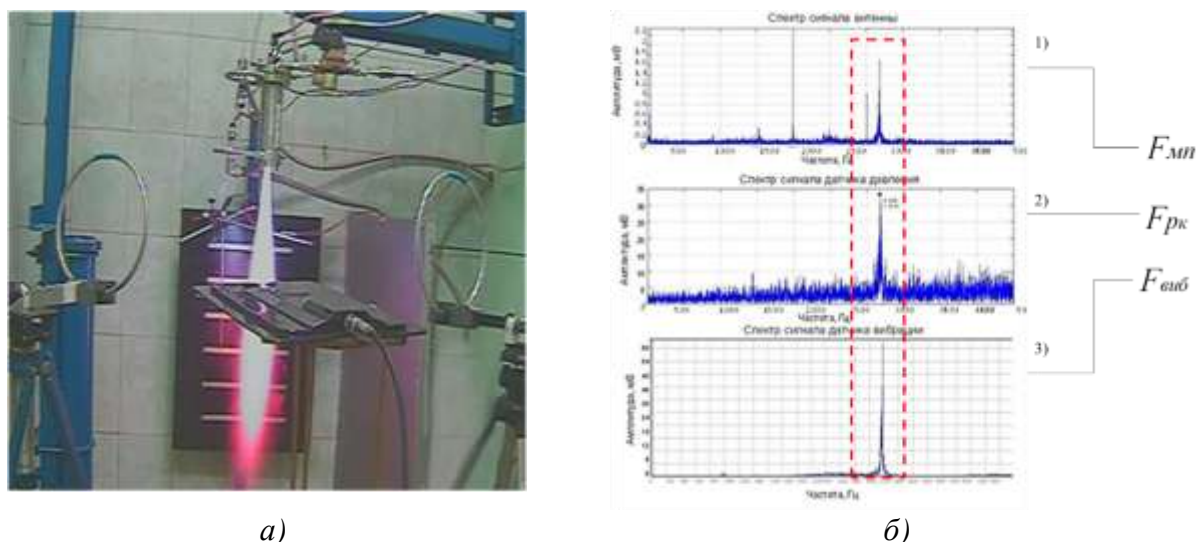


Рис. 8. Структурная схема информационно-измерительной системы стенда огневых испытаний модельных ЖРД

Для оценивания результативности перспективных способов контроля параметров функционирования ЖРД на основе спектрального анализа колебаний напряженности магнитного поля струи продуктов сгорания за срезом сопла была проведена серия экспериментов на модельном ЖРД с реализацией различных значений параметров, определяющих режим его функционирования. Цель экспериментального исследования заключалась в установлении зависимости параметров продольной вибрации корпуса камеры и колебаний напряженности магнитного поля струи продуктов сгорания от соотношения компонентов и давления в камере путем применения быстродействующих перспективных способов контроля.

Функционирование модельного ЖРД и результаты обработки экспериментальных данных представлены на рис. 9.



а) б)
 Рис. 9. Функционирование модельного ЖРД (а) и выделение информативной
 компоненты АЧХ датчиков сигналов (б):

1 – рамочной антенны, 2 – датчика давления, 3 – датчика вибрации

Во время функционирования модельного ЖРД зафиксированы изменения сигналов датчиков вибрации, давления в камере сгорания и рамочной антенны в момент перехода с предварительного на основной режим функционирования при различных давлениях в камере сгорания ($p_k = 6 \dots 9$ ати; $p_k = 5 \dots 12$ ати). При анализе спектров сигналов выявлены устойчивые частотные пики в диапазонах $f=2250 \dots 2500$ и $f=2900 \dots 3200$ Гц информативных частотных полос, близких по значению к первой моде продольных акустических колебаний в модельной камере сгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные распределения частот пульсаций давления, вибрации корпуса камеры сгорания модельного двигателя, напряженности магнитного поля в зависимости от режимных параметров двигателя свидетельствуют в пользу существования взаимосвязи между термодинамическими процессами в камере сгорания и виброакустическим и электрофизическим отображениями и могут быть использованы для реализации бесконтактных методов электростатической диагностики технического состояния ЖРД. С целью совершенствования указанных методов диагностирования и доведения полученных результатов до практических методик требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Список используемых источников

1. Нагель Ю.А. Электризация двигателей при истечении продуктов сгорания // Экспериментальные результаты. – 1999. – Т. 69, № 8. – С. 55–62.
2. Пинчук В.А., Грибакин В.А., Болдырев А.С. Диагностирование технического состояния жидкостных ракетных двигателей на основе электрофизических измерений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 11. – С. 17–22.
3. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А. Янова, А.Г. Соколова, Е.И. Хомяков. – М.: Наука, 1984. – 120 с.

П.С. Гончаров,
кандидат техн. наук, доцент;

В.В. Мартынов;

В.М. Скутницкий,
кандидат военных наук;

О.Ю. Цыбин,
доктор физико-математических наук, профессор

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

Н.А. Шуневич,
кандидат техн. наук

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ

Обоснована необходимость и выработаны требования для создания источника питания электрических ракетных двигателей, используемого при их огневых испытаниях в лабораторных условиях. Описана разработанная принципиальная электрическая схема устройства, раскрыт процесс ее функционирования. Рассмотрена работа устройства в наиболее напряженных режимах. Описаны особенности реализации, отладки и применения высоковольтного источника питания. Даны рекомендации по направлению дальнейших исследований.

Ключевые слова: высоковольтный источник питания, электрический ракетный двигатель, принципиальная схема, разработка устройства, огневые испытания.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из востребованных направлений совершенствования ракетно-космической техники является разработка электрических ракетных двигателей (ЭРД). Современные ЭРД в основном представлены группой электростатических двигателей, в том числе ионных двигателей (ИД) с «сеточными» перфорированными электродами, а также плазменных двигателей «с эффектом Холла», включающих стационарные плазменные двигатели, двигатели с анодным слоем, торцевые холловские, многоступенчатые холловские.

Важным этапом разработки и совершенствования ЭРД является наземная экспериментальная отработка, в том числе проведение огневых испытаний в лабораторных условиях. Неотъемлемая часть таких испытаний – материально-техническая база, развитию которой уделяется постоянное внимание.

В настоящее время на базе Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого ведутся испытания лабораторного образца ионного ЭРД с использованием вакуумной установки ВУ-М [1]. Для запуска и работы ЭРД, помимо вакуума и системы хранения и подачи рабочего тела, необходимо обеспечить высокую разность потенциалов на электродах двигателя для реализации процесса разгона ионизированного рабочего тела (РТ). В связи с этим возникла задача по разработке источника питания (ИП), способного обеспечить проведение лабораторных огневых испытаний образцов ЭРД. Целью настоящей работы является обобщение результатов проведенных исследований по созданию высоковольтного ИП.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

В основу технического решения поставленной задачи заложена схема, построенная по традиционной структуре, присущей классическому сетевому источнику питания. В такой схеме силовой трансформатор (чаще всего понижающий) обеспечивает определенное значение переменного напряжения, которое с помощью диодов преобразуется в постоянное пульсирующее. Затем пульсации напряжения сглаживаются конденсаторным фильтром. На выходе такого устройства получают заданное значение питающего напряжения. На выбор трансформаторной схемы ИП повлияли высокая надежность и степень проработки подобных устройств, наличие гальванической развязки с питающей сетью, доступность элементной базы для реализации устройства, особенно высоковольтной. В отличие от инверторной схемы трансформаторная представляется более простой в наладке и стойкой к пиковым нагрузкам.

Многообразие сценариев предстоящих экспериментов с ЭРД повлияло на внесение существенных изменений в выбранное схемное решение. Разрабатываемое устройство предполагается к использованию не в конкретно заданном образце ЭРД с известными характеристиками энергопотребления, а в испытании экспериментальных образцов, значения параметров электропитания которых значительно отличаются. Кроме того, характеристики энергопотребления исследуемых образцов обозначены лишь теоретической оценкой, а определить их истинные значения является одной из задач проводимых испытаний.

Даже исследование отдельно взятого экспериментального образца потребует разнообразия значений питающего напряжения. К примеру, разность потенциалов между электродами ЭРД для режима начала возникновения ионизации в первую очередь зависит от зазора между электродами, уровня вакуума в камере, массового расхода и типа используемого рабочего тела (РТ) (аргон, ксенон, гелий, воздух и т.д.). Огромное разнообразие вариантов сочетаний указанных параметров требует от ИП обеспечения питающего напряжения в очень широком диапазоне его значений.

Предварительные теоретические исследования позволили выработать ряд требований к разрабатываемому ИП:

- энергопитание устройства должно осуществляться от сети переменного напряжения (220 В, 50 Гц), а выходное напряжение должно быть постоянным;
- в отличие от классического сетевого ИП должна обеспечиваться возможность плавного регулирования постоянного напряжения на выходных клеммах устройства;
- значение выходного напряжения должно устанавливаться в пределах не менее 0–5000 В при токовой нагрузке до 2 А;
- должен быть предусмотрен контроль выходного сигнала по напряжению и его токовому потреблению;
- должна быть предусмотрена защита входных и выходных линий устройства от перегрузок и коротких замыканий;
- в целях обеспечения мер безопасности после выключения устройства запасенная в конденсаторах энергия, а следовательно, и напряжение на выходных клеммах ИП должны сбрасываться независимо от потребления нагрузки.

С учетом предъявляемых требований разработан высоковольтный ИП. Конструктивно ИП выполнен в виде отдельного блока (рис. 1,а), представляющего собой вертикальную стойку. В нижней части стойки (рис. 1,б) размещены наиболее массивные элементы – автотрансформатор и сглаживающие конденсаторы. В средней части находится основная часть элементов электрической схемы. Элементы управления, индикации и контрольно-измерительные приборы расположены в верхней части ИП. Высоковольтные токоведущие соединения и выходные электрические кабели выполнены соответствующими проводами. Учитывая предполагаемое предназначение ИП как лабораторного, к массогабаритным характеристикам особых требований не предъявлялось. Принципиальная схема высоковольтного ИП представлена на рис. 2.



Рис. 1. Источник питания постоянного напряжения

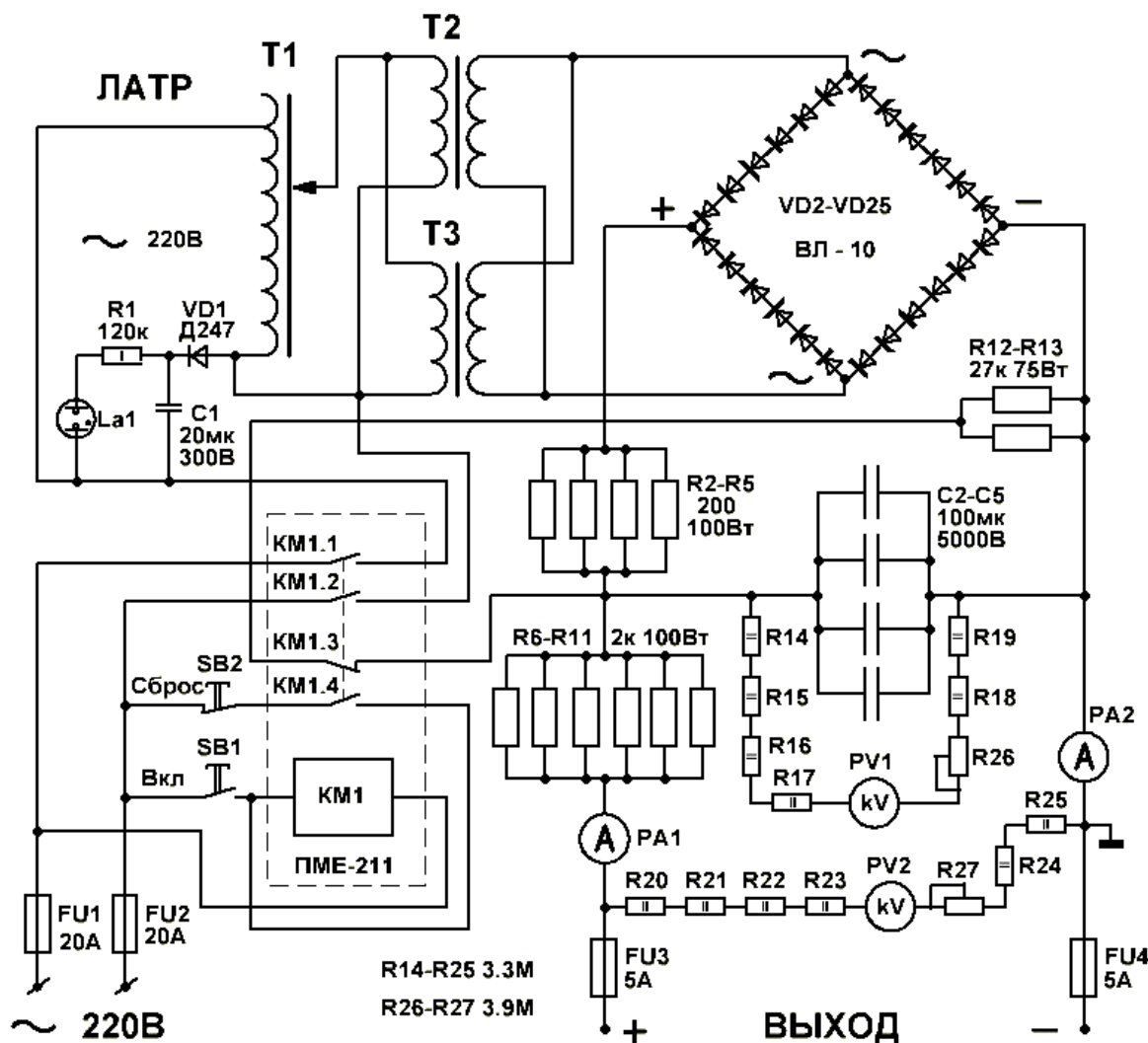


Рис. 2. Принципиальная схема высоковольтного источника питания

Структурно схема высоковольтного ИП состоит из следующих элементов:

- устройства включения, построенного на основе магнитного пускателя типа ПМЕ-211;
- лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) Т1 мощностью 10 кВт, предназначенного для регулирования напряжения переменного тока в пределах от 0 до 220 В;

- силовых повышающих трансформаторов Т2 и Т3 с коэффициентом преобразования напряжения 23;
- диодного моста VD2-VD25;
- сглаживающих конденсаторов С2-С5;
- контрольно-измерительных приборов на выходе устройства PV1, PV2, PA1 и PA2.

Работает схема следующим образом. Кнопкой включения SB1 питающее напряжение, через предохранители FU1 и FU2, подается на катушку магнитного пускателя KM1. После срабатывания магнитного пускателя происходит замыкание его контактных групп KM1.1, KM1.2 и KM1.4. С помощью контактов KM1.4 магнитный пускатель становится на самоблокировку, обеспечивающую нахождение его во включенном состоянии, независимо от положения кнопки включения SB1. Через контакты KM1.1 и KM1.2 сетевое напряжение поступает на обмотку автотрансформатора Т1. При этом загорается неоновый индикатор La1, задействованный схемой на элементах R1, VD1 и С1. Снимаемое при помощи ползункового токоснимателя автотрансформатора Т1 напряжение подается на первичные обмотки силовых повышающих трансформаторов Т2 и Т3. При этом на их вторичных обмотках напряжение пропорционально изменяется с коэффициентом трансформации 23. Трансформаторы Т1 и Т2 включены по параллельной схеме для обеспечения требуемой мощности сигнала. Для преобразования сигнала переменного тока в постоянный пульсирующий применен диодный мост VD2-VD25 на элементах ВЛ-10. Каждый из элементов ВЛ-10 не способен выдержать столь высокое напряжение, поэтому в плечах моста используется последовательное соединение диодов. Постоянный пульсирующий сигнал с помощью конденсаторов С2-С5 преобразуется в постоянный сглаженный. Параллельное соединение конденсаторов применено с целью увеличения их суммарной емкости. Зарядка конденсаторов в начальный момент сопряжено с протеканием больших токов в первичных цепях (обмотки трансформаторов, контакты токоснимателя, диодный мост), поэтому зарядка конденсаторов производится через ограничительные резисторы R2-R5. Нагрузка ИП подключена к конденсаторам через резисторы R6-R11, которые исключают работу конденсаторов в режиме короткого замыкания. При огневых испытаниях ЭРД случаются срыв процесса ионизации и пробой между электродами двигателя, сопровождающиеся лавинным возрастанием тока в питающей цепи. Для ограничения уровня тока, защиты элементов ИП и соединительных кабелей как раз и предназначены эти резисторы. В пиковом режиме работы на группах ограничительных резисторов R2-R5 и R6-R11 выделяется значительная энергия в виде теплового излучения. Группы состоят из нескольких параллельно соединенных резисторов с большой рассеиваемой мощностью. Для равномерного распределения нагрузки в каждой из групп номиналы омического сопротивления резисторов совпадают. Контроль выходного сигнала по току осуществляется с помощью амперметров PA1 и PA2. Напряжение на конденсаторах и на выходе устройства контролируют по приборам PV1 и PV2, соответственно. Цепочки сопротивлений R14-R19 и R20-R25 служат для шунтирования приборов, а подстроечные резисторы R26 и R27 – для настройки их корректной работы. Выход устройства защищен плавкими предохранителями FU3 и FU4.

В процессе работы устройства в конденсаторах запасается значительное количество энергии. После выключения ИП заряд на конденсаторах С2-С5 может сохраняться продолжительное время. Для обеспечения безопасности работ необходимо принудительно разрядить накопительные конденсаторы. Эта задача осуществляется следующим образом. Выключение ИП производится с помощью нормально замкнутой кнопки SB2. При нажатии ее контакты замыкаются, обмотка магнитного пускателя KM1 обесточивается и отпускает сердечник. При этом контактные группы магнитного пускателя принимают исходное положение (как показано на схеме, изображенной рис. 2). В частности, контактная группа KM1.3 замыкается и через резисторы R12-R13 соединяет выводы накопительных конденсаторов С2-С5.

Время разрядки конденсаторов зависит от значения параметров RC-цепочки и составляет несколько секунд, в нашем случае оно установлено подбором номиналов резисторов R12-

R13. При этом рассеивается значительное количество энергии, распределенное между двумя параллельно соединенными резисторами мощностью 75 Вт каждый (тип ПЭВ-75).

Подробное описание схемы создает представление о работе входящих в нее структурных элементов. Однако схемные решения и особенности функционирования отдельных определяющих элементов требуют дополнительных пояснений. Это – диодный мост и сглаживающие конденсаторы.

При испытании образцов ЭРД возможны ситуации с экстремальными параметрами энергопотребления, например срыв процесса и возникновение электродугового разряда между электродами. Готовность к подобному (пиковому, хотя и кратковременному) режиму работы потребовали обеспечения повышенной надежности устройства. В связи с этим особое внимание уделено выбору элементной базы, резервированию запаса по допустимым электрическим параметрам. К примеру, диодный мост выполнен на лавинных диодах. Использование лавинных диодов повышает надежность электрической схемы, так как распределение тока при лавинном пробое равномерно по всей структуре полупроводника. Это не приводит к локальному перегреву, тепловому пробое и выходу из строя полупроводника, как у выпрямительных диодов. Однако следует понимать, что ток этот не безграничен. Поэтому для повышения надежности ИП, а также сохранения его работоспособности в пиковом режиме нагрузка подключена через токоограничивающее сопротивление, в нашей схеме это группы резисторов R2-R5 и R6-R11.

Что касается схемного решения, то в ИП применена двухполупериодная схема выпрямителя на диодах VD2-VD25. Достаточно частое применение однополупериодных выпрямителей обусловлено их простотой – требуется лишь один диод. Основным недостатком такой схемы является значительно меньшая мощность нагрузки. С учетом обеспечения высоких требований к ИП однополупериодная схема представляется нецелесообразной. Кроме того, выбор двухполупериодной схемы выпрямителя позволит в два раза снизить суммарную емкость фильтрующих конденсаторов, что немаловажно с учетом их массогабаритных характеристик. Требуемая суммарная емкость сглаживающих конденсаторов C (в Фарадах) определялась по формуле

$$C = \frac{P}{2 \cdot U \cdot f \cdot dU}, \quad (1)$$

где P – мощность нагрузки, Вт;

U – максимальное напряжение на конденсаторах, В;

f – частота переменного напряжения, Гц;

dU – амплитуда допустимых пульсаций (1 % значения напряжения), В.

Коэффициент 2 в знаменателе определяет число полупериодов выпрямителя.

Для режима максимальной нагрузки ($U=5000$ В и $I=2$ А) суммарная емкость сглаживающих конденсаторов составляет 400 мкФ. Следует учесть, что такой режим эксплуатации ИП крайне редок. В более щадящих режимах работы амплитуда пульсаций напряжения будет значительно ниже.

Наряду с выполнением функции сглаживания питающего напряжения, конденсаторы С2-С5 являются источником запасенной энергии и во многом определяют стабильную работу устройства. В общем случае особенностью конденсатора является его свойство накапливать, а также отдавать заряд практически мгновенно, что сопряжено с большими действующими токами. Такие условия работы ведут к перегрузкам в цепи, деградации самого конденсатора, поэтому его зарядка и разрядка производятся через ограничительные сопротивления. Для гармоничного внедрения конденсатора в схему, обеспечения его корректной работы произведен расчет номиналов сопряженных с ним сопротивлений согласно теории конденсатора в цепи постоянного тока [3, 4]. Напряжение на обкладках конденсатора и протекающий через него ток изменяются по экспоненциальному закону, причем при зарядке конденсатора они взаимнообратны, а при разрядке – оба показателя снижаются (рис. 3).

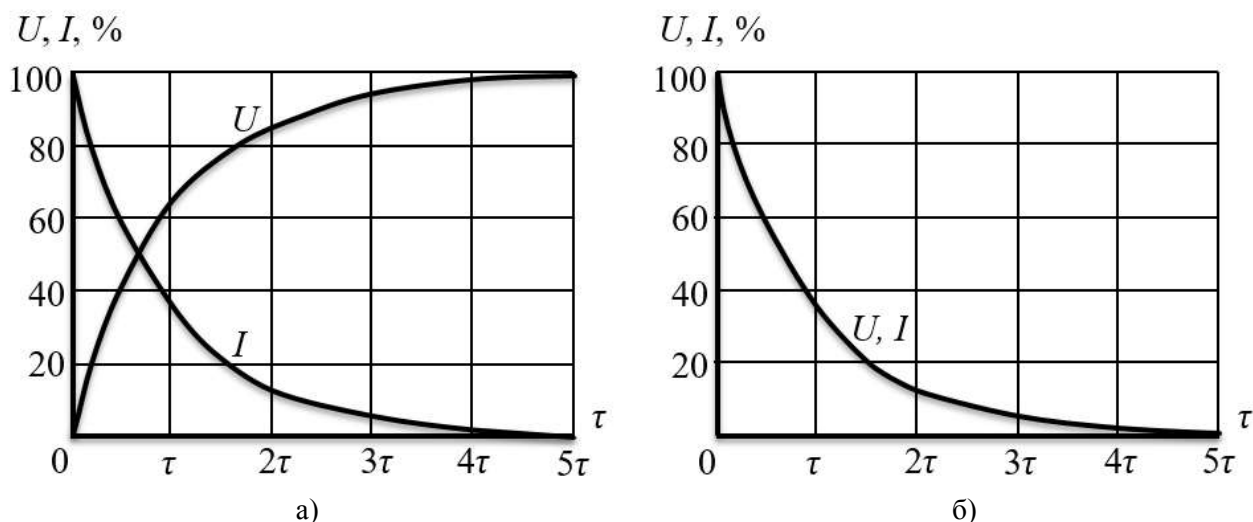


Рис. 3. Характер изменения тока и напряжения при зарядке (а) и разрядке (б) конденсатора

Для связи уровня заряда конденсатора с временем служит постоянная времени (τ). За время τ конденсатор заряжается или разряжается на 63 %, а за 5τ – практически полностью:

$$\tau = R \cdot C, \quad (2)$$

где R – сопротивление ограничительного резистора.

Во время зарядки конденсатора напряжение на нем меняется по следующему закону:

$$U = U_{\text{ист}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (3)$$

где $U_{\text{ист}}$ – напряжение источника, В;

t – время зарядки, с.

На рис. 4 представлены результаты расчета изменения напряжения на сглаживающих конденсаторах С2-С5 и силы тока в цепи зарядки при переходных процессах. Эпюры U и I отображают зависимость от времени напряжения и тока в процессе зарядки конденсаторов при значениях сопротивлений ограничительных резисторов R2-R5, соответствующих принципиальной схеме, изображенной на рис. 2 (суммарное сопротивление равно 50 Ом). Эпюра U_3 показывает падение напряжения при максимальной нагрузке. Она нужна для выбора резисторов R6-R11, через которые конденсаторы работают на нагрузку. Зависимости U_1 и U_2 получены в процессе подбора номиналов резисторов R2-R5 и соответствуют зарядке конденсаторов через суммарное их сопротивление 25 и 100 Ом. Слишком крутой характер изменения экспоненты U_1 сопряжен с большими действующими токами, а плавный U_2 – с более медленной зарядкой конденсаторов. Поэтому сочетание достаточно темпераментного характера нарастания напряжения (U) при зарядке и плавное снижение его при максимальном потреблении (U_3) способствуют своевременной релаксации конденсаторов.

На графике целенаправленно отображены самые напряженные режимы работы ИП – это момент включения и режим работы на максимальную нагрузку. Причем рассмотрены зарядка конденсаторов непосредственно от нуля до максимального значения напряжения, а их разрядка – практически на короткозамкнутый выход. Понятно, что в таких режимах ИП работает редко и непродолжительное время, однако обеспечение надежности устройства требует оценки параметров именно при таких условиях. В обычном режиме работы напряжение на конденсаторе практически не отклоняется от заданного. Темпы восполнения энергии значительно выше темпов ее потребления нагрузкой. В таком режиме работы (подпитка конденсаторов) действуют значительно меньшие токи.

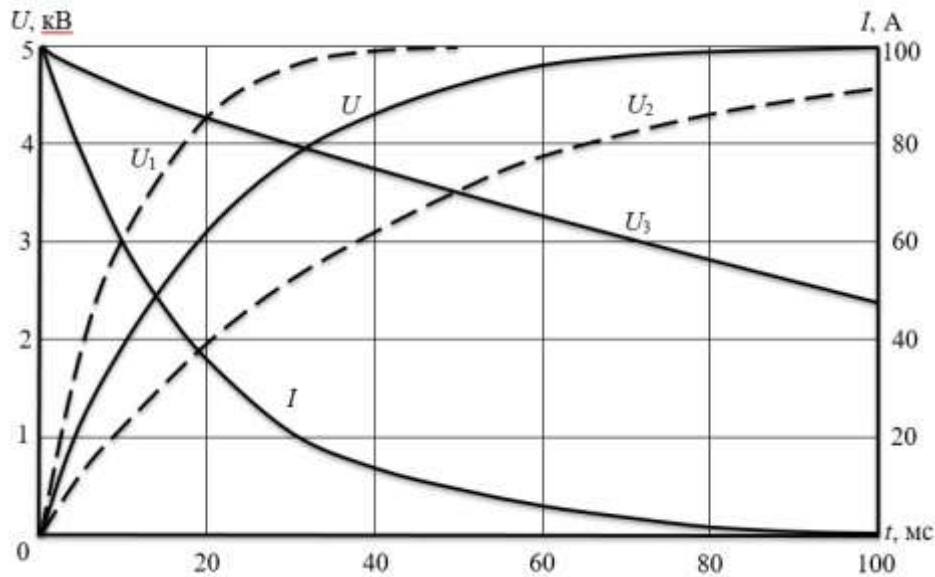


Рис. 4. Переходные процессы на сглаживающих конденсаторах

С использованием данного ИП творческим коллективом Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого на вакуумной установке ВУ-М были успешно выполнены огневые испытания лабораторного образца ионного ЭРД с контактной ионизацией. На рис. 5 показан процесс работы лабораторного образца ионного ЭРД с РТ – воздух.

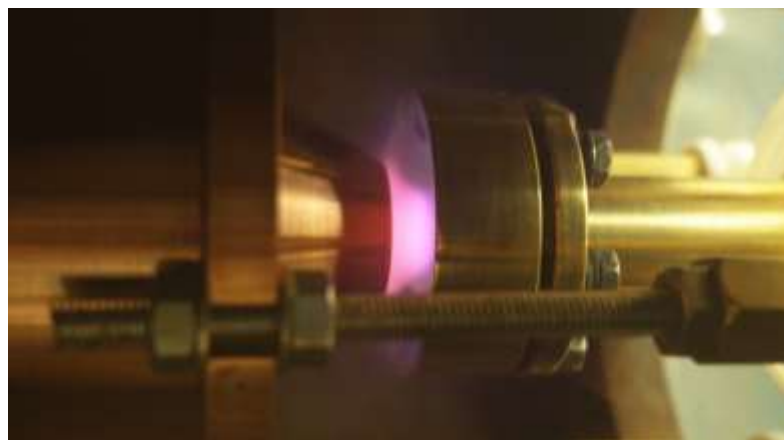


Рис. 5. Процесс работы лабораторного образца ионного ЭРД с РТ – воздух

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный и реализованный высоковольтный ИП отвечает предъявленным к нему требованиям и может быть использован для проведения огневых испытаний ЭРД. Дальнейшие исследования по данной тематике могут быть направлены на повышение электрических характеристик выходных параметров сигнала, возможно, за счет наращивания емкости накопительных конденсаторов.

При минимальной доработке ИП способен обеспечить значительно больший уровень выходного напряжения, и основная часть элементов схемы к этому адаптирована. Суть доработки состоит прежде всего в повышении допустимого напряжения сглаживающих

конденсаторов. Выполнить это можно, применив параллельно-последовательную схему соединения таких конденсаторов либо заменив их на элементы с необходимым допустимым напряжением.

Уместно отметить, что отдельные характеристики, например уровень пульсации напряжения, можно улучшить и за счет перехода на трехфазную схему питания. В плане повышения защищенности ИП от перегрузок по току возможно проведение исследований по замене выходных предохранителей на специальные устройства типа высоковольтных автоматических выключателей. Такие автоматы имеют две степени предохранения, работающие по разному принципу. Нагревательная биметаллическая пластина реагирует на длительное превышение тока в цепи, а электромагнитная катушка отслеживает пиковые токовые скачки и мгновенно отключает ИП от потребителя при перегрузке.

Список используемых источников

1. Вакуумная установка для огневых испытаний электрических ракетных двигателей / П.С. Гончаров, Ю.В. Кулешов, В.В. Мартынов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 216–223.
2. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Электрические ракетные двигатели. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
3. Бычков А.И. Цепи постоянного тока. – М.: МЦНМО, 2019. – 96 с.
4. Батура М.П. Теория электрических цепей: учебник. – М.: Высшая школа, 2008. – 608 с.

А.В. Казимиров,
кандидат техн. наук;
А.В. Молостов;
Е.Е. Наумчик;
И.К. Прилуцкий,
доктор техн. наук, профессор

СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ НА БАЗЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Представлена принципиальная схема системы хранения перспективного ракетного углеводородного горючего – сжиженного природного газа, включающая систему сжижения отпарного газа. Также рассмотрены циклы сжижения отпарного газа и охлаждения азота, используемого как хладагент. Рассмотрены процессы, входящие в циклы, и приведены параметры состояния рабочих тел в характерных точках циклов.

Ключевые слова: компоненты ракетного топлива, сжиженный природный газ, термодинамический цикл, термодинамический процесс, принципиальная схема.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим направлением развития ракетно-космической отрасли является создание новых ракетных топлив. Они должны обеспечивать высокую энергетическую эффективность, обладать благоприятными экологическими свойствами, неагрессивностью к конструкционным материалам, высокой физической и химической стабильностью и, кроме всего прочего, низкой стоимостью [1]. Введение новых ракетных топлив в эксплуатацию не должно значительно изменять существующую инфраструктуру ракетно-космического комплекса.

В настоящее время для замены керосина рассматривается применение сжиженного природного газа (СПГ) в качестве горючего для ракетного топлива в паре с жидким кислородом. Интерес к СПГ продиктован прежде всего возможностями разработки высокоэффективного жидкостного реактивного двигателя (ЖРД) по схеме с восстановительным газогенератором замкнутого типа. Кроме того, применение СПГ позволяет создать ЖРД многоразового применения с минимальным циклом послеполетного обслуживания. К тому же СПГ имеет высокие показатели по теплотворной способности (больше, чем у керосина) и по хладоресурсу (в 3 раза выше, чем у керосина). Также применение СПГ обеспечивает более полное сгорание топлива и отсутствие коксообразований в камере ЖРД. Стоимость СПГ в несколько раз ниже, чем стоимость ракетного керосина, а сырьевая база практически не ограничена. Широкая сеть газопроводов в нашей стране позволяет получать СПГ вблизи космодромов. СПГ неагрессивен к конструкционным материалам. Их выбор определяется лишь низкотемпературными механическими свойствами [2].

Применение СПГ также выгодно в экологическом отношении, поскольку высокая летучесть природного газа обеспечивает его полное удаление из отработавшей ступени ракеты-носителя на этапе ее пассивного полета. В этом случае отработавшая ступень достигает Земли без компонентов ракетного топлива, что в конечном итоге обеспечивает значительное уменьшение площадей районов отчуждения и минимизирует вредные сбросы.

Но наряду с перечисленными достоинствами у СПГ есть и недостатки. Во-первых, СПГ – это низкокипящая жидкость с температурой кипения примерно 113 К (сильно зависит от фракционного состава), представляющая собой смесь легких углеводородов – метана и его гомологов (нижние алканы: этан, пропан, бутан). Во-вторых, СПГ относится к категории особо опасных в пожарном отношении продуктов. Это определяет особые требования,

предъявляемые к хранению СПГ на стартовом комплексе и к процессам заправки им ракеты-носителя [1].

Применение даже самых современных криогенных теплоизоляций емкостей хранения не исключает неизбежных теплопритоков из окружающей среды к продукту. Также исключение кипения компонента за счет повышения давления в газовой полости емкости-хранилища СПГ не представляется возможным как постоянная мера. В этом случае при осуществлении процесса заправки ракеты-носителя компонент будет поступать в магистрали перегретым, что вызовет его быстрое испарение и может привести к негативным последствиям.

При транспортировке СПГ, например морскими танкерами, там, где образующийся пар либо выжигается, либо используется как топливо для судовых двигателей, давление в танкерах поддерживается близким к атмосферному, а ежедневные потери СПГ составляют примерно 0,15% за счет его испарения. Образующийся при испарении СПГ пар называют отпарным газом. Как правило, отпарной газ содержит 20% азота, 80% метана, а также следы этана. Содержание азота в отпарном газе может быть примерно в 20 раз больше, чем в СПГ [2, 3]. Именно поэтому одним из принципиально важных вопросов технологии обращения с СПГ является обеспечение стабильности его компонентного состава, так как изменение температуры кипения и плотности, накопление тяжелых углеводородов на всех стадиях эксплуатации системы заправки могут привести к потере кондиции СПГ и невозможности дальнейшего его применения в качестве горючего для ракетного топлива.

При длительном хранении СПГ в резервуаре хранилища под действием теплопритока из окружающей среды испаряется сначала азот, как самый низкокипящий компонент, а затем метан. Происходит обогащение СПГ в резервуаре более тяжелыми углеводородами и примесями.

Считается, что переохлаждение СПГ решает проблему лишь отчасти, так как при хранении продукта ниже температуры кипения возможно образование кристаллической фазы примесей сероводорода, двуокиси углерода и воды, кроме того, возможна кристаллизация бутана и пентана. Также может произойти температурное расслоение (стратификация) СПГ.

В условиях стартового комплекса открытое выжигание отпарного газа недопустимо с точки зрения пожарной безопасности. К тому же потери СПГ при хранении, сложенные с потерями при заправке РН, нивелируют разницу в затратах на его эксплуатацию по сравнению с использованием керосина. Состав СПГ также следует сохранять кондиционным и соответствующим требованиям, заложенным при проектировании ракетного двигателя. Следовательно, представляет интерес создание перспективных хранилищ СПГ в условиях космодрома, включающих систему повторного сжижения отпарного газа и направления его в резервуар хранилища СПГ.

РАБОЧИЕ ЦИКЛЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Для сжижения отпарного газа целесообразно использовать в качестве хладагента азот, который имеет достаточно низкую температуру кипения (77 К), обладает хорошей теплоемкостью, относительно прост в получении, дешев и имеет температуру кипения ниже любой углеводородной фракции СПГ.

В этом случае в системе хранения СПГ должны реализовываться два цикла – повторного сжижения отпарного газа и азотный охладительный цикл.

Для качественного представления термодинамических процессов, происходящих при реализации этих циклов, отобразим их на фазовых диаграммах в координатах «абсолютная температура – удельная энтропия».

На рис. 1 представлен цикл повторного ожижения отпарного газа. В этом цикле процессы *d-u*, *u-c* и *c-a* отражают образование отпарного газа из СПГ при подводе тепла в емкости

хранилища. Таким образом, в точке *a* получается отпарной газ, имеющий исходные параметры, соответствующие его состоянию в газовой полости емкости хранилища. Далее происходит адиабатное сжатие отпарного газа в неохлаждаемом компрессоре с повышением давления от p_1 , при котором он находился в газовой полости емкости, до давления p_2 по процессу *a-b*. В процессе *b-в* происходит изобарное охлаждение отпарного газа до температуры начала его конденсации при давлении p_2 . Такое охлаждение можно реализовать в теплообменном аппарате или в нескольких последовательных теплообменных аппаратах [4].

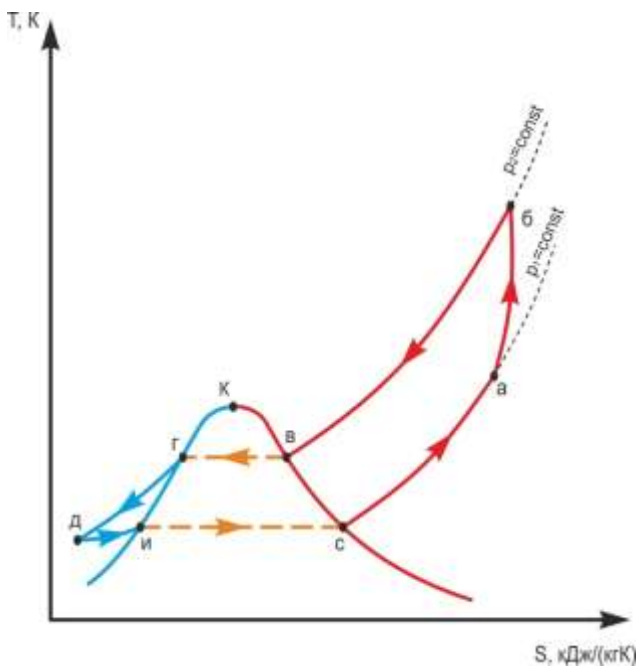


Рис. 1. Цикл повторного ожижения отпарного газа

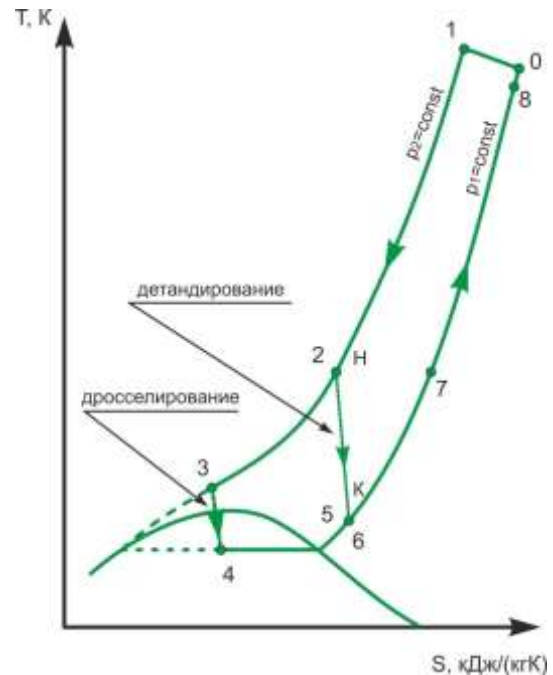


Рис. 2. Азотный охлаждающий цикл

Отпарной газ охлаждается до температуры начала его конденсации при давлении p_2 (точка *в*). Далее осуществляется фазовый переход – процесс *в-г*.

Для более надежной подачи обратно в емкость хранилища необходимо сжиженный отпарной газ несколько переохладить (процесс *г-д*).

Для реализации процессов цикла повторного ожижения отпарного газа используется азотный охлаждающий цикл, представленный на рис. 2. В этом цикле азот находится в начальном состоянии, соответствующем точке 0. Далее происходит процесс сжатия азота от давления p_1 до давления p_2 . Поскольку начальная температура азота соответствует температуре окружающей среды, то процесс сжатия 0-1 можно произвести в охлаждаемом компрессоре (адиабатное сжатие). Далее осуществляется изобарное охлаждение азота по процессу 1-2. Такой процесс можно организовать, например, в кожухотрубном теплообменнике за счет встречного потока азота, нагревающегося по процессу 7-8.

Давление и температура азота в точке 2 должны быть такими, чтобы при помощи процессов расширения можно было получить температуру хладагента, близкую к температуре его конденсации. Для более эффективного отвода тепла от отпарного газа по процессу *б-в* (см. рис. 1) поток азота в точке 2 следует разделить на два потока и производить их расширение по отдельности. Первый поток можно адиабатно расширить до давления p_1 на детандере по процессу *н-к*. Причем процесс *н-к* надо организовать таким образом, чтобы температура азота на выходе из детандера была ниже критической (126 K) и направить в теплообменник для охлаждения отпарного газа (см. процесс *б-в* на рис. 1). Вторым потоком продолжить изобарно охлаждать по процессу 2-3, пропуская через теплообменник, в котором охлаждается отпар-

Основными элементами контура сжижения отпарного газа являются: емкость-хранилище СПГ, компрессор СПГ К-1, трехпоточный теплообменник ТО-2, кожухотрубный теплообменник ТО-3, сепаратор-накопитель С-Н, насос для подачи сжиженного отпарного газа в емкость Н.

Контур охлаждения азота состоит из емкости хранения азота N_2 , азотного компрессора К-2, кожухотрубного теплообменника ТО-1, трехпоточного теплообменника ТО-2, азотного детандера АД, дроссельного клапана Д, кожухотрубного теплообменника ТО-3.

Принцип работы системы следующий: отпарной газ удаляется из хранилища сжиженного природного газа (СПГ) при помощи поршневого компрессора К-1. Давление (точка *a*) отпарного газа на входе в компрессор составляет 0,108 МПа, а его температура – 168 К (-105°C). Компрессор производит адиабатное сжатие отпарного газа (см. процесс *a-b* на рис. 1) до давления 0,7 МПа. Естественно, температура отпарного газа в процессе сжатия повысится и на выходе из компрессора составит 313 К (40°C) (точка *b*). Далее сжатый отпарной газ поступает в трехпоточный пластинчатый криогенный теплообменник ТО-2, где происходит его изобарное охлаждение (см. процесс *b-b* на рис. 1) до 138 К (-135°C) (точка *b*) (допускаем, что потеря давления в теплообменнике не происходит). При этой температуре (138 К) сжатый отпарной газ начинает конденсироваться (см. процесс *b-г* на рис. 1) и направляется в кожухотрубный теплообменник ТО-3, где окончательно конденсируется (точка *г*) и переохлаждается (см. процесс *г-d* на рис. 1) до температуры 113 К (-160°C) (точка *d*). После этого сжиженный отпарной газ поступает в сепаратор-накопитель С-Н, там неконденсируемые газы (такие, как азот) отделяются от него и направляются в газопровод для их дальнейшего обезвреживания. Сжиженный отпарной газ накапливается в сепараторе-накопителе (точка *e*) и возвращается в емкость-хранилище при помощи насоса Н.

Для сжижения и переохлаждения отпарного газа применяется контур охлаждения азота. Азот находится в емкости N_2 при давлении 1,3 МПа и температуре 308 К (35°C) (точка 0). В охлаждаемом компрессоре К-2 совершается адиабатное сжатие азота (см. процесс 0-1 на рис. 2) до давления 5,3 МПа, при этом его температура на выходе из компрессора составляет 313 К (40°C) (точка 1). Далее хладагент поступает в кожухотрубный теплообменник ТО-1, где происходит его изобарное охлаждение (см. процесс 1-2 рис. 2) обратным потоком азота до температуры 162 К (-111°C) (точка 2 и точка *h*). Далее происходит разделение потока. Первая часть потока хладагента расширяется на поршневом азотном детандере АД до давления 1,3 МПа (см. процесс *h-k* на рис. 2). Температура азота на выходе из детандера составит 109 К (-164°C) (точка *k*).

Вторая часть потока азота проходит через трехпоточный пластинчатый криогенный теплообменник ТО-2, где изобарно охлаждается (см. процесс 2-3 на рис. 2) параллельно с отпарным газом до температуры 138 К (-135°C) (точка 3). Далее этот поток азота подвергается адиабатному расширению (см. процесс 3-4 на рис. 2) на дроссельном клапане Д до давления 1,3 МПа и приобретает температуру 92 К (-181°C) (точка 4). После чего он направляется в кожухотрубный теплообменник ТО-3, где забирает тепло от отпарного газа в процессе *г-d* (рис. 1). Поскольку температура насыщения азота при давлении 1,3 МПа равна 108 К (-165°C), следовательно, на входе в теплообменник ТО-3 хладагент будет частично сконденсирован. Это позволит более эффективно произвести переохлаждение отпарного газа.

Забрав тепло у отпарного газа, второй поток азота изобарно нагревается (см. процесс 4-5 на рис. 2) до 109 К (точка 5) и объединяется с первым потоком азота, вышедшим из детандера в точке 6.

Далее хладагент поступает в трехпоточный криогенный пластинчатый теплообменник ТО-2, где нагревается (см. процесс 6-7 на рис. 2), забирая тепло от потока отпарного газа и второго потока азота. На выходе из теплообменника ТО-2 азот имеет температуру 162 К (-111°C) (точка 7). После чего азот поступает в кожухотрубный теплообменник (ТО-1), нагревается (см. процесс 7-8 на рис. 2), отводя тепло от встречного потока азота. В точке 8 хладагент приобретает практически начальную температуру 306 К (33°C). Далее азот возвращается в хранилище N_2 , и цикл замыкается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, параметры состояния отпарного газа (красный цвет), сжиженного природного газа (синий цвет) и азота (зеленый цвет) – давление и температура в характерных точках на принципиальной схеме представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры состояния отпарного газа, СПГ и азота в характерных точках цикла

Параметр	Точки										
	Отпарной газ						СПГ				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>з</i>	<i>д</i>	<i>e</i>		
<i>T</i> , К	168	313	138	113	113	113					
<i>p</i> , МПа	0,108	0,7	0,7	0,45	0,45	0,45					
	Азот										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	<i>n</i>	<i>к</i>
	<i>T</i> , К	308	313	162	138	92	109	109	162	306	162
<i>p</i> , МПа	1,3	5,3	5,3	5,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	5,3	1,3

Стоит заметить, что параметры состояния отпарного газа в точке *a* выбраны как исходные данные для подбора и термодинамического расчета компрессора К-1. Такой расчет был проведен, и на его основании были получены параметры состояния отпарного газа в точке *b*.

Параметры состояния отпарного газа в точках *b* и *в*, а также параметры состояния азота в точках 6, 7, 2 и 3 являются исходными данными для конструктивного теплового расчета теплообменного аппарата ТО-2.

Параметры азота в точке 2 равны значениям в точке *n*, а в точке 6 равны значениям в точке *к*. Эти параметры принимаются за исходные данные для термодинамического расчета азотного детандера АД, а параметры состояния азота в точках 3 и 4 – за исходные данные для расчета дроссельного клапана Д.

Параметры состояния азота в точках 4, 5 и отпарного газа в точках *в* и *г* позволяют произвести расчет теплообменного аппарата ТО-3.

Параметры состояния азота в точке 1 получены по результатам термодинамического расчета компрессора К-2, исходными данными для которого является состояние азота в точке 0. Состояние хладагента в точках 1, 2, 7 и 8 позволяет произвести расчет кожухотрубного теплообменного аппарата ТО-1.

В следующих статьях, посвященных данной проблематике, будут представлены методики проведения оптимизационных расчетов некоторых агрегатов, входящих в состав данной системы.

Список используемых источников

1. Ракетные топлива: учебник / В.К. Пономаренко– 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 428 с.
2. Сжиженный природный газ в ракетно-космической технике // Энергетика ТЭС и АЭС. – URL:<http://tesiaes.ru> (дата обращения: 15.07.2020).
3. Exergy analysis of an LNG BOG re-liquefaction plant / M.B. Beladjine, A. Ouadha, Y. Benabdesselam, L. Adjlout // Conference: proceedings of the 23rd IIR international Congress on refrigeration // Prague' Czech Republic. – Prague, 2011.
4. Термодинамика и теплопередача: учебник / А.В. Хорошавин, Л.А. Сырцов, М.М. Пеньков, И.В. Наумчик; под ред. М.М. Пенькова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – 448 с.

А.С. Перфильев,
кандидат техн. наук, доцент;
А.Э. Султанов,
кандидат техн. наук

ПОДХОДЫ К ОЦЕНИВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОРПУСА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ В ПОЛЕТЕ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрены способы идентификации параметров корпуса ракеты-носителя как колебательной системы на основе спектрально-временной обработки сигнала датчиков низкочастотных колебаний конструкции. Показана принципиальная возможность уточнения информации о фактических динамических характеристиках корпуса ракет на жидком топливе, реализующихся в специфических условиях активного функционирования, при решении задачи контроля стабильности технологических процессов создания изделия на заводе-изготовителе. В основу предлагаемых подходов положены системный анализ результатов обработки телеметрической информации с борта ракет-носителей, подкрепленный анализом результатов численного моделирования колебаний корпусов ракет.

Ключевые слова: продольные колебания, ракета-носитель, летные испытания, телеметрическая информация, формы колебаний, спектр вибрации.

ВВЕДЕНИЕ

Колебания корпуса ракет-носителей на собственных частотах в основном являются следствием взаимодействия корпуса с главным источником энергии – маршевым ракетным двигателем. Такие колебания наиболее сильно сказываются на продольной низкочастотной вибрации корпуса, а их амплитуда (интенсивность) определяется удаленностью от соответствующих границ устойчивости. Положение динамической системы «корпус РН – двигатель» в пространстве динамических параметров зависит от реализовавшихся в полете фактических значений этих параметров. Значения динамических параметров для корпуса РН как колебательной системы определяются свойствами материалов, формой и размерами элементов конструкции, а также способом соединения элементов между собой.

Динамические параметры, характеризующие корпус ракеты-носителя (РН) как колебательную систему, связываются известным уравнением вида

$$[M]\{\ddot{x}\} + [H]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = [P_e],$$

где $[K]$ – матрица жесткости колебательной системы;

$[H]$ – матрица коэффициентов демпфирования корпуса к соответствующему виду колебаний;

$[M]$ – матрица масс колеблющихся элементов системы;

$[P_e]$ – матрица внешних сил;

$\{ \ddot{x} \}$ – вектор ускорений элементов системы.

Из данного уравнения следует, что при изменении одного из параметров, характеризующих динамические свойства системы, изменится и характер колебательного движения. На практике это проявляется в виде изменения частот собственных колебаний конструкции. В то же время, учитывая, что в состав корпуса ракеты входит большое число осцилляторов, а размерность матриц ее параметров может исчисляться десятками, открытым остается вопрос распознавания отклонений отдельных параметров системы по общей наблюдаемой картине вибрации системы в целом.

На сегодняшний день основным источником информации о динамических характеристиках корпусов ракет являются данные результатов стендовых наземных испытаний их составных частей. Известно, что несмотря на широкие возможности современных испытательных стендов и измерительной техники, есть серьезные объективные ограничения, сказывающиеся на степени достоверности таких исследований. Одним из основных ограничений в части получения всего набора данных об объекте испытаний является сложность в наземных условиях обеспечить необходимый уровень адекватности по нагружению элементов конструкции силами инерции. Также весьма затруднительным и дорогостоящим является организация и проведение исследований ракеты космического назначения в полной конфигурации. По этой причине при стендовых испытаниях, как правило, решают главные задачи – подтверждают заданные запасы динамической прочности, при этом зачастую ограничиваясь рассмотрением первого тона колебаний. В то же время особенность динамики корпуса РН проявляется таким образом, что энергия продольных низкочастотных колебаний распределяется относительно равномерно между двумя-тремя первыми их формами. Специфика каждой конкретной ракеты в плане распределения энергии колебаний определяется прежде всего распределением в ее корпусе масс, а также жесткости различных отсеков.

Характерным для жидкостных ракет является то, что частоты соответствующих тонов колебаний в определенные этапы полета могут максимально сближаться. Такая картина наиболее наглядно проявляется при спектрально-временном анализе телеметрируемого сигнала с борта РН, характеризующего продольные колебания ракет. Отдельные характерные свойства кривых, являющихся следами распределения энергии колебаний по частотам, могут нести в себе косвенную информацию об изменениях в тех параметрах корпуса РН, которые влияют на собственные частоты колебаний. Эта информация при наличии некоторых критериев потенциально позволяет получить оценки стабильности динамических характеристик корпуса, и прежде всего – жесткости, в случае внесения изменений в ее конструкцию. Так, например, изменения в составе космической головной части РКН «Союз-2.1б» достаточно сильно влияют на изменение первого и второго тонов частот собственных продольных колебаний. Этот эффект отражается на общей спектрально-временной картине низкочастотных колебаний (рис. 1). Важно при этом отметить, что сближение частот первого и второго тонов колебаний в конце работы второй ступени приводит к возрастанию амплитуды последней (на рисунке отмечено стрелкой).

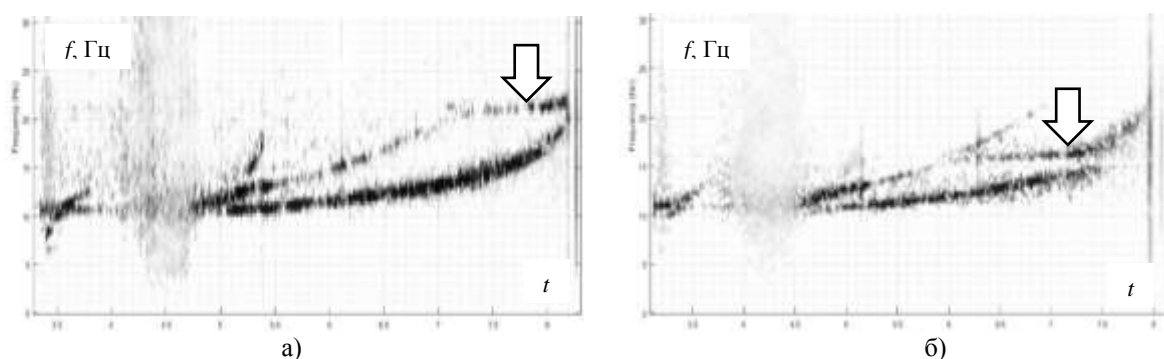


Рис. 1. Влияние изменений в составе РКН «Союз-2.1б» на спектральный состав низкочастотной продольной вибрации корпуса

Последствия локальных изменений в результате доработок ракет-носителей зачастую сложно достоверно спрогнозировать в отношении повышения интенсивности автоколебательных процессов. Таким образом, решение задачи оценивания влияния некоторых доработок (принятых новых технических решений в РН) на запасы устойчивости по автоколебаниям в отдельных подсистемах, опираясь на объективные данные телеметрической информации, является актуальным. Поскольку изменения в конструкции РН проявля-

ются через изменение спектрального состава продольной (осевой) вибрации, можно предположить, что данные взаимосвязи могут лечь в основу развития научно-методического аппарата повышения достоверности оценки вибрационных характеристик РН, существенно влияющих на уровень надежности средств выведения.

Запас устойчивости к продольным автоколебаниям РН определяется соотношением текущих значений параметров демпфирования (декрементов затухания колебаний δ_k) и коэффициентов усиления по различным физическим процессам. При этом граница устойчивости может быть описана критическими значениями тех или иных параметров, при которых автоколебательная система уже не способна поглощать, выделяемую энергию.

Одним из наиболее значимых параметров, характеризующих величину коэффициента усиления амплитуд продольных колебаний корпуса ракеты, можно считать частоту соответствующего тона ω_{kj} и коэффициент формы этих колебаний U_j [7]:

$$\ddot{x}_j + \frac{\delta_k \omega_k}{\pi} \dot{x}_j + \omega_k^2 x + \sum_{n=1}^2 K_{x_j s_n} \ddot{s}_n = \frac{U_j \delta \bar{P}}{M} \delta \bar{p}_k; \quad (1)$$

$$\ddot{s}_n + \frac{\delta_s \omega_s}{\pi} \dot{s}_n + \omega_s^2 s + \sum_{j=1}^m K_{s_n x_j} \ddot{x}_j = 0, \quad (2)$$

где x, s – обобщенные координаты колебаний корпуса и жидкости (топлива);
 U_j – формы колебаний, $j = 1 \dots m$;
 $\delta \bar{P}, \delta \bar{p}_k$ – относительные вариации тяги и давления в камере двигателя.

Из формулы (1) видно, что при реализации двух и более доминирующих собственных частот колебаний корпуса становится важным оценивать и контролировать отдельные параметры жесткости корпуса, характеризующие распределение энергии колебаний по тонам.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРПУСОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ ПО ДАННЫМ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ

Несмотря на то, что сама амплитуда автоколебаний динамической системы «корпус – двигатель» проявляется в ответ на взаимное изменение динамических свойств ее подсистем, вполне корректно в некотором приближении связать рост интенсивности вибрации на борту РН только с характеристиками ее корпуса, считая, что частотные характеристики двигателя (АЧХ, ФЧХ) остаются постоянными. В таком случае увязывание изменения в спектральном составе вибрации корпуса по данным ТМИ в полете с динамическими характеристиками с помощью соответствующих показателей позволит оценить степень критичности изменений, внесенных в конструкцию корпуса РН на стадии производства в отношении запасов устойчивости к опасным автоколебательным процессам (рис. 2). Учитывая сложный характер возбуждения автоколебательных явлений на борту РН, в рамках данной статьи рассмотрены только характеристики жесткости корпуса как упругого силового элемента.

С формальной точки зрения задача оценивания отдельных динамических параметров корпуса должна решаться как задача распознавания образов. Это требует использования соответствующего набора информативных признаков, узко чувствительных к соответствующему параметру и позволяющих оценить его изменение относительно некоторого базового (номинального) значения. Так называемая ортогональность признаков должна лежать в основе построения набора инвариантных соотношений, позволяющих связать соответствующие критичные отклонения, в данном случае определяющие – отклонения жесткости и их признаки (проявления) в вибрационном сигнале.



Рис. 2. Схема контроля динамических характеристик корпуса РН

Как было отмечено выше, ракета-носитель в зависимости от компоновки может быть описана тремя векторами параметров $[K]$, $[M]$, $[H]$ соответствующего размера. В зависимости от решаемой задачи и потребной детализации рассмотрения колебательной системы для ее исследования применяют модели различной размерности. В рамках рассматриваемого класса задач и интересующего диапазона частот, ограниченного верхними значениями 50–90 Гц, допустимо и оправданно использовать модели малой размерности, удовлетворительно описывающие основные закономерности проявления продольной вибрации корпуса РН в полете в контексте интересующих динамических параметров.

При описании продольной вибрации РН с конструктивно-компоновочной схемой тандем в рамках данных исследований использовались преимущественно одномерные трехмассовые комбинированные (осцилляторно-стержневые) модели колебательных систем. Схемы моделей показаны на рис. 3. Описание колебаний РН пакетной и комбинированной компоновки требует учета взаимного влияния продольных и поперечных колебаний связки ракетных блоков и перехода к трехмерной постановке задачи описания форм и частот колебаний [5].

В качестве основных динамических параметров, отражающих критичные в плане контроля свойства объекта и требующих оценивания по результатам обработки телеметрической информации, можно выделить следующие:

- коэффициент жесткости k_i для i -го элемента конструкции;
- коэффициент демпфирования h_j для j -й формы продольных колебаний.

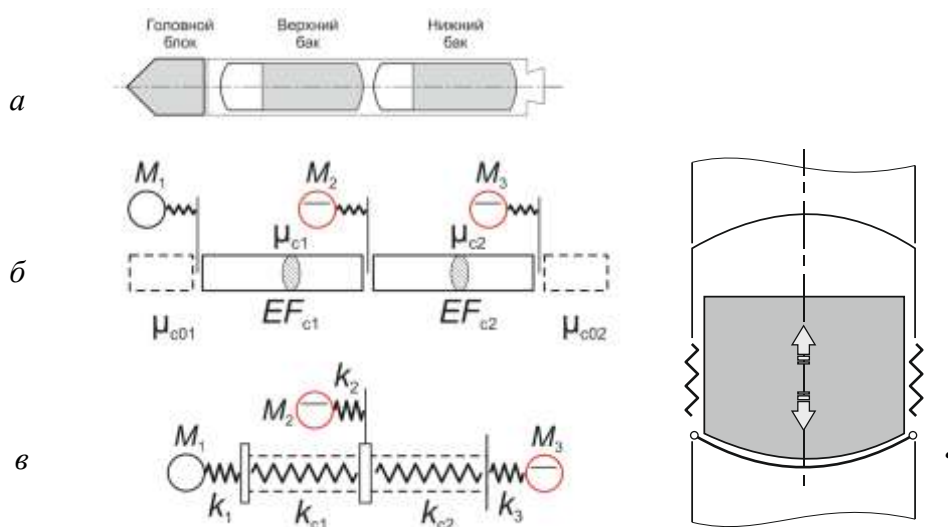


Рис. 3. Схемы построения моделей продольных колебаний корпуса ракет-носителей:

- a – компоновочная схема РН;
- $б$ – стержневая модель;
- $в$ – модель с сосредоточенными массами;
- $г$ – модель колебаний топлива в баке

В рамках рассматриваемой задачи использовалась стержневая модель с сосредоточенными массами. Сосредоточенные переменные массы M_2 и M_3 имитируют топливо в баках работающей ступени. Собственные частоты колебаний вычислялись с использованием метода начальных параметров.

Жесткости подвеса k_2 и k_3 сосредоточенных масс имитируют свойства днищ баков, работающих как мембраны (рис. 3,г)

Для определения степени влияния отдельных отклонений в жесткости корпуса РН на проявление частот собственных колебаний применялся следующий подход. По известной информации о распределении жесткости и массы с использованием метода начальных параметров определялись частоты продольных колебаний для первых трех тонов. Путем синхронного варьирования массами, имитирующими топливо в баках, были получены законы изменения этих частот с течением безразмерного времени полета t/t_k .

В целом для качественного воспроизведения наиболее характерных случаев проявления спектральной картины вибрации в полете удовлетворительные результаты позволяют получить уже трехмассовые математические модели. Для получения более точного результата, как, например, для моделирования колебаний всей двухступенчатой ракеты типа «Союз-2.1в», на этапе работы первой ступени требуются не менее восьми осцилляторов.

На рис. 4 показан результат моделирования собственных продольных колебаний РН «Союз-2.1в» и спектрально-временное представление осевой вибрации, полученной при обработке телеметрической информации.

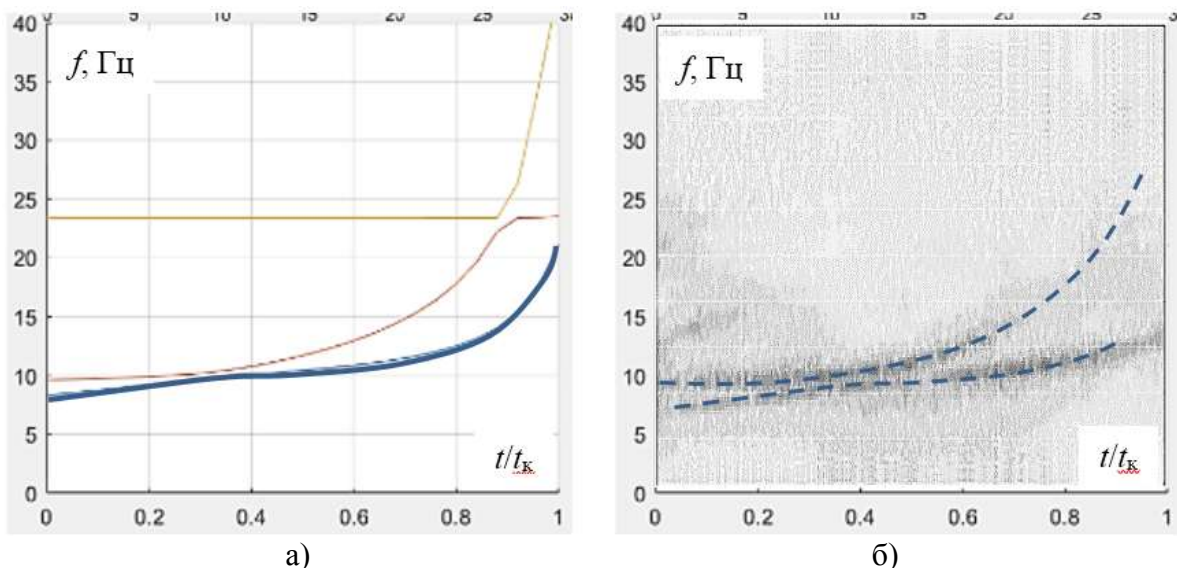


Рис. 4. Спектрограмма продольных колебаний корпуса РН «Союз-2.1в»:

а – результат математического моделирования;

б – результат обработки телеметрической информации

Опыт спектрально-временного анализа вибрации корпусов различных отечественных РН позволяет выделить наиболее характерные случаи проявления спектральной картины. В ряде случаев активно проявляются два тона колебаний, реже – одновременно три тона (рис. 5,г, д).

Моделирование колебаний корпуса РН с использованием динамических моделей, схематично показанных на рис. 3,в, позволяет связать изменение частот соответствующих тонов колебаний корпуса с парциальными частотами колебаний ее отдельных масс. Так, например, монотонно-возрастающие кривые относятся к колебаниям масс топлива в баках. Причем наиболее значимым является учет характера «подвеса» массы топлива относительно упругого корпуса. Для жидкостных ракет-носителей роль подвешенных масс играет жесткость нижних днищ топливных баков, воспринимающих всю массу топлива и определяющих, таким образом, их парциальные частоты.

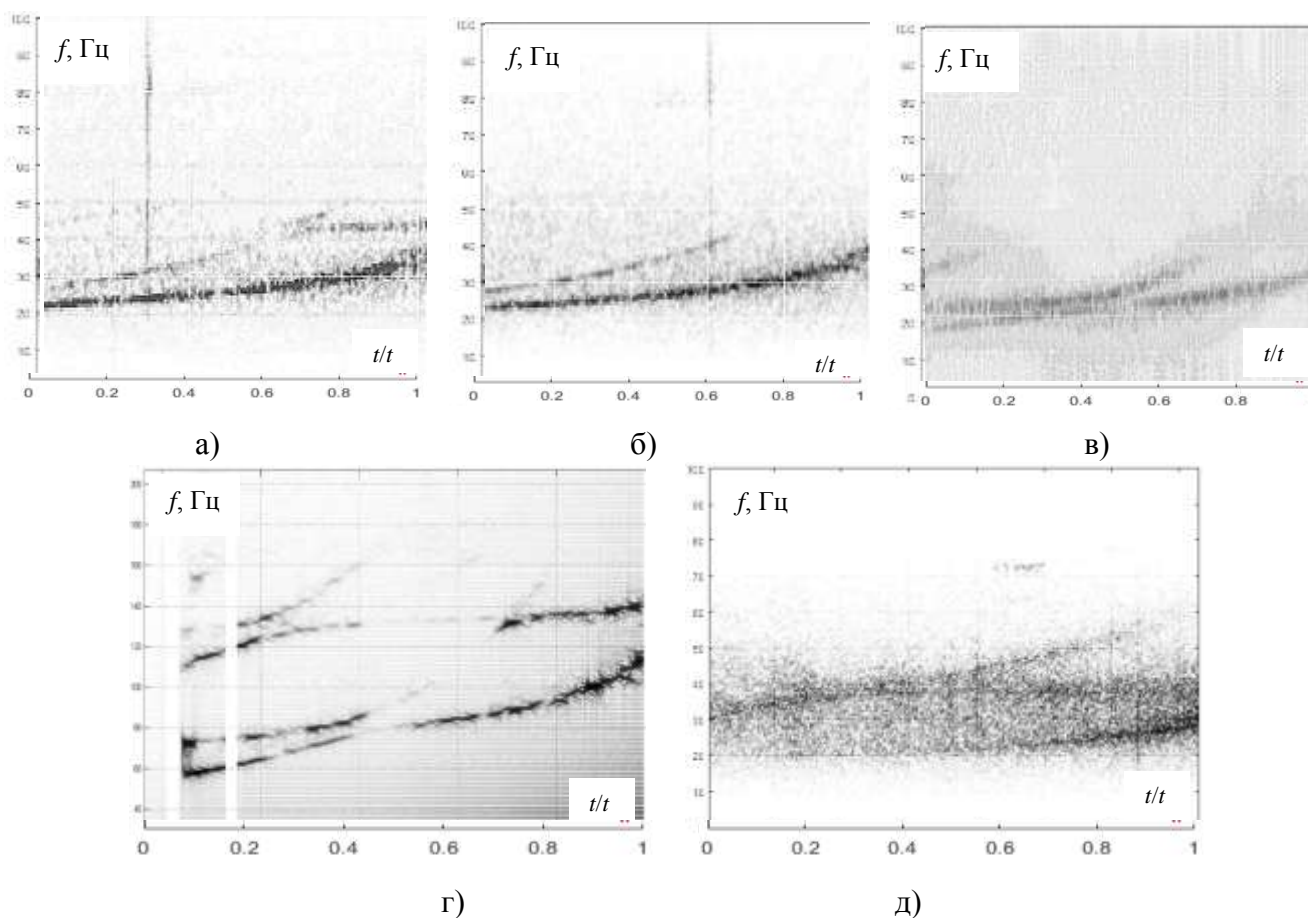


Рис. 5. Картины спектрально-временного распределения низкочастотной продольной вибрации корпуса различных РН:

а, б, в – доминируют первые два тона колебаний (2 ст. РН Союз-2.1б, 2 ст. РН Союз-2.1а, 1 ст. РН Союз-2.1в); г, д – доминируют более двух тонов колебаний (3 ст. РН Союз-2.1б, 1 ст. РН Рокот)

Днища с точки зрения колебательной системы представляют собой упругие относительно-податливые мембраны, имеющие, как правило, примерно на один порядок меньшую жесткость в продольном направлении, чем обечайки баков и сухих отсеков. Величина этой жесткости во многом определяет соотношение сил в колеблющейся системе и, как следствие, значения частот колебаний.

Данная особенность корпуса РН может быть использована в качестве основы для выделения информативных признаков отклонений в конструкции, а также влияния доработок в конструкции ракет на характер колебаний и условия потери устойчивости по автоколебаниям.

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРПУСОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Для решения задачи определения параметров отдельных составляющих колебательной системы на фоне общей картины проявления всех форм колебаний необходимо в анализе опираться на соответствующие информативные параметры. В качестве последних могут использоваться зависимости частот тонов продольных колебаний от времени (степени выработки топлива из баков активной ступени).

Для современных РН характерным является такая картина изменения во времени полета спектрального состава вибрации, при которой один и более раз наблюдается пересечение графиков частот смежных форм. Причем, как было показано в работах американских исследователей динамики жидкостных ракет [9], в результате объединения отдельных осцилляторов, часть из которых представляла собой переменные массы, в момент сближения парциальных частот происходил переход из одной формы колебаний в другую. При этом значения частот не становятся равными, а их графики не пересекаются.

Как показывают численные исследования, проведенные как с использованием аналитических решений методом начальных параметров, так и с использованием динамических моделей с численным интегрированием дифференциальных уравнений, расстояние между кривыми частот смежных тонов практически не зависит от параметров демпфирования, а определяется в основном соотношением жесткости подвеса сосредоточенных масс (например, топлива).

На рис. 6 показано влияние изменения жесткости нижнего бака k_3 (см. схему на рис. 3,б) на характер спектрального состава вибрации. В исследовании принят диапазон варьирования данным параметром от 800 до 2800 МН/м, что соответствует диапазону $\pm 56\%$.

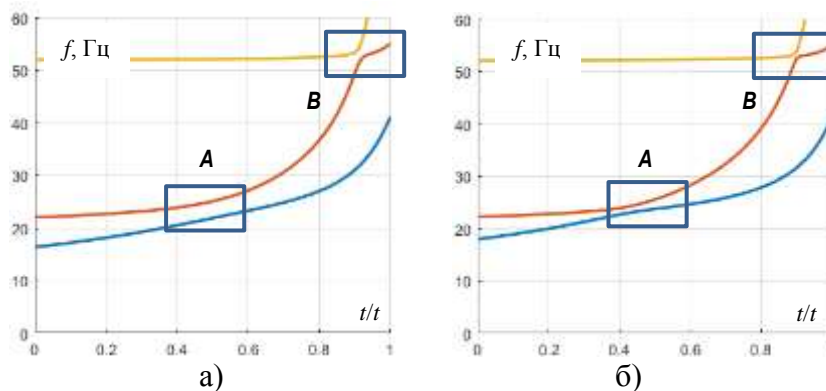


Рис. 6. Результаты моделирования спектрального состава осевой вибрации для РН при различном соотношении жесткости корпуса и днищ баков

Необходимо отметить, что несмотря на значительную зависимость степени максимального сближения частот первых тонов колебаний ($j = 1, 2$) $\delta_{12} = \min \{f_2 - f_1\}$, данный параметр не может использоваться как информативный, так как не удовлетворяет требованию ортогональности по отношению к другим варьируемым параметрам. Так, при изменении колеблющихся масс по-разному изменяются частоты для каждого тона колебаний, следовательно, величина абсолютного максимального сближения δ_{12} кривых для смежных частот будет также изменяться. Для повышения устойчивости признака его необходимо свернуть в безразмерный комплекс, инвариантный по отношению к параметру массы. Таким образом может быть получен искомый информативный признак отклонений параметров жесткости отдельных элементов корпуса РН. В частности, относительный параметр удаленности частот первого и второго тонов колебаний определяется выражением

$$\delta_{12\text{отн}} = \frac{\min \{f_2 - f_1\}}{f_1(t = t_c)},$$

где t_c – момент времени, при котором фиксируется максимальное сближение графиков частот.

На рис. 7,г представлены результаты исследований стабильности показателя $\delta_{12\text{отн}}$ по серии численных экспериментов в условиях варьирования массы головной части M_1 РН в диапазоне 100% (от 2500 до 5000 кг). Сходимость всех графиков достаточно высокая, что свидетельствует об устойчивости признака к второстепенным факторам, в данном случае – к массам.

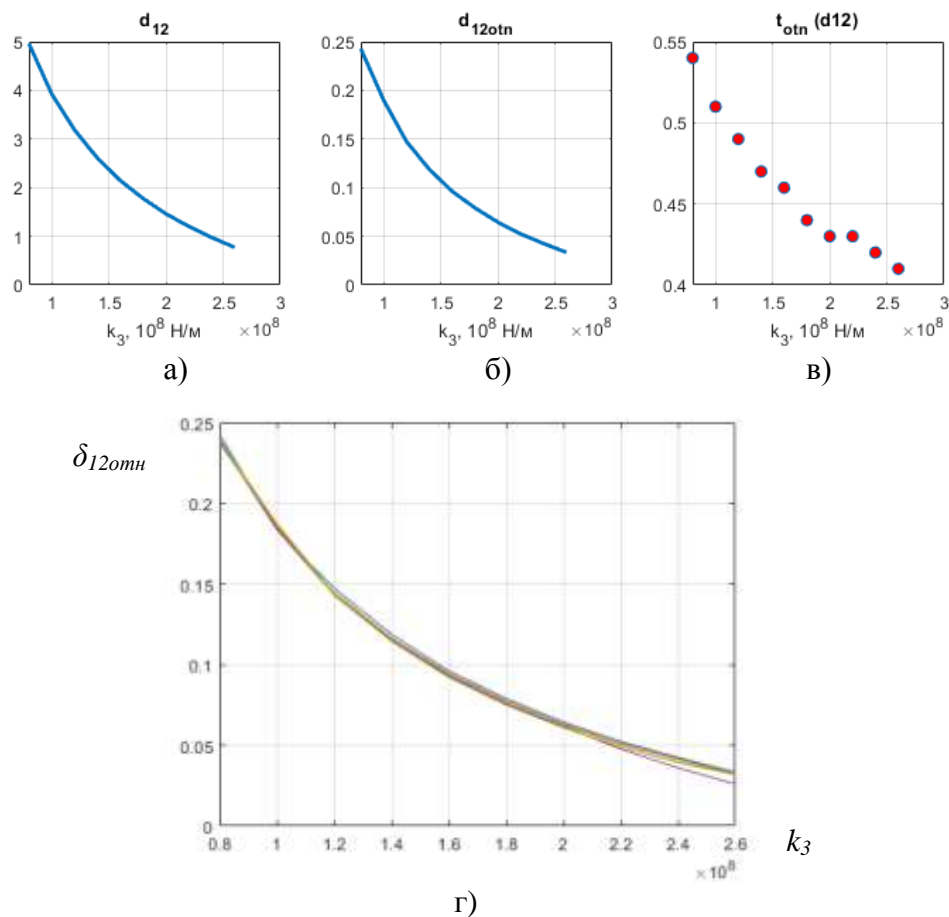


Рис. 7. Графики зависимостей различных информативных параметров:
 а, б, в – (δ_{12} , δ_{12otn} , t_{12}) от k_3 для $M_{z\delta} = 2,5$ т;
 г – δ_{12otn} от k_3 ($M_{z\delta} = 2,5 \dots 5,0$ т)

Анализ изменения в полете частот низших форм продольных колебаний позволяет отметить, что в зависимости от значений парциальной частоты колебаний головного блока РН и соотношения этих частот с парциальными частотами колебаний баков может наблюдаться один либо два участка сближения частот колебаний (на рис. 6 отмечено как *A* и *B*). На спектрограммах сигналов, получаемых, например, с датчиков продольных низкочастотных колебаний, данные участки проявляются достаточно отчетливо и могут подвергаться количественному анализу. Также в дополнение к оцениванию характеристик колебаний корпуса по спектру сигнала может привлекаться и временной вид сигнала (осциллограмма), получаемый после фильтрации исходного цифрового сигнала и исключения из него низких и верхних частот.

Дополнительные преобразования исходного сигнала с борта РН «спектральное преобразование – фильтрация соответствующей частотной области – временное представление» позволяют представить колебания со смежными частотами (при их максимальном сближении) как характерный график биения (рис. 8). Подобная обработка сигнала может потенциально повысить точность определения искомой разности частот соответствующих тонов колебаний.

Таким образом, численные исследования на вышеописанных моделях показывают, что комбинация значений частоты соответствующего тона колебаний, связанного с колебательным движением наиболее массивных частей корпуса, и соотношения этих частот, соответствующих соседним тонам, может быть применена для идентификации параметров жесткости элементов корпуса РН. В этом случае численное значение частоты (размерный информативный параметр) оказывается чувствительным к изменению жесткости определен-

ной части корпуса, а соотношение частот либо расстояние между ними может сигнализировать о соотношении контролируемых параметров жесткости корпуса. Последний параметр может быть сведен к безразмерному комплексу – некоторому критерию подобия. В частности, соотношение частот в области перехода первого тона колебаний во второй либо второго в третий, проявляющееся практически на всех ракетах и их функционирующих ступенях, достаточно стабильно указывает на отклонения жесткости отдельного днища топливного бака.

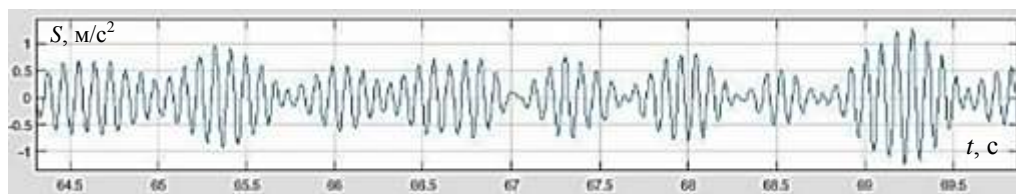


Рис. 8. Проявление эффекта биения при максимальном сближении частот собственных колебаний корпуса РН (параметр «ОП» после фильтрации)

В целом спектрально-временной метод обработки данных с датчиков низкочастотных колебаний корпуса РН (осевого ускорения) позволяет получить информацию о частотах колебаний для первых двух-трех тонов, однако в ряде случаев имеет место либо полная потеря данных, либо существенное зашумление. В этом случае могут использоваться дополнительные каналы получения информации о частотах колебаний. В частности, датчики давления в топливных магистралях, особенно расположенных ближе к хвостовой части РН (магистрالی питания из нижнего бака), позволяют восполнить потерянные данные. Более того, из-за специфики реализации форм продольных колебаний датчик колебаний корпуса, расположенный ближе к головной части РН, может оказаться в районе узла колебаний, в связи с чем коэффициент его усиления или чувствительность к колебаниям окажется минимальным, а информация о данном тоне колебаний на спектрограмме пропадет [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты сопоставления данных, полученных на основе обработки ТМИ с борта РН в процессе летных испытаний, с результатами математического моделирования позволяют установить взаимосвязь отдельных частот с колебательным движением основных и наиболее массивных элементов корпуса.

Важной особенностью спектральной картины осевой вибрации РН в полете является то, что частоты для смежных тонов, как правило, пересекаются. Соотношение частот в области перехода первого тона колебаний во второй либо второго в третий, проявляющееся практически на всех ракетах и их функционирующих ступенях, достаточно стабильно указывает на отклонения жесткости отдельного днища топливного бака. При этом проведенные исследования показали, что величина максимального их сближения оказывается достаточно чувствительным параметром для оценивания жесткости днищ топливных баков. Это обстоятельство открывает возможность формировать новые методы контроля динамических характеристик РН по данным ТМИ, получаемым в процессе летных испытаний. В частности, устанавливать факты опасного изменения динамики корпуса в отношении возникновения и развития автоколебательных процессов, а также выстраивать систему контроля уровня надежности средств выведения, снижая степень неопределенности в критичных параметрах ракет.

Предложенный подход к контролю параметров жесткости корпуса основывается на результатах математического моделирования и демонстрирует возможность выделения информативных признаков отклонений этих параметров на основе инвариантных соотношений.

Список используемых источников

1. *Костюков В.Н.* Синтез инвариантных диагностических признаков и моделей состояния агрегатов для целей диагностики // Омский научный вестник. – 2000. – Вып. 12. – С. 77–81
2. *Рабинович Б.И.* Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 416 с.
3. *Натанзон М.С.* Продольные автоколебания жидкостной ракеты. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
4. *Микишев Г.Н., Рабинович Б.И.* Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость. – М.: Машиностроение, 1971. – 559 с.
5. *Султанов А.Э., Перфильев А.С., Герасименко С.Ю.* Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты-носителя, снижающие надежность агрегатов двигательных установок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 9(45). – С. 56–64.
6. *Николаев А.Д., Хоряк Н.В.* Определение параметров собственных продольных колебаний конструкции корпуса жидкостных ракет-носителей с учетом диссипации энергии // Ракетно-космическая техника и технология. – 2004. – Вып. 4/12. – С. 62–73.
7. *Хоряк Н.В.* Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы «ЖРД – корпус РН» по спектру матрицы: методические основы и приложение // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9(45). – С. 87–91.
8. *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.
9. *Rubin S.* Longitudinal Instability of Liquid Rockets Due to Propulsion Feedback (POGO) // J. Spacecraft and Rockets. – 1966. – Vol.3, №.8. – P. 1188–1195.

Ю.М. Богук,
кандидат военных наук;
И.И. Маненок;
Г.К. Осипов,
доктор геогр. наук, профессор;
В.В. Хиленко

МЕТОДИКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СФОРМИРОВАННОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ У КУРСАНТОВ

Изложена сущность интегральной оценки сформированности профессиональных компетенций у курсантов, реализованной на основе методологии многопараметрического анализа качества сложноорганизованных объектов. Рассмотрена структурно-логическая схема методики, раскрыто содержание ее основных блоков. Приведены результаты ее апробации на кафедре картографии военно-космической академии имени А.Ф. Можайского на примере оценки сформированности профессиональных компетенций при изучении дисциплины «Геоинформационное картографирование».

Ключевые слова: профессиональная компетенция, интегральная оценка, квалиметрический анализ, качество освоения учебного материала, уровень обученности, правильность выполнения технологических операций, мотивация к изучению дисциплины.

Главной задачей модернизации российского военно-профессионального образования является повышение качества подготовки специалистов. Одно из важнейших направлений ее решения – совершенствование подходов к организации педагогического мониторинга в высших военно-учебных заведениях. Недостаточная эффективность существующей системы мониторинга приводит к сдерживанию реализации федеральных государственных образовательных стандартов, ориентированных на компетентностный подход. Несмотря на широкие исследования, проводимые в данной области, эта проблема еще полностью не решена. В рамках организации мониторинговых исследований особенно остро стоит вопрос диагностики качества обучения с точки зрения компетентностного подхода [4, 5, 8, 9].

Исходя из вышеизложенного, возникло противоречие между необходимостью повышения результативности выполнения требований федеральных государственных образовательных стандартов к качеству обучения и несовершенством подходов к организации его диагностики. В данной публикации авторы сделали попытку частичного разрешения этого противоречия.

Теоретической основой разработанной авторами методики является методология многопараметрической оценки качества сложноорганизованных объектов, реализованная в виде метода сводных показателей [1, 2, 6, 7]. Его суть заключается в свертке показателей качества, характеризующих изучаемый объект, в нашем случае – сформированность профессиональных компетенций.

Особенности методики рассмотрим на примере дисциплины «Геоинформационное картографирование», преподаваемой в военно-космической академии имени А.Ф. Можайского на кафедре картографии.

В эксперименте приняли участие десять курсантов 4-го курса.

В состав профессиональных компетенций, формируемых в рамках данной дисциплины, входят две:

1) способен применять геоинформационные системы военного назначения (ГИС ВН) для анализа и обработки геопространственной информации;

2) способен создавать с использованием ГИС ВН цифровые (электронные) топографические и специальные карты.

В рамках описанного исследования авторами анализировалась сформированность второй профессиональной компетенции.

Разработанная методика состоит из пяти блоков. Рассмотрим особенности реализации каждого из них.

Блок 1. Подготовительные работы. На этом этапе осуществляется сбор и изучение материалов, необходимых для проведения процедуры интегральной оценки сформированности профессиональных компетенций.

Блок 2. Построение «дерева информационной взаимосвязи» для интегральной оценки сформированности профессиональных компетенций по изучаемой дисциплине. В основу этого блока закладываются принципы, изложенные в работах [6, 7]. На рис. 1 приведено «дерево информационной взаимосвязи» для дисциплины «Геоинформационное картографирование».



Уровни «дерева информационной взаимосвязи»

Рис. 1. «Дерево информационной взаимосвязи» для дисциплины «Геоинформационное картографирование»

Блок 3. Определение для всех свойств, входящих в «дерево информационной взаимосвязи», значений нормированных показателей. Для решения данной задачи авторы предлагают использовать следующие подходы. Оценка нормированного показателя качества усвоения курсантами учебного материала предлагается рассчитывать по формуле

$$Q_k = (V_{\max} - W_i) / V_{\max} \quad (1)$$

где Q_k – нормированный показатель качества усвоения учебного материала;
 V_{\max} – максимальное количество баллов, которое может получить курсант за выполнение теста;
 W_i – сумма штрафных баллов, полученных i -м курсантом при выполнении тестовых заданий [11].

Для оценки данного показателя использовался разработанный авторами тест, содержащий 80 заданий. Каждое задание в зависимости от трудности оценивалось от 1 до 3 баллов. Общее количество баллов за выполнение теста составляло 140 баллов. В табл. 1 приведены ре-

зультаты расчета нормированного показателя качества усвоения учебного материала курсантами экспериментальной группы.

Таблица 1

Нормированные показатели качества усвоения учебного материала

Порядковые номера курсантов	Максимальное количество баллов за тест	Сумма штрафных баллов	Q_k
1	140	15	0,89
2	140	24	0,83
3	140	19	0,86
4	140	47	0,66
5	140	40	0,71
6	140	86	0,39
7	140	56	0,60
8	140	68	0,51
9	140	89	0,36
10	140	94	0,33

Оценку нормированного показателя обученности курсантов предлагается осуществлять по следующей формуле:

$$Q_o = (K_5 + 0,64K_4 + 0,36K_3)/N \quad (2)$$

где Q_o – нормированный показатель обученности курсантов;
 K_5, K_4, K_3 – количество отличных, хороших и удовлетворительных оценок, полученных курсантом при изучении анализируемой учебной дисциплины;
 N – общее количество оценок, полученных курсантом при изучении анализируемой учебной дисциплины, в том числе и неудовлетворительных [13].

Для определения данного показателя использовались оценки, выставленные в журнал по анализируемой дисциплине в течение учебного года. В табл. 2 приведены результаты расчета нормированного показателя обученности курсантов экспериментальной группы.

Таблица 2

Нормированные показатели обученности курсантов

Порядковые номера курсантов	Количество полученных оценок				Общее количество оценок	Q_o
	5	4	3	2		
1	15	10	1	0	26	0,84
2	8	15	3	0	26	0,72
3	10	12	4	0	26	0,74
4	7	14	5	0	26	0,68
5	8	15	3	0	26	0,72
6	6	10	10	0	26	0,62
7	10	11	5	0	26	0,72
8	11	9	6	0	26	0,73
9	7	6	12	1	26	0,58
10	6	7	11	2	26	0,56

Оценку нормированного показателя правильности выполнения курсантами технологических операций предлагается осуществлять по следующей формуле:

$$Q_T = m_i/T, \quad (3)$$

где Q_T – нормированный показатель правильности выполнения курсантами технологических операций;

m_i – число технологических операций, правильно выполненных i -ым курсантом;

T – общее число выполняемых технологических операций.

Для определения данного показателя использовались результаты оценки правильности выполнения курсантами технологических операций по созданию электронных карт по диапозитивам постоянного хранения и тиражным оттискам в среде ГИС «Карта 2011». В табл. 3 приведены результаты расчета нормированных показателей правильности выполнения курсантами экспериментальной группы технологических операций.

Таблица 3

Нормированные показатели правильности выполнения курсантами технологических операций

Порядковые номера курсантов	Общее число технологических операций	Число правильно выполненных операций	Q_T
1	31	28	0,90
2	31	27	0,87
3	31	29	0,94
4	31	25	0,81
5	31	23	0,74
6	31	20	0,65
7	31	25	0,81
8	31	26	0,84
9	31	21	0,68
10	31	15	0,48

Для оценки уровня мотивации к изучению дисциплины предлагается использовать диагностический тест, приведенный в работе [10] (рис. 2).

1	Что побуждает Вас изучать учебную дисциплину?	1. Боюсь получать плохие оценки.
		2. Стремлюсь получить хорошие оценки.
		3. Мне интересны отдельные вопросы данной учебной дисциплины.
		4. Потому что эта учебная дисциплина является интересным предметом.
		5. Потому что этого требуют командиры.
		6. Не хочу отставать от других курсантов.
		7. Потому что знания по этой учебной дисциплине необходимы для овладения моей будущей профессией.
		8. Считаю своим долгом учить все преподаваемые предметы, в том числе и эту учебную дисциплину.
2	Что побуждает Вас активно работать на занятиях?	9. Активно работаю только тогда, когда чувствую, что должны спросить, если бы было возможно, то часть занятий я бы пропускал.
		10. Активно работаю, когда понимаю материал, и когда преподаватель не дает отвлекаться от занятия.
		11. Активно работаю, потому что эта учебная дисциплина является нужным для меня предметом.
		12. Нравится изучать эту учебную дисциплину, потому что она для меня интересна.

Рис. 2. Диагностический тест для оценки уровня мотивации к изучению дисциплины «Геоинформационное картографирование» (начало)

3	Как вы относитесь к знаниям, получаемым в рамках учебной дисциплины?	13. Считаю, что знания, полученные в рамках этой учебной дисциплины, мне не пригодятся в моей профессиональной деятельности.
		14. Считаю, что знания только отдельных вопросов этой учебной дисциплины пригодятся мне в моей профессиональной деятельности.
		15. Считаю, что знания, полученные в рамках этой учебной дисциплины важны для моего общего развития.
		16. Считаю, что знания, полученные в рамках этой учебной дисциплины, пригодятся в моей будущей профессии.
4	Какая форма работы Вам больше нравится?	17. Слушать лекцию преподавателя.
		18. Слушать выступления других курсантов.
		19. Самому анализировать и рассуждать по поводу предлагаемых заданий.
		20. Самостоятельно искать пути решения, доказывать свое предположение и делать выводы.
5	Какое значение имеет изучение данной учебной дисциплины для Вашей будущей профессии?	21. Никакого.
		22. Изучение данной учебной дисциплины, позволяет мне систематизировать знания, полученные в рамках учебных дисциплин профессионального цикла.
		23. Самостоятельно приобретенные знания помогают овладеть практическими умениями, необходимыми в будущей профессии.
		24. Самостоятельно приобретенные знания помогут стать профессионалом.
6	Оцените свою активность работы на занятиях	25. Часто ли во время занятий Вам ничего не хочется делать?
		26. Повышается ли Ваша активность, если материал лекционного или практического занятия интересен?
		27. Часто ли сохраняется ваша активность до конца занятия?
		28. Часто ли, столкнувшись с трудностью при изучении теории и решении практических задач, вы доводите до конца начатое дело?
7	Определите необходимость знаний по учебной дисциплине	29. Считаете ли Вы, что наиболее трудные вопросы по этой учебной дисциплине можно было бы не изучать?
		30. Считаете ли Вы, что в жизни пригодятся только знания отдельных разделов этой учебной дисциплины?
		31. Считаете ли Вы, что для приобретения прочных знаний необходимо глубоко изучать теорию?
		32. Считаете ли Вы, что для Вашей будущей профессии необходимы глубокие знания всех разделов этой учебной дисциплины?
8	Определите свое отношение к получению знаний и умений	33. Бывает ли так, что у Вас не хватает умений, а Вы не хотите их приобрести?
		34. Считаете ли Вы, что при выполнении учебного задания главное – это получить результат, неважно какими способами?
		35. Стремитесь ли Вы научиться рациональным способам выполнения различных заданий?
		36. Часто ли Вы при выполнении учебного задания обращаетесь к рекомендованной основной и дополнительной литературе?
		37. Часто ли Вам нужны интересные факты для усвоения изучаемого материала?
		38. Часто ли бывает так, что на занятиях Вам интересно, а на самоподготовке нет желания заниматься?

Рис. 2. Диагностический тест для оценки уровня мотивации к изучению дисциплины «Геоинформационное картографирование» (продолжение)

	39. Часто ли Вы обсуждаете вопросы, затронутые на лекционных и практических занятиях, после их окончания?
	40. Часто ли Вы посвящаете время самостоятельному изучению вопросов этой учебной дисциплины?
	41. Часто ли вы пользуетесь возможностью списывать работы у других курсантов, а не выполнять их самостоятельно?
	42. Нравятся ли Вам типовые задания, решаемые по образцу?
	43. Нравятся ли Вам задания, которые требуют долгих размышлений, и к которым вы не знаете, как подступиться?
	44. Нравятся ли Вам задания, где нужно выдвигать гипотезы и теоретически обосновывать их?

Рис. 2. Диагностический тест для оценки уровня мотивации к изучению дисциплины «Геоинформационное картографирование» (окончание)

В табл. 4 приведена квалиметрическая шкала оценки суждений курсантов при ответах на вопросы теста.

Таблица 4

Квалиметрическая шкала оценки суждений курсантов

Суждение курсанта	Оценочный балл
Уверен	5
Больше уверен, чем не уверен	4
Не знаю	3
Больше не уверен, чем уверен	2
Не уверен	1

Приведенный выше (см. рис. 2) тест включает в себя три свойства мотивации: социальное; предметное и динамичное, каждое из них разбито на четыре уровня, которые характеризуют степень выраженности этих свойств (табл. 5).

Таблица 5

Бланк для оценки результатов тестирования

№ п/п	Уровни мотивации	Номера ответов / баллы, характеризующие свойства мотивации											Сумма баллов, b_i
		социальное				предметное				динамичное			
1	Первый	1	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41	
2	Второй	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42	
3	Третий	3	7	11	15	19	23	27	31	35	39	43	
4	Четвёртый	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	

Для оценки мотивации курсантов предлагается использовать квалиметрическую шкалу, представленную в (табл. 6).

Определение нормированных показателей уровня мотивации курсантов к изучению дисциплины осуществляется по результатам тестирования в соответствии с квалиметрической шкалой табл.6. В зависимости от соотношения полученных баллов определяются значения Q_M , которые заносятся в табл. 7.

Таблица 6

Квалиметрическая шкала оценки мотивации курсантов

№ п/п	Уровни мотивации	Баллы свойств мотивации	Соотношения баллов	Значения нормированного показателя мотивации к изучению дисциплины, Q_M
1	Первый	b_1	$\sum b_1 > \sum b_2, \sum b_3, \sum b_4$	0,25
2	Второй	b_2	$\sum b_2 > \sum b_1, \sum b_3, \sum b_4$	0,50
3	Третий	b_3	$\sum b_3 > \sum b_1, \sum b_2, \sum b_4$	0,75
4	Четвёртый	b_4	$\sum b_4 > \sum b_1, \sum b_2, \sum b_3$	1,00

Таблица 7

Нормированные показатели уровня мотивации курсантов к изучению дисциплины

Порядковые номера курсантов	Баллы свойств мотивации				Q_M
	b_1	b_2	b_3	b_4	
1	17	37	48	49	1,00
2	23	33	41	46	1,00
3	19	36	44	51	1,00
4	21	34	48	46	0,75
5	16	46	41	42	0,50
6	19	45	36	41	0,50
7	18	42	40	39	0,50
8	19	37	43	40	0,75
9	41	39	34	36	0,25
10	46	40	39	33	0,25

Блок 4. Определение для каждого свойства, входящего в «дерево информационной взаимосвязи», ненормированных и нормированных коэффициентов весомости. Для определения ненормированных коэффициентов весомости предлагается использовать метод анализа иерархий [12], при практической реализации которого все свойства попарно сравниваются друг с другом. Особенности данного метода подробно изложены в работах [6, 7].

Нормированные коэффициенты весомости определяют степень влияния отдельных свойств на интегральный показатель сформированности профессиональных компетенций. Они рассчитываются путем перемножения ненормированных коэффициентов весомости отдельных свойств, иерархически связанных друг с другом на «дереве информационной взаимосвязи», для этого используется следующая зависимость:

$$w_j = \overline{w}_{j1} \times \dots \times \overline{w}_{jn}, \quad (4)$$

где w_j – нормированный коэффициент весомости j -го свойства;
 $\overline{w}_{j1}, \overline{w}_{jn}$ – ненормированные коэффициенты весомости 1-го и n -го уровней «дерева информационной взаимосвязи», иерархически связанных в пределах одной ветви с j -м свойством;
 n – количество уровней в «дереве информационной взаимосвязи».

Значения w_j должны удовлетворять следующему условию:

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1, \quad w_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, m. \quad (5)$$

В результате выполненных расчетов для анализируемых свойств были получены следующие нормированные коэффициенты весомости:

1) качество усвоения учебного материала (Q_k): $w_1 = 0,32$;

2) степень обученности (Q_o): $w_2 = 0,22$;

3) правильность выполнения технологических операций (Q_T): $w_3 = 0,35$;

4) мотивация к изучению дисциплины (Q_M): $w_4 = 0,11$.

Блок 5. Определение интегрального показателя сформированности профессиональной компетенции. Для получения этого показателя используется следующая зависимость:

$$I = (Q_k \times w_1) + (Q_o \times w_2) + (Q_T \times w_3) + (Q_M \times w_4),$$

где I – интегральный показатель сформированности профессиональной компетенции;

Q_k, Q_o, Q_T, Q_M – нормированные показатели качества усвоения учебного материала, степени обученности курсантов, правильности выполнения технологических операций, мотивации к изучению дисциплины соответственно;

w_1, w_2, w_3, w_4 – нормированные коэффициенты весомости качества усвоения учебного материала, степени обученности курсантов, правильности выполнения технологических операций, мотивации к изучению дисциплины соответственно.

Результаты расчета интегральных показателей сформированности анализируемой профессиональной компетенции у группы курсантов 5-го курса, принимавших участие в апробации методики, приведены в табл. 8 и на рис. 3.

Таблица 8

Интегральные показатели сформированности анализируемой профессиональной компетенции у курсантов экспериментальной группы

Порядковые номера курсантов	Значения нормированных показателей свойств				I
	Q_k	Q_o	Q_T	Q_M	
1	0,89	0,84	0,90	1,00	0,90
2	0,83	0,72	0,87	1,00	0,84
3	0,86	0,74	0,94	1,00	0,88
4	0,66	0,68	0,81	0,75	0,73
5	0,71	0,72	0,74	0,50	0,70
6	0,39	0,62	0,65	0,50	0,54
7	0,60	0,72	0,81	0,50	0,69
8	0,51	0,73	0,84	0,75	0,70
9	0,36	0,58	0,68	0,25	0,51
10	0,33	0,56	0,48	0,25	0,42

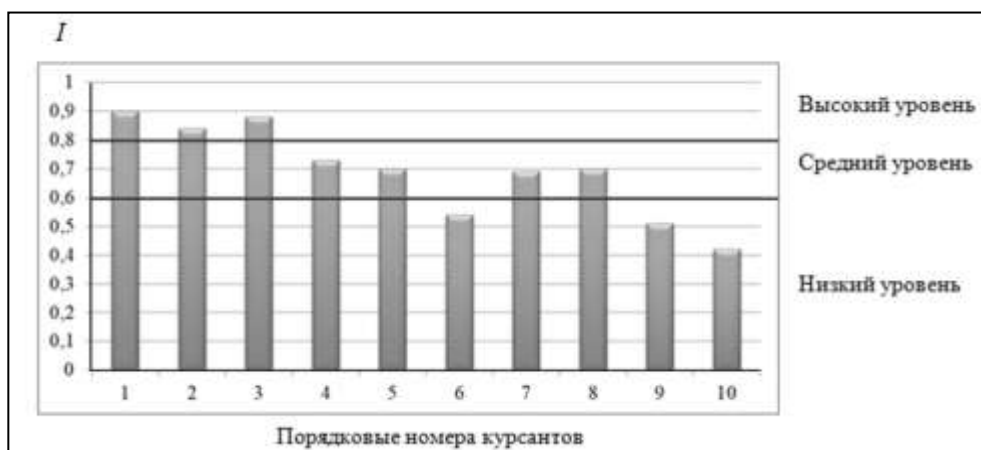


Рис. 3. Интегральные показатели сформированности анализируемой профессиональной компетенции у курсантов экспериментальной группы

Квалиметрическая шкала для определения уровня сформированности профессиональных компетенций курсантов (табл. 9) разработана с учетом подходов, изложенных в работе [3].

Таблица 9

Квалиметрическая шкала уровней сформированности профессиональных компетенций у курсантов

Уровни сформированности профессиональной компетенции	Значение интегрального показателя, <i>I</i>
Низкий	менее 0,60
Средний	0,60 – 0,80
Высокий	более 0,80

Исходя из полученных результатов, высоким уровнем сформированности анализируемой профессиональной компетенции обладают курсанты под порядковыми номерами 1, 2 и 3; средним – курсанты под порядковыми номерами 4, 5, 7 и 8; низким – курсанты под порядковыми номерами 6, 9 и 10.

Для курсантов с высоким уровнем сформированности профессиональной компетенции характерна ориентация на получение знаний и освоение технологий создания цифровых (электронных) топографических и специальных карт с использованием ГИС ВН как важнейшего элемента будущей профессиональной деятельности, характеризующего компетентность специалиста в области военной картографии. Этим курсантам свойственна высокая познавательная потребность и высокий уровень полноты и прочности знаний, что характеризуется показателями качества усвоения учебного материала и степенью их обученности. Они осознанно выполняют все технологические операции по созданию цифровых (электронных) топографических и специальных карт. У данных курсантов высокая мотивация к освоению дисциплины «Геоинформационное картографирование», что позволяет им эффективно организовывать и выполнять учебные задания.

Для курсантов со средним уровнем сформированности профессиональной компетенции характерна ориентация на освоение технологий создания цифровых (электронных) топографических и специальных карт с использованием ГИС ВН зачастую в ущерб получаемым знаниям. Они выполняют все требуемые технологические операции, но их последовательность из-за недостатка знаний плохо продумана, а сами действия не всегда осознанны и рациональны. У курсантов данного уровня мотивация к освоению дисциплины «Геоинформационное картографирование» сформирована недостаточно, поэтому, несмотря на то, что они могут самостоятельно планировать и реализовывать свою деятельность, у них недостаточно развиты умения брать на себя ответственность за результаты работы, критически оценивать собственную деятельность и деятельность других.

Для курсантов с низким уровнем сформированности профессиональной компетенции характерно недопонимание необходимости освоения дисциплины «Геоинформационное картографирование» и ее значения для будущей профессии. Они могут выполнить лишь отдельные операции. У них отсутствует способность эффективно организовывать собственную деятельность, брать на себя ответственность за результаты работы. Данные курсанты могут работать только под руководством других.

На основе полученных результатов выстраивается обратная связь и осуществляется корректировка образовательного процесса.

Предложенная методика позволяет интегрально оценивать сформированность профессиональных компетенций у курсантов при изучении дисциплин профессионального цикла.

Результаты ее апробации подтверждают результативность разработанных подходов, которые дают возможность детально и объективно выявлять пробелы и недостатки в освоении анализируемой учебной дисциплины, показывая перспективные направления корректировки ее содержания и преподавания. Она может быть использована в учебном процессе при про-

ведении мониторинговых исследований. Однако следует отметить, что данная работа не охватывает всего круга вопросов, связанных с решением этой проблемы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение перечня показателей, характеризующих сформированность у курсантов профессиональных компетенций, разработку инновационных форм тестовых заданий, применение информационных и коммуникационных технологий для практической реализации процедуры мониторинга.

Список используемых источников

1. *Азгальдов Г.Г.* Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). – М.: Экономика, 1982. – 256 с.
2. *Арефьев Н.В., Бреусов В.П., Осипов Г.К.* Основы формирования природно-аграрных систем: теория и практика. – СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 533 с.
3. *Беспалько В.П.* Мониторинг качества обучения – средство управления образованием // Мир образования. – 1996. – №2. – С. 31–36.
4. *Кунтурова Н.Б.* Особенности оценивания профессиональной компетентности будущих специалистов в процессе их обучения в вузе // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – №5 (86). – С. 194–198.
5. *Кунтурова Н.Б., Селихина Н.В.* Особенности исследования профессиональной компетентности офицерских кадров силовых структур // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур. – 2014. – №1. – С. 70–74.
6. Картографическое моделирование трасс трубопроводов в Арктической зоне Сибири / А.Г. Осипов, В.В. Дмитриев, С.А. Масленников и др. // География и природные ресурсы. – 2017. – №1. – С. 16–24.
7. *Осипов А.Г.* Многокритериальная оценка земельных ресурсов на основе квалиметрического анализа // Региональная экология. – 2003. – № 1-2. – С. 31–39.
8. *Осипов Г.К.* Системное проектирование профессиональной подготовки выпускников высших военно-учебных заведений на основе компетентностного подхода как условие повышения качества подготовки военных кадров / Г.К. Осипов, И.Ю. Воронков, В.В. Хиленко, М.А. Голубев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – № 642. – С. 185–191.
9. *Осипов Г.К., Хиленко В.В.* Научно-методические основы мониторинга формирования профессиональных компетенций у курсантов высших военно-учебных заведений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – № 652. – С. 215–226.
10. *Павлова Е.С.* Диагностика мотивации студентов вузов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – №2. – URL: <http://publikacia.net/archive/2014/2/2/48> (дата обращения: 02.02.2017).
11. *Полихрониди А.Х.* Технология интерактивного мониторинга качества освоения студентами колледжа основной профессиональной образовательной программы: автореф. дис. канд. педагогич. наук. – М., 2014. – 30 с.
12. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
13. *Симонов В.П.* Диагностика степени обученности учащихся: учебно-справочное пособие – М.: МПА, 1999. – 45 с.

И.Ю. Воронков,
кандидат воен. наук, доцент;
В.Г. Зиновьев,
кандидат техн. наук, доцент;
Н.С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНКУРСА НА ЛУЧШУЮ ЛЕКЦИЮ СРЕДИ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ АКАДЕМИИ

Рассмотрена постановка задачи оценивания экспертами результатов распределенных по времени и месту выступлений участников конкурса. Проанализированы особенности и проблемные вопросы экспертного оценивания результатов конкурса по неполным данным. Обоснована необходимость введения методики оценивания результатов конкурса с восполнением и взвешиванием данных. Приведен пример практического оценивания результатов конкурса на лучшую лекцию среди преподавателей академии.

Ключевые слова: экспертное оценивание, интегральная оценка, неполные данные, поправочный коэффициент, масштабный коэффициент, индикатор наличия оценки, индикатор достоверности оценки, восполнение данных.

ВВЕДЕНИЕ

В вузах сложилась практика ежегодного проведения конкурса на лучшую лекцию среди преподавателей. Оценивание результатов конкурса и определение его победителей обычно производятся на основе экспертного оценивания.

Сущность экспертного оценивания заключается в проведении экспертами на основании выбранной методики интуитивно-логического анализа результатов конкурса с их количественным оцениванием и формальной обработкой.

Будем полагать, что все члены конкурсной комиссии (эксперты) обладают необходимым и достаточным опытом организации и проведения оценивания конкурсов, а их групповое мнение обеспечивает высокую достоверность. Это позволяет использовать статистические методы обработки результатов [6], которая производится после представления экспертами своих результатов оценивания участников конкурса – лекторов.

Для оценивания результатов конкурса одной из наиболее употребительных методик является *непосредственное оценивание*, представляющее собой приписывание участникам конкурса числовых значений в шкале интервалов. Эксперту предлагается поставить в соответствие каждому участнику конкурса точку на непрерывной числовой оси, например на отрезке $[0, 1]$. Эквивалентным по сравниваемым показателям участникам конкурса приписывается одно и то же число. Измерение предпочтения участников конкурса в шкале интервалов может быть осуществлено с определенной достоверностью только в случае достаточно полной информированности экспертов об участниках конкурса, что встречается не очень часто. С целью некоторого ослабления этих условий и за счет уменьшения точности измерения вместо оценки на непрерывной числовой оси рассматривают *балльную* оценку. Это эквивалентно дискретизации числовой оси на отрезки, каждому из которых приписывается определенный балл. Эксперт дает числовую оценку участнику конкурса – балл с точностью до попадания линии от участника конкурса в отрезок числовой оси. Могут применяться самые разнообразные (2, 3, 4, 5, 7, 10, 12, ... 100-балльные) шкалы [1–4].

Одним из типовых видов оценивания результатов конкурсов является оценивание каждым членом конкурсной комиссии – экспертом – выступлений всех участников конкурса.

Продолжительность проведения конкурса составляет от одного до двух месяцев. В силу

различных причин (занятия, наряды, совещания, командировки и т.п.) эксперты – члены конкурсной комиссии – практически не в состоянии посетить все лекции преподавателей – участников конкурса.

Возникает проблема оценивания результатов конкурса и определения его победителей, когда каждый эксперт оценивает выступления *не всех*, а лишь какой-то части участников конкурса, а выступление каждого участника конкурса оценивается *не всеми* экспертами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ ПО НЕПОЛНЫМ ДАННЫМ

Пусть имеется множество экспертов $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_m\}$ и множество участников конкурса $\mathcal{L} = \{\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n\}$. Каждый эксперт должен оценить выступления не менее $r \leq n$ участников конкурса. В общем виде интегральная (итоговая) оценка x_i i -го участника имеет вид:

$$x_i = f(s, p_k, t_k, u_{ijkl}, d_{ij}, v_{ij}, x_{ij}, q_j, m, r_j, h_j), \quad k=1, 2, \dots, s, \quad l=1, 2, \dots, t_k, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

- где s – число уровней оценивания выступления каждого участника конкурса;
 p_k – значение масштабного коэффициента k -го уровня оценивания выступления каждого участника конкурса ($k=1, 2, \dots, s$);
 t_k – число критериев оценивания k -го уровня оценивания ($k=1, 2, \dots, s$);
 u_{ijkl} – значение l -го показателя оценивания k -го уровня оценивания i -го участника j -м экспертом ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m, k=1, 2, \dots, s, l=1, 2, \dots, t_k$), $u_{ijkl} \in \{\text{балл } 1, \text{балл } 2, \dots, \text{балл } w\}$;
 d_{ij} – значение функции-индикатора наличия оценки i -му участнику j -м экспертом ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$);
 v_{ij} – значение функции-индикатора достоверности оценки i -му участнику j -м экспертом ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$);
 x_{ij} – значение оценки i -му участнику j -м экспертом ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$);
 q_j – значение коэффициента уровня компетентности j -го эксперта ($j=1, 2, \dots, m$);
 m – число экспертов;
 r_j – число проведенных оцениваний j -м экспертом ($j=1, 2, \dots, m$);
 h_j – значение поправочного коэффициента оценки x_{ij} i -му участнику j -м экспертом ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$).

Для простоты процедуры оценивания интегральную оценку (1) будем искать в аддитивной форме.

В целях удобства работы с неполными данными и их дальнейшей обработки представим результаты оценивания в матричном виде:

$$X_{[n,m]} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где x_{ij} – оценка i -му участнику конкурса j -м экспертом.

Вектор-строка $X_{(m)} = \langle x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im} \rangle$ представляет собой совокупность оценок i -му участнику конкурса ($i=1, 2, \dots, n$), а вектор-столбец $X_{(n)}^T = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nj}]$ – совокупность оценок j -го эксперта ($j=1, 2, \dots, m$).

Замечание 1. Если значения индексов i или j превышают 9, то они пишутся через запятую, например: x_{19} , но $x_{1,19}$, $x_{19,1}$.

Замечание 2. Так как все эксперты обладают необходимым и достаточным опытом организации и проведения оценивания конкурсов, то будем полагать их уровень компетентности одинаковым и положим значение q_j коэффициента уровня компетентности каждого эксперта равным $q_j = 1 / m$, $j = 1, 2, \dots, m$, где m – число экспертов. Этот коэффициент нормирован, то есть $\sum_{j=1}^m q_j = 1$. Поэтому в нашем случае можно коэффициент уровня компетентности не учитывать, так как значение интегральной оценки (1) с точностью до аддитивного сомножителя от этого не изменится.

Вследствие того, что каждый эксперт оценивает выступления *не всех* участников конкурса, а выступление каждого участника оценивается *не всеми* экспертами, то части элементов матрицы $X_{[n,m]}$ присваиваются нулевые значения. Для этого введем следующую функцию-индикатор наличия оценки i -му участнику j -м экспертом:

$$d_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } i\text{-й участник конкурса не оценивался } j\text{-м экспертом,} \\ 1, & \text{если } i\text{-й участник оценивался } j\text{-м экспертом } i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m. \end{cases} \quad (3)$$

Поэтому каждый элемент матрицы (2)

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } i\text{-й участник конкурса не оценивался } j\text{-м экспертом,} \\ g(s, p_k, t_k, u_{ijkl}, d_{ij}, v_{ij}, h_j), & k=1,2,\dots,s, l=1,2,\dots,t_k, i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m. \end{cases} \quad (4)$$

Функция g в аддитивной форме имеет следующий вид:

$$x_{ij} = g(s, p_k, t_k, u_{ijkl}, d_{ij}, v_{ij}, h_j) = \sum_{k=1}^s \sum_{l=1}^{t_k} d_{ij} v_{ij} p_k h_j u_{ijkl}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Замечание 3. Априори значения оценок являются случайными величинами, поэтому обработка результатов конкурса – реализаций x_{ij} основана на теории статистического оценивания [6], то есть при синтезе алгоритма оценивания используются *статистики* $\xi_i = z(\xi_{i1}, \xi_{i2}, \dots, \xi_{ij}, \dots, \xi_{im})$ – произвольные функции случайной выборки.

На основе исходных данных (1) необходимо разработать методику синтеза функций g и f для формирования соответствующих оценок.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК

Рассмотрим основные возможные варианты методики формирования интегральных оценок результатов конкурса по неполным данным.

Вариант 1 – оценивание по выборочному математическому ожиданию.

Интегральные оценки результатов конкурса вычисляются как статистический аналог среднего значения (математического ожидания) – среднее арифметическое (статистическое математическое ожидание, статистическое среднее):

$$x_i = A_1[X_{(m)}] = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^m x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

где n_i – число экспертов, оценивших выступление i -го участника конкурса, $n_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}$.

Данная оценка наиболее информативна, так как использует весь объем результатов кон-

курса и обладает наименьшей дисперсией по сравнению с другими оценками (медианой, полусуммой минимальной и максимальной оценок и т.д.) [6]. Но из-за того, что каждый эксперт оценивает выступления *не всех* участников конкурса, а выступление каждого участника конкурса оценивается *не всеми* экспертами, данная оценка несет в себе значительный элемент случайности результатов.

Вариант 2 – оценивание с удалением недостоверных данных.

В случае, если некоторые эксперты провели недостаточное число (менее r) оцениваний или ставят всем конкурсантам максимальное число баллов, то такие недостоверные и тенденциозные данные исключаются. Для этого введем следующую функцию-индикатор достоверности оценки i -му участнику j -м экспертом:

$$v_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } j\text{-й эксперт оценил менее } r \text{ участников конкурса,} \\ 1, & \text{если } j\text{-й эксперт оценил не менее } r \text{ участников конкурса,} \end{cases} \quad (7)$$

где $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$.

Тогда интегральная оценка примет следующий вид:

$$x_i = A_2[X_{(m)}] = \frac{\sum_{j=1}^m v_{ij} x_{ij}}{\sum_{j=1}^m d_{ij} - \sum_{j=1}^m v_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

где $\sum_{j=1}^m v_{ij}$ – число экспертов, оценивших менее r участников конкурса.

К *достоинствам* данной методики относится, как и в варианте 1, простота вычисления интегральных оценок результатов конкурса. За счет исключения недостоверных и тенденциозных данных качество оценивания улучшается.

Основным *недостатком* методики остается использование не всех данных конкурса, то есть оценивание производится по неполной информации, по этой причине интегральные оценки результатов конкурса имеют большую дисперсию.

Вариант 3 – оценивание со взвешиванием данных.

Чем больше оцениваний проведет эксперт, тем достовернее будут его оценки участникам конкурса. Логично принять во внимание степень участия экспертов в конкурсе, введя так называемый *поправочный* весовой коэффициент

$$h_j = r_j / m, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

где r_j – число проведенных оцениваний j -м экспертом,

m – число экспертов.

С учетом такого рода взвешивания данных интегральная оценка будет равна

$$x_i = A_3[X_{(m)}] = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^m h_j x_{ij} = \frac{1}{n_i m} \sum_{j=1}^m r_j x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Здесь n_i – число экспертов, оценивших выступление i -го участника конкурса, $n_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}$.

За счет введения поправочного коэффициента вес недостоверных и тенденциозных данных снижается, а достоверных – повышается, и качество оценивания улучшается.

Недостатком данного варианта является то, что оценивание по-прежнему производится по неполной информации.

Вариант 4 – оценивание с удалением и взвешиванием данных.

Возможен вариант оценивания в виде совмещения вариантов 2 и 3, то есть оценивание результатов конкурса с удалением недостоверных и тенденциозных данных и учетом поправочного весового коэффициента (взвешиванием данных).

С учетом формул (8)–(10) интегральная оценка вычисляется следующим образом:

$$x_i = A_4[X_{(m)}] = \frac{\sum_{j=1}^m v_{ij} h_j x_{ij}}{\sum_{j=1}^m d_{ij} - \sum_{j=1}^m v_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^m v_{ij} r_j x_{ij}}{m \left(\sum_{j=1}^m d_{ij} - \sum_{j=1}^m v_{ij} \right)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

где $h_j = r_j / m$ – значение поправочного коэффициента ($j = 1, 2, \dots, m$);
 m – число экспертов;

$\sum_{j=1}^m v_{ij}$ – число экспертов, оценивших менее r участников конкурса;

$\sum_{j=1}^m d_{ij}$ – число экспертов, оценивших выступление i -го участника конкурса.

За счет исключения недостоверных и тенденциозных данных и введения поправочного коэффициента качество оценивания улучшается, но по-прежнему оценивание производится по неполной информации.

Вариант 5 – оценивание с восполнением данных.

С целью уменьшения элемента случайности введем операцию *восполнения данных* путем замены нулевых элементов x_{ij} в матрице (2) статистическим математическим ожиданием

$$\tilde{x}_j = A_5[X_{(n)}^T] = \frac{1}{r_j} \sum_{i=1}^n x_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (12)$$

где m – число экспертов;

r_j – число проведенных оцениваний j -м экспертом.

То есть участникам конкурса, не оцененным экспертом \mathcal{E}_j , ставится оценка, равная среднему арифметическому оценок эксперта \mathcal{E}_j .

Тогда интегральную оценку x_i i -го участника можно представить в следующем виде:

$$x_i = A_6[X_{(m)}] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \tilde{x}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

где \tilde{x}_{ij} – значение оценки i -му участнику j -м экспертом ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$):

$$\tilde{x}_{ij} = \begin{cases} \tilde{x}_j, & \text{если } i\text{-й участник конкурса не оценивался } j\text{-м экспертом,} \\ x_{ij}, & \text{если } i\text{-й участник конкурса оценивался } j\text{-м экспертом.} \end{cases} \quad (14)$$

Оценивание производится по самой полной в данных условиях информации, интегральные оценки x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) получают более сглаженными, и элемент случайности при этом снижается.

Вариант 6 – оценивание с восполнением и взвешиванием данных.

Наиболее полным вариантом оценивания является совмещение вариантов 4 и 5, то есть оценивание результатов конкурса с восполнением и взвешиванием данных.

С учетом формул (10), (12)–(14) получаем следующую интегральную оценку:

$$x_i = A_7[X_{(m)}] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m h_j \tilde{x}_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_j \tilde{x}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

где m – число экспертов;

r_j – число проведенных оцениваний j -м экспертом;

\tilde{x}_{ij} – значение оценки i -му участнику j -м экспертом ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$).

Таким образом, для случая, когда каждый эксперт оценивает выступления *не всех* участников конкурса, а выступление каждого участника конкурса оценивается *не всеми* экспер-

тами, оценивание производится по наиболее полной информации, интегральные оценки x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) получаются более сглаженными и элемент случайности при этом минимален – в том смысле, что все члены конкурсной комиссии – эксперты – обладают необходимым и достаточным опытом организации и проведения оценивания конкурсов, а их групповое мнение обеспечивает высокую достоверность.

ПРИМЕР ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНКУРСА ПО НЕПОЛНЫМ ДАННЫМ

Рассмотрим пример практического применения предложенной методики по реальной информации – данным конкурса академии на лучшую лекцию среди преподавателей (ноябрь 2019 г.): $m = 15$ экспертов – членов конкурсной комиссии проводили оценивание $n = 17$ участников конкурса. Каждый эксперт должен был оценить лекции не менее $r = 5$ участников конкурса. Уровни оценивания лекции [5]: u_1 – организация; u_2 – содержание; u_3 – методика проведения. Сомножители – значения p_k масштабных коэффициентов k -го уровня оценивания выступления каждого участника были определены следующим образом:

$$p_1 = 0,1, p_2 = 0,3, p_3 = 0,3.$$

Организация лекции оценивалась согласно следующим критериям:

u_{11} – своевременность начала занятия;

u_{12} – наличие утвержденных методических материалов, наглядных пособий и качество их разработки;

u_{13} – уровень готовности к занятию обучающихся (подготовленность учебных принадлежностей и рабочих мест, наличие литературы и учебных пособий, конспектов, внешний вид, соблюдение формы одежды);

u_{14} – контроль за ведением конспектов обучающихся;

u_{15} – дисциплина на занятиях, выполнение требований общевоинских уставов ВС РФ, соблюдение норм воинского этикета и правил воинской вежливости.

Содержание лекции оценивалось согласно следующим критериям:

u_{21} – соответствие темы и учебных вопросов тематическому плану изучения дисциплины, расписанию учебных занятий, правильность определения цели занятия;

u_{22} – научность и новизна изучаемого материала;

u_{23} – профессиональная направленность занятия, связь теоретических положений с практикой будущей деятельности обучающихся;

u_{24} – наличие связи с предыдущими занятиями, со смежными дисциплинами;

u_{25} – материалы контроля знаний (контрольные задания, тесты, опросные карточки и т.д.).

Методика проведения лекции оценивалась согласно следующим критериям:

u_{31} – соблюдение структуры занятия (доведение до обучающихся порядка изучения темы, выделение главных смысловых разделов и логичность перехода к ним);

u_{32} – обоснованность и педагогическая целесообразность применения конкретных методов и приемов обучения на занятии;

u_{33} – знание преподаваемого предмета, умение выстраивать контакт с аудиторией и умение управлять ею, наличие обратной связи, активность курсантов;

u_{34} – целесообразность распределения времени по элементам занятия;

u_{35} – доходчивость изложения учебного материала, умение выделить главное и использовать ранее изученные знания;

u_{36} – полнота и эффективность использования на занятии технических средств обучения и имеющейся учебно-материальной базы;

u_{37} – логичность завершения лекции (подведение итогов, рекомендации по самостоятельной работе для углубления и практического применения знаний по данной теме, ответы на вопросы).

Каждый показатель u_{kijl} оценивается по четырехбалльной шкале (2 – «неудовлетворитель-

но», 3 – «удовлетворительно», 4 – «хорошо», 5 – «отлично»):

$$u_{ijkl} \in \{2, 3, 4, 5\}, k = 1, 2, \dots, s, l = 1, 2, \dots, t_k, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

Оценки x_{ij} в этом случае примут вид:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= g(s, t_k, u_{ijkl}) = \sum_{k=1}^s \sum_{l=1}^{t_k} p_k u_{ijkl} = p_1(u_{ij11} + u_{ij12} + \dots + u_{ij15}) + \\ &+ p_2(u_{ij21} + u_{ij22} + \dots + u_{ij25}) + p_3(u_{ij31} + u_{ij32} + \dots + u_{ij37}) = \\ &= 0,1(u_{ij11} + u_{ij12} + \dots + u_{ij15}) + 0,3(u_{ij21} + u_{ij22} + \dots + u_{ij25}) + \\ &+ 0,3(u_{ij31} + u_{ij32} + \dots + u_{ij37}), i = 1, 2, \dots, 17, j = 1, 2, \dots, 15. \end{aligned} \quad (17)$$

Наибольшая возможная оценка $x_{\max} = 0,1(5 \times 5) + 0,3(5 \times 5) + 0,3(5 \times 7) = 2,5 + 7,5 + 10,5 = 20,5$, т.е. эксперт оценил все показатели лекции участника на балл «отлично».

Наименьшая возможная оценка $x_{\min} = 0,1(2 \times 5) + 0,3(2 \times 5) + 0,3(2 \times 7) = 1,0 + 3,0 + 4,2 = 8,2$, т.е. эксперт оценил все показатели лекции участника на балл «неудовлетворительно».

Если все показатели лекции участника оценены на балл «хорошо», то оценка будет равна $x_{\text{хор}} = 0,1(4 \times 5) + 0,3(4 \times 5) + 0,3(4 \times 7) = 2,0 + 6,0 + 8,4 = 16,4$.

Если все показатели лекции участника оценены на балл «удовлетворительно», то оценка будет равна $x_{\text{уд}} = 0,1(3 \times 5) + 0,3(3 \times 5) + 0,3(3 \times 7) = 1,5 + 4,5 + 6,3 = 12,3$.

Медиана и выборочное математическое ожидание совпадают: $x_{\text{med}} = 14,35$.

Рассмотрим основные варианты методики формирования интегральных оценок результатов конкурса по неполным данным для данного примера.

Вариант 1 – методика оценивания по статистическому математическому ожиданию полностью соответствует положению о конкурсе [5].

Интегральные оценки результатов конкурса вычисляются как среднее арифметическое:

$$x_i = A_1[X_{(15)}] = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}, i = 1, 2, \dots, 17. \quad (18)$$

Здесь n_i – число экспертов, оценивших выступление i -го участника конкурса, $n_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}$.

Результаты подсчета экспертных оценок приведены в табл. 1.

Для дальнейшего анализа будем использовать следующие статистические характеристики: – интегральные статистические средние оценок лекций, поставленных экспертами \mathcal{E}_j :

$$\tilde{x}_j = A_5[X_{(17)}^T] = \frac{1}{r_j} \sum_{i=1}^{17} x_{ij}, j = 1, 2, \dots, 15; \quad (19)$$

– статистическое среднее интегральных оценок лекций, поставленных всеми экспертами:

$$\tilde{x} = A_8[X_{[n,m]}] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{17} \sum_{j=1}^{15} \frac{1}{r_j} x_{ij} = 17,86. \quad (20)$$

Таблица 1

Результаты подсчета экспертных оценок. Вариант 1

\mathcal{E}	\mathcal{E}_1	\mathcal{E}_2	\mathcal{E}_3	\mathcal{E}_4	\mathcal{E}_5	\mathcal{E}_6	\mathcal{E}_7	\mathcal{E}_8	\mathcal{E}_9	\mathcal{E}_{10}	\mathcal{E}_{11}	\mathcal{E}_{12}	\mathcal{E}_{13}	\mathcal{E}_{14}	\mathcal{E}_{15}	x_i
r_j	16	10	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	
\tilde{x}_j	16,2	15,7	16,6	18,0	18,6	19,0	15,8	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3	
\mathcal{L}_1	17,7	0	0	20,1	19,2	20,5	0	0	0	19,5	19,5	0	0	20,5	0	19,6
\mathcal{L}_2	17,6	0	17,0	0	18,9	0	0	0	0	17,6	0	20,5	0	20,5	18,9	18,7
\mathcal{L}_3	17,2	16,4	0	0	0	20,5	0	0	16,5	19,9	20,5	0	19,1	0	0	18,6
\mathcal{L}_4	16,8	0	0	18,5	18,3	0	0	0	0	0	0	0	0	20,5	0	18,5
\mathcal{L}_5	16,4	0	0	0	0	0	0	20,5	0	0	0	18,6	0	0	0	18,5

Окончание табл. 1

Э	Э ₁	Э ₂	Э ₃	Э ₄	Э ₅	Э ₆	Э ₇	Э ₈	Э ₉	Э ₁₀	Э ₁₁	Э ₁₂	Э ₁₃	Э ₁₄	Э ₁₅	x_i
r_j	16	10	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	
\tilde{x}_j	16,2	15,7	16,6	18,0	18,6	19,0	15,8	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3	
Л ₆	17,2	16,5	0	19,5	18,9	0	0	19,6	0	18,3	18,1	0	0	0	0	18,3
Л ₇	0	16,3	17,7	0	0	20,5	0	0	0	0	0	19,2	16,8	0	0	18,1
Л ₈	17,6	15,4	0	0	0	0	18,5	19,3	0	0	0	0	0	0	18,2	17,8
Л ₉	14,9	14,7	0	0	18,3	0	0	0	0	0	0	0	0	20,5	17,9	17,3
Л ₁₀	13,8	14,8	16,6	19,5	0	19,5	0	0	17,7	0	0	0	0	0	0	17,0
Л ₁₁	17,3	19,0	16,0	0	0	0	14,9	0	0	0	0	0	0	0	0	16,8
Л ₁₂	15,4	0	17,7	0	0	15,6	0	0	0	16,9	0	0	16,0	0	0	16,3
Л ₁₃	14,9	0	15,6	17,5	0	0	14,2	17,8	15,0	0	0	0	0	0	0	15,8
Л ₁₄	15,4	14,3	0	14,9	0	17,2	0	0	0	0	0	0	17,3	0	0	15,8
Л ₁₅	14,9	13,6	15,4	16,3	17,7	0	16,3	0	16,5	0	0	15,1	0	0	0	15,7
Л ₁₆	15,8	0	0	0	0	0	15,2	0	0	0	0	0	0	0	0	15,5
Л ₁₇	-	-	0	0	0	0	0	-	-	0	-	0	0	0	0	0

Пояснения к табл. 1.

1. Место, занятое участником конкурса Л_{*i*}, соответствует значению его индекса *i*.

2. В столбце « x_i » содержатся значения интегральных оценок участников конкурса Л_{*i*}. Результаты округлены до первого знака после запятой. Участник конкурса – лектор Л₄ имеет интегральную оценку $x_4 = 18,53$, а лектор Л₅ – оценку $x_5 = 18,50$, лектор Л₁₃ имеет интегральную оценку $x_{13} = 15,83$, а лектор Л₁₄ – оценку $x_{14} = 15,82$.

3. В клетке (*i, j*) таблицы на пересечении строки Л_{*i*} и столбца Э_{*j*} содержится интегральная оценка x_{ij} участнику конкурса Л_{*i*}, поставленная экспертом Э_{*j*}.

4. Максимальная оценка x_{ij} , поставленная *i*-му участнику *j*-м экспертом, выделяется полужирным шрифтом (например, **20,5**).

5. В строке « r_j » указаны числа оцениваний, проведенных экспертом Э_{*j*}.

6. В строке « \tilde{x}_j » содержатся согласно формуле (19) значения в виде среднего арифметического оценок лекций, поставленных экспертом Э_{*j*}. Эти оценки выделены курсивом.

7. Число 0 означает, что участник конкурса Л_{*i*} не оценивался экспертом Э_{*j*}.

8. Дефис (-) в строке Л₁₇ означает, что эксперт Э_{*j*} присутствовал на лекции, но участник конкурса – лектор Л₁₇ был отстранен от участия в конкурсе за несоблюдение требований положения о конкурсе [5]. Поэтому его результаты были аннулированы и в дальнейшем не рассматриваются.

К достоинствам данной методики относится простота вычисления интегральных оценок результатов конкурса.

Основным недостатком методики является значительный элемент случайности результатов из-за того, что каждый эксперт оценивает выступления *не всех* участников конкурса, а выступление каждого участника конкурса оценивается *не всеми* экспертами.

Так, например, участнику Л₁₆ очень не повезло, так как он оценивался всего двумя, причем «строгими», экспертами: их оценки $x_{16,1} = 15,8$ и $x_{16,7} = 15,2$, что существенно меньше интегрального статистического среднего $\tilde{x} = 17,86$.

А участнику Л₅ повезло, так как он был оценен тремя экспертами, и один из них поставил максимальную оценку (20,5 баллов).

Явно повезло и участникам Л₁, Л₂ и Л₃, так как они были оценены наибольшим числом максимальных оценок (20,5 баллов).

Результаты оценивания эксперта Э₁₄ – все четыре участника конкурса, которых он оценил, имеют максимальный балл, равный 20,5 – привели к значительному искажению результатов конкурса в целом.

Вариант 2 – оценивание с удалением недостоверных данных.

Анализ результатов подсчета интегральных оценок (см. табл. 1) показывает, что некоторые эксперты провели небольшое число оцениваний качества лекций участников, причем эксперт Э₁₄ всем конкурсантам поставил максимальное число баллов – 20,5. Поэтому такие сомнительные данные целесообразно исключить.

Результаты подсчета по формуле (8) экспертных оценок с удалением сомнительных данных приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты подсчета экспертных оценок. Вариант 2 (с удалением данных)

Э	Э ₁	Э ₂	Э ₃	Э ₄	Э ₅	Э ₆	Э ₇	Э ₈	Э ₉	Э ₁₀	Э ₁₁	Э ₁₂	Э ₁₃	Э ₁₄	Э ₁₅	x_i B1	x_i B2	ΔM
r_j	16	10	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3			
Л ₁	17,7	0	0	20,1	19,2	20,5	0	0	0	19,5	0	0	0	0	0	19,6	19,4/1	0
Л ₂	17,6	0	17,0	0	18,9	0	0	0	0	17,6	0	0	0	0	0	18,7	18,0/6	-4
Л ₃	17,2	16,4	0	0	0	20,5	0	0	16,5	19,9	0	0	0	0	0	18,6	18,1/5	-2
Л ₄	16,8	0	0	18,5	18,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,5	17,9/7	-3
Л ₅	16,4	0	0	0	0	0	0	20,5	0	0	0	0	0	0	0	18,5	18,5/2	+3
Л ₆	17,2	16,5	0	19,5	18,9	0	0	19,6	0	18,3	0	0	0	0	0	18,3	18,3/3	+3
Л ₇	0	16,3	17,7	0	0	20,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,1	18,2/4	+3
Л ₈	17,6	15,4	0	0	0	0	18,5	19,3	0	0	0	0	0	0	0	17,8	17,7/8	0
Л ₉	14,9	14,7	0	0	18,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,3	16,0/12	-3
Л ₁₀	13,8	14,8	16,6	19,5	0	19,5	0	0	17,7	0	0	0	0	0	0	17,0	17,0/9	+1
Л ₁₁	17,3	19,0	16,0	0	0	0	14,9	0	0	0	0	0	0	0	0	16,8	16,8/10	+1
Л ₁₂	15,4	0	17,7	0	0	15,6	0	0	0	16,9	0	0	0	0	0	16,3	16,4/11	+1
Л ₁₃	14,9	0	15,6	17,5	0	0	14,2	17,8	15,0	0	0	0	0	0	0	15,8	15,8/13	0
Л ₁₄	15,4	14,3	0	14,9	0	17,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,8	15,5/16	-2
Л ₁₅	14,9	13,6	15,4	16,3	17,7	0	16,3	0	16,5	0	0	0	0	0	0	15,7	15,8/14	+1
Л ₁₆	15,8	0	0	0	0	0	15,2	0	0	0	0	0	0	0	0	15,5	15,5/15	+1

Пояснения к табл. 2.

1. Эксперты Э₁₁ – Э₁₅ провели недостаточное число оцениваний, поэтому их оценки заменены нулями (полужирный шрифт). Число 0 (обычный шрифт) означает, что участник конкурса Л_{*i*} не оценивался экспертом Э_{*j*}.

2. В строке « r_j » указаны числа оцениваний, проведенных экспертом Э_{*j*}.

3. В клетке (i, j) таблицы на пересечении строки Л_{*i*} и столбца Э_{*j*} содержится интегральная оценка x_{ij} участнику конкурса Л_{*i*}, поставленная экспертом Э_{*j*}.

4. Максимальная оценка x_{ij} , поставленная *i*-му участнику *j*-м экспертом, выделяется полужирным шрифтом (например, **20,5**).

5. В столбце « x_i B1» содержится интегральная оценка x_i участнику Л_{*i*}, для варианта 1.

6. В столбце « x_i B2» содержится интегральная оценка x_i и соответствующее ей место участника Л_{*i*} для варианта 2.

7. В столбце « ΔM » содержится разность мест участника Л_{*i*} для варианта 1 и варианта 2.

По сравнению с вариантом 1 участники Л₂, Л₃, Л₄ и Л₉ потеряли в совокупности 12 мест из-за того, что они были оценены наибольшим числом максимальных оценок (20,5 баллов) экспертами, данные которых были исключены из обработки вследствие недостаточного числа оцениваний.

За счет потерь Л₂, Л₃, Л₄ и Л₉ участники Л₅, Л₆ и Л₇ поднялись в совокупности на 9 мест.

У участников Л₅, Л₆, Л₁₀, Л₁₁, Л₁₃ и Л₁₆ интегральные оценки в варианте 2 не изменились относительно варианта 1, но благодаря исключению недостоверных данных положение этих участников улучшилась на 9 мест.

В итоге из 16 участников трое остались на своих прежних местах, пятеро опустились вниз (от двух до четырех позиций), а семеро поднялись вверх, что свидетельствует о более объективном распределении мест.

Исключение недостоверных и тенденциозных данных улучшает качество оценивания.

Процедура вычисления интегральных оценок результатов конкурса после удаления недо-
стоверных и тенденциозных данных такая же, как и в варианте 1.

Основным *недостатком* методики является использование не всех данных конкурса, по-
этому данная оценка несет в себе значимый элемент случайности результатов.

Вариант 3 – оценивание со взвешиванием данных.

Поправочный коэффициент согласно выражению (9) вычисляется как

$$h_j = r_j / 17, j = 1, 2, \dots, 15, \tag{21}$$

где r_j – число проведенных оцениваний j -м экспертом. Тогда

$$x_i = A_3[X_{(15)}] = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{15} h_j x_{ij} = \frac{1}{n_i m} \sum_{j=1}^{15} r_j x_{ij}, i = 1, 2, \dots, 17. \tag{22}$$

Здесь n_i – число экспертов, оценивших выступление i -го участника конкурса, $n_i = \sum_{j=1}^{15} d_{ij}$.

Результаты подсчета по формуле (22) экспертных оценок со взвешиванием данных приве-
дены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты подсчета экспертных оценок. Вариант 3 (со взвешиванием данных)

Э	Э ₁	Э ₂	Э ₃	Э ₄	Э ₅	Э ₆	Э ₇	Э ₈	Э ₉	Э ₁₀	Э ₁₁	Э ₁₂	Э ₁₃	Э ₁₄	Э ₁₅	x_i В1	x_i В3	ΔМ
r_j	16	10	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3			
h_j	0,94	0,59	0,41	0,41	0,35	0,35	0,29	0,29	0,29	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24	0,18			
Л ₁	16,6	0	0	8,2	6,7	7,2	0	0	0	5,7	4,6	0	0	4,8	0	19,6	7,69/9	-8
Л ₂	16,5	0	7,0	0	6,6	0	0	0	0	5,1	0	4,8	0	4,8	3,4	18,7	6,9/13	-11
Л ₃	16,2	9,7	0	0	0	7,2	0	0	4,8	5,8	4,8	0	4,5	0	0	18,6	7,56/10	-7
Л ₄	15,8	0	0	7,6	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0	4,8	0	18,5	8,65/3	+1
Л ₅	15,4	0	0	0	0	0	0	5,9	0	0	0	4,4	0	0	0	18,5	8,58/4	+1
Л ₆	16,2	9,7	0	8,0	6,6	0	0	5,7	0	5,3	4,3	0	0	0	0	18,3	7,96/7	-1
Л ₇	0	9,6	7,3	0	0	7,2	0	0	0	0	0	4,5	4,0	0	0	18,1	6,50/16	-9
Л ₈	16,5	9,1	0	0	0	0	5,4	5,6	0	0	0	0	0	0	3,3	17,8	7,97/6	+2
Л ₉	14,0	8,7	0	0	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0	4,8	3,2	17,3	7,43/11	-2
Л ₁₀	13,0	8,7	6,8	8,0	0	6,8	0	0	5,1	0	0	0	0	0	0	17,0	8,08/5	+5
Л ₁₁	16,3	11,2	6,6	0	0	0	4,3	0	0	0	0	0	0	0	0	16,8	9,58/2	+9
Л ₁₂	14,5	0	7,3	0	0	5,5	0	0	0	4,9	0	0	3,8	0	0	16,3	7,17/12	0
Л ₁₃	14,0	0	6,4	7,2	0	0	4,1	5,2	4,4	0	0	0	0	0	0	15,8	6,86/14	-1
Л ₁₄	14,5	8,4	0	6,1	0	6,0	0	0	0	0	0	0	4,1	0	0	15,8	7,82/8	+6
Л ₁₅	14,0	8,0	6,3	6,7	6,2	0	4,7	0	4,8	0	0	3,6	0	0	0	15,7	6,78/15	0
Л ₁₆	14,9	0	0	0	0	0	4,4	0	0	0	0	0	0	0	0	15,5	9,64/1	+15

Пояснения к табл. 3.

1. В строке « r_j » указаны числа оцениваний, проведенных экспертом Э _{j} .
 2. В строке « h_j » содержатся значения поправочного коэффициента h_j , взвешивающего оценку x_{ij} , поставленную i -му участнику j -м экспертом.
 3. Число 0 означает, что участник конкурса Л _{i} не оценивался экспертом Э _{j} .
 4. В клетке (i, j) таблицы на пересечении строки Л _{i} и столбца Э _{j} содержится интегральная оценка x_{ij} участнику конкурса Л _{i} , поставленная экспертом Э _{j} .
 5. Максимальная оценка x_{ij} , поставленная i -му участнику j -м экспертом, выделяется полужирным шрифтом (например, **16,6**).
 6. В столбце « x_i В1» содержится интегральная оценка x_i участнику Л _{i} , для варианта 1.
 7. В столбце « x_i В3» содержится интегральная оценка x_i и соответствующее ей место участника Л _{i} для варианта 3.
 8. В столбце «ΔМ» содержится разность мест участника Л _{i} для варианта 1 и варианта 3.
- По сравнению с вариантом 1 участники Л₁, Л₂, Л₃, Л₇ и Л₉ потеряли в совокупности 37

мест из-за того, что они были оценены наибольшим числом максимальных оценок (20,5 баллов) экспертами, данные которых были взвешены. Так, например, участник L_2 опустился со 2-го на 13-е место, так как вместо 61,5 балла (трех оценок по 20,5 баллов) он получил 13 баллов ($4,8 + 4,8 + 3,4$).

За счет потерь L_1, L_2, L_3, L_7 и L_9 участники L_{10}, L_{11}, L_{14} и L_{16} поднялись в совокупности на 35 мест.

У остальных участников места изменились незначительно.

Следовательно, операция взвешивания данных сглаживает экстремальные оценки экспертов и обуславливает более объективное распределение мест.

Основным недостатком методики остается использование не всех данных конкурса.

Вариант 4 – оценивание с удалением и взвешиванием данных.

Результаты подсчета по формуле (11) экспертных оценок с удалением и взвешиванием данных приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты подсчета экспертных оценок. Вариант 4 (с удалением и взвешиванием данных)

\mathcal{E}	\mathcal{E}_1	\mathcal{E}_2	\mathcal{E}_3	\mathcal{E}_4	\mathcal{E}_5	\mathcal{E}_6	\mathcal{E}_7	\mathcal{E}_8	\mathcal{E}_9	\mathcal{E}_{10}	\mathcal{E}_{11}	\mathcal{E}_{12}	\mathcal{E}_{13}	\mathcal{E}_{14}	\mathcal{E}_{15}	x_i B1	x_i B4	ΔM
r_j	16	10	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3			
h_j	0,94	0,59	0,41	0,41	0,35	0,35	0,29	0,29	0,29	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24	0,18			
L_1	16,6	0	0	8,2	6,7	7,2	0	0	0	5,7	0	0	0	0	0	19,6	8,88/7	-6
L_2	16,5	0	7,0	0	6,6	0	0	0	0	5,1	0	0	0	0	0	18,7	8,80/8	-6
L_3	16,2	9,7	0	0	0	7,2	0	0	4,8	5,8	0	0	0	0	0	18,6	8,74/10	-7
L_4	15,8	0	0	7,6	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,5	9,93/2	+2
L_5	15,4	0	0	0	0	0	0	5,9	0	0	0	0	0	0	0	18,5	10,65/1	+4
L_6	16,2	9,7	0	8,0	6,6	0	0	5,7	0	5,3	0	0	0	0	0	18,3	8,58/11	-5
L_7	0	9,6	7,3	0	0	7,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,1	8,03/14	-7
L_8	16,5	9,1	0	0	0	0	5,4	5,6	0	0	0	0	0	0	0	17,8	9,15/6	+2
L_9	14,0	8,7	0	0	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,3	9,70/3	+6
L_{10}	13,0	8,7	6,8	8,0	0	6,8	0	0	5,1	0	0	0	0	0	0	17,0	8,07/12	-2
L_{11}	16,3	11,2	6,6	0	0	0	4,3	0	0	0	0	0	0	0	0	16,8	9,60/5	+6
L_{12}	14,5	0	7,3	0	0	5,5	0	0	0	4,9	0	0	0	0	0	16,3	8,05/13	-1
L_{13}	14,0	0	6,4	7,2	0	0	4,1	5,2	4,4	0	0	0	0	0	0	15,8	6,88/16	-3
L_{14}	14,5	8,4	0	6,1	0	6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,8	8,75/9	+5
L_{15}	14,0	8,0	6,3	6,7	6,2	0	4,7	0	4,8	0	0	0	0	0	0	15,7	7,24/15	0
L_{16}	14,9	0	0	0	0	0	4,4	0	0	0	0	0	0	0	0	15,5	9,65/4	+12

Пояснения к табл. 4.

1. В строке « r_j » указаны числа оцениваний, проведенных экспертом \mathcal{E}_j .
 2. В строке « h_j » содержатся значения поправочного коэффициента h_j , взвешивающего оценку x_{ij} , поставленную i -му участнику j -м экспертом.
 3. Эксперты $\mathcal{E}_{11} - \mathcal{E}_{15}$ провели недостаточное число оцениваний, поэтому их оценки заменены нулями (полужирный шрифт). Число 0 (обычный шрифт) означает, что участник конкурса L_i не оценивался экспертом \mathcal{E}_j .
 4. В клетке (i, j) таблицы на пересечении строки L_i и столбца \mathcal{E}_j содержится интегральная оценка x_{ij} участнику конкурса L_i , поставленная экспертом \mathcal{E}_j .
 5. Максимальная оценка x_{ij} , поставленная i -му участнику j -м экспертом, выделяется полужирным шрифтом (например, **16,6**).
 6. В столбце « x_i B1» содержится интегральная оценка x_i участнику L_i для варианта 1.
 7. В столбце « x_i B4» содержится интегральная оценка x_i и соответствующее ей место участника L_i для варианта 4.
 8. В столбце « ΔM » содержится разность мест участника L_i для варианта 1 и варианта 4.
- По сравнению с вариантом 1 участники L_1, L_2, L_3, L_6 и L_7 потеряли в совокупности 31 ме-

сто из-за того, что они были оценены наибольшим числом максимальных оценок (20,5 баллов) экспертами, данные которых были взвешены или удалены.

За счет потерь L_1, L_2, L_3, L_6 и L_7 участники L_5, L_9, L_{11} и L_{16} поднялись в совокупности на 28 мест. У остальных участников места изменились незначительно.

По сравнению с вариантом 3 операции удаления недостоверных и тенденциозных данных и учетом поправочного весового коэффициента (взвешиванием данных) менее резко сглаживают экстремальные оценки экспертов и также обеспечивают более объективное распределение мест.

Основным *недостатком* методики остается использование не всех данных конкурса.

Вариант 5 – методика оценивания с восполнением данных.

Результаты подсчета экспертных оценок с восполнением данных приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты подсчета экспертных оценок. Вариант 5 (с восполнением данных)

Θ	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5	Θ_6	Θ_7	Θ_8	Θ_9	Θ_{10}	Θ_{11}	Θ_{12}	Θ_{13}	Θ_{14}	Θ_{15}	x_i	Σx	x_i	ΔM
r_j	16	10	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	x_i	Σx	x_i	ΔM
h_j	0,94	0,59	0,41	0,41	0,35	0,35	0,29	0,29	0,29	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24	0,18	B1	B5	B5	
\tilde{x}_j	16,2	15,7	16,6	18,0	18,6	19,0	15,8	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3				
L_1	17,7	15,7	16,6	20,1	19,2	20,5	15,8	19,3	16,4	19,5	19,5	18,4	17,3	20,5	18,3	19,6	275,5	18,4/1	0
L_2	17,6	15,7	17,0	18,0	18,9	19,0	15,8	19,3	16,4	17,6	19,4	20,5	17,3	20,5	18,9	18,7	271,0	18,1/3	-1
L_3	17,2	16,4	16,6	18,0	18,6	20,5	15,8	19,3	16,5	19,9	20,5	18,4	19,1	20,5	18,3	18,6	273,7	18,2/2	+1
L_4	16,8	15,7	16,6	18,5	18,3	19,0	15,8	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3	18,5	269,4	18,0/7	-3
L_5	16,4	15,7	16,6	18,0	18,6	19,0	15,8	20,5	16,4	18,4	19,4	18,6	17,3	20,5	18,3	18,5	268,3	17,9/9	-4
L_6	17,2	16,5	16,6	19,5	18,9	19,0	15,8	19,6	16,4	18,3	18,1	18,4	17,3	20,5	18,3	18,3	270,4	18,0/4	+2
L_7	16,2	16,3	17,7	18,0	18,6	20,5	15,8	19,3	16,4	18,4	19,4	19,2	16,8	20,5	18,3	18,1	269,5	18,0/6	+1
L_8	17,6	15,4	16,6	18,0	18,6	19,0	18,5	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,2	17,8	269,7	18,0/5	+3
L_9	14,9	14,7	16,6	18,0	18,3	19,0	15,8	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	17,9	17,3	263,3	17,6/12	-3
L_{10}	13,8	14,8	16,6	19,5	18,6	19,5	15,8	19,3	17,7	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3	17,0	267,6	17,8/10	0
L_{11}	17,3	19,0	16,0	18,0	18,6	19,0	14,9	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3	16,8	268,9	17,9/8	+3
L_{12}	15,4	15,7	17,7	18,0	18,6	15,6	15,8	19,3	16,4	16,9	19,4	18,4	16,0	20,5	18,3	16,3	260,8	17,4/14	-2
L_{13}	14,9	15,7	15,6	17,5	18,6	19,0	14,2	17,8	15,0	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3	15,8	261,0	17,4/13	0
L_{14}	15,4	14,3	16,6	14,9	18,6	17,2	15,8	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3	15,8	260,5	17,4/15	-1
L_{15}	14,9	13,6	15,4	16,3	17,7	19,0	16,3	19,3	16,5	18,4	19,4	15,1	17,3	20,5	18,3	15,7	258,0	17,2/16	-1
L_{16}	15,8	15,7	16,6	18,0	18,6	19,0	15,2	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3	15,5	265,7	17,7/11	+5

Пояснения к табл. 5.

1. В строке « r_j » указаны числа оцениваний, проведенных экспертом Θ_j .
2. В строке « h_j » содержатся значения поправочного коэффициента h_i , взвешивающего оценку x_{ij} , поставленную i -му участнику j -м экспертом.
3. В строке « \tilde{x}_j » содержатся, согласно формуле (19), значения в виде среднего арифметического оценок лекций, поставленных экспертом Θ_j . Эти оценки выделены курсивом.
4. В клетке (i, j) таблицы на пересечении строки L_i и столбца Θ_j содержится интегральная оценка x_{ij} участнику конкурса L_i , поставленная экспертом Θ_j .
5. Максимальная оценка x_{ij} , поставленная i -му участнику j -м экспертом, выделяется полужирным шрифтом (например, **20,5**).
6. В столбце « x_i B1» содержится интегральная оценка x_i участнику L_i для варианта 1.
7. В столбце « Σx B5» содержится сумма интегральных оценок участнику L_i для варианта 5.
8. В столбце « x_i B5» содержится интегральная оценка x_i и соответствующее ей место участника L_i для варианта 5.
9. В столбце « ΔM » содержится разность мест участника L_i для варианта 1 и варианта 5.

По сравнению с вариантом 1 участники L_4, L_5 и L_9 потеряли в совокупности 10 мест за счет усреднения данных.

За счет потерь L_4, L_5 и L_9 участники L_8, L_{11} и L_{16} поднялись в совокупности на 11 мест. У остальных участников места изменились незначительно.

По сравнению со всеми предыдущими вариантами (1–4) операция восполнения данных

использует самую полную в данных условиях информацию и обеспечивает более объективное распределение мест.

К недостаткам данной методики следует отнести отсутствие учета степени участия экспертов в конкурсе.

Вариант 6 – оценивание с восполнением и взвешиванием данных.

Данный вариант устраняет недостатки предыдущей методики. Результаты подсчета экспертных оценок с восполнением и взвешиванием данных приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты подсчета экспертных оценок. Вариант 6
(с восполнением и взвешиванием данных)**

\mathcal{E}	\mathcal{E}_1	\mathcal{E}_2	\mathcal{E}_3	\mathcal{E}_4	\mathcal{E}_5	\mathcal{E}_6	\mathcal{E}_7	\mathcal{E}_8	\mathcal{E}_9	\mathcal{E}_{10}	\mathcal{E}_{11}	\mathcal{E}_{12}	\mathcal{E}_{13}	\mathcal{E}_{14}	\mathcal{E}_{15}	x_i B1	Σx B6	x_i B6	ΔM
r_j	16	10	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3				
h_j	0,94	0,59	0,41	0,41	0,35	0,35	0,29	0,29	0,29	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24	0,18				
\tilde{x}_j	16,2	15,7	16,6	18,0	18,6	19,0	15,8	19,3	16,4	18,4	19,4	18,4	17,3	20,5	18,3				
\tilde{z}_j	15,2	9,3	6,8	7,4	6,5	6,7	4,6	6,0	4,8	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3				
L_1	16,6	9,3	6,8	8,2	6,7	7,2	4,6	6,0	4,8	5,7	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3	19,6	96,92	6,46/1	0
L_2	16,5	9,3	7,0	7,4	6,6	6,7	4,6	6,0	4,8	5,1	4,6	4,8	4,1	4,8	3,4	18,7	95,53	6,37/4	-2
L_3	16,2	9,7	6,8	7,4	6,5	7,2	4,6	6,0	4,8	5,8	4,8	4,3	4,5	4,8	3,3	18,6	96,6	6,44/2	+1
L_4	15,8	9,3	6,8	7,6	6,4	6,7	4,6	6,0	4,8	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3	18,5	94,24	6,28/8	-4
L_5	15,4	9,3	6,8	7,4	6,5	6,7	4,6	6,0	4,8	5,3	4,6	4,4	4,1	4,8	3,3	18,5	93,77	6,25/9	-4
L_6	16,2	9,7	6,8	8,0	6,6	6,7	4,6	5,7	4,8	5,3	4,3	4,3	4,1	4,8	3,3	18,3	95,06	6,34/5-6	+0,5
L_7	15,2	9,6	7,3	7,4	6,5	7,2	4,6	6,0	4,8	5,3	4,6	4,5	4,0	4,8	3,3	18,1	94,96	6,33/7	0
L_8	16,5	9,1	6,8	7,4	6,5	6,7	5,4	5,6	4,8	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3	17,8	95,09	6,34/5-6	+2,5
L_9	14,0	8,7	6,8	7,4	6,4	6,7	4,6	6,0	4,8	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,2	17,3	91,6	6,11/12	-3
L_{10}	13,0	8,7	6,8	8,0	6,5	6,8	4,6	6,0	5,1	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3	17,0	91,95	6,13/11	-1
L_{11}	16,3	11,2	6,6	7,4	6,5	6,7	4,3	6,0	4,8	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3	16,8	96,05	6,40/3	+8
L_{12}	14,5	9,3	7,3	7,4	6,5	5,5	4,6	6,0	4,8	4,9	4,6	4,3	3,8	4,8	3,3	16,3	91,34	6,09/13	-1
L_{13}	14,0	9,3	6,4	7,2	6,5	6,7	4,1	5,1	4,4	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3	15,8	89,99	6,00/15	-2
L_{14}	14,5	8,4	6,8	6,1	6,5	6,0	4,6	6,0	4,8	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3	15,8	90,11	6,01/14	0
L_{15}	14,0	8,0	6,3	6,7	6,2	6,7	4,7	6,0	4,8	5,3	4,6	3,6	4,1	4,8	3,3	15,7	88,96	5,93/16	-1
L_{16}	14,9	9,3	6,8	7,4	6,5	6,7	4,4	6,0	4,8	5,3	4,6	4,3	4,1	4,8	3,3	15,5	93,04	6,20/10	+6

Пояснения к табл. 6.

1. В строке « r_j » указаны числа оцениваний, проведенных экспертом \mathcal{E}_j .
 2. В строке « h_j » содержатся значения поправочного коэффициента h_j , взвешивающего оценку x_{ij} , поставленную i -му участнику j -м экспертом.
 3. В строке « \tilde{x}_j » содержатся, согласно формуле (19), значения в виде среднего арифметического оценок лекций, поставленных экспертом \mathcal{E}_j .
 4. В строке « \tilde{z}_j » содержатся значения $\tilde{z}_j = h_j \tilde{x}_j$ в виде среднего арифметического оценок лекций, поставленных экспертом \mathcal{E}_j , с учетом степени участия экспертов в конкурсе. Эти оценки выделены курсивом.
 5. В клетке (i, j) таблицы на пересечении строки L_i и столбца \mathcal{E}_j содержится интегральная оценка x_{ij} участнику конкурса L_i , поставленная экспертом \mathcal{E}_j .
 6. Максимальная оценка x_{ij} , поставленная i -му участнику j -м экспертом, выделяется полужирным шрифтом (например, **16,6**).
 7. В столбце « x_i B1» содержится интегральная оценка x_i участнику L_i для варианта 1.
 8. В столбце « Σx B6» содержится сумма интегральных оценок участнику L_i для варианта 6.
 9. В столбце « x_i B6» содержится интегральная оценка x_i и соответствующее ей место участника L_i для варианта 6.
 10. В столбце « ΔM » содержится разность мест участника L_i для варианта 1 и варианта 6.
- По сравнению с вариантом 1 участники L_4 , L_5 и L_9 потеряли в совокупности 11 мест из-за

того, что они были оценены наибольшим числом максимальных оценок (20,5 баллов) экспертами, данные которых были взвешены.

За счет потерь L_4 , L_5 и L_9 участники L_{11} и L_{16} поднялись в совокупности на 14 мест. У остальных участников места изменились незначительно.

Следует отметить, что результаты конкурса по методике варианта 6 наиболее близки к результатам «идеального» эксперта, имеющего наибольший поправочный коэффициент. Таким образом, операции восполнения данных и учета поправочного весового коэффициента (взвешивания данных) дают наиболее сглаженные оценки и также обеспечивают более объективное распределение мест.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, можно сделать следующие выводы.

1. Когда вследствие объективных причин каждый эксперт оценивает выступления *не всех*, а лишь какой-то части участников конкурса, а выступление каждого участника конкурса оценивается *не всеми* экспертами, то рекомендуется применять методику оценивания результатов конкурса с восполнением и взвешиванием данных.

2. В случае, когда каждый эксперт оценивает выступления всех участников конкурса, методика оценивания результатов конкурса с восполнением и взвешиванием данных сводится к методике оценивания по варианту 1 – оцениванию по статистическому математическому ожиданию.

3. Если какой-либо эксперт оценивает выступления участников конкурса одинаково, то его данные целесообразно исключить, так как они не влияют с точностью до места на итоговые результаты конкурса.

4. В целях повышения степени объективности результатов конкурса рекомендуется установить:

а) *минимальный порог* по числу оцениваний каждого участника конкурса, например не менее одной трети от числа экспертов;

б) *минимальный порог* по числу оцениваний каждым экспертом участников конкурса, например не менее одной трети от числа участников конкурса.

Данные выводы предлагается учесть в новой редакции положения [6].

Список используемых источников

1. Голубев М.А., Воронков И.Ю., Зиновьев С.В. Применение профессиональных стандартов при подготовке выпускников образовательных организаций высшего образования // Информатика и Космос. – 2016. – № 2. – С. 141–144.

2. Зиновьев В.Г., Мышко В.В., Чикуров В.А. Система оценивания уровня сформированности компетенций у слушателей и курсантов академии // Профессиональная компетентность преподавателя академии. Ч. 2: информационный бюллетень № 126. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – С. 4–11.

3. Калинин В.Н. Основные направления формирования и критерии оценивания общекультурных и профессиональных компетенций в цикле математических и естественнонаучных дисциплин // Методика формирования и оценивания компетенций обучающихся: информационный бюллетень № 121. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – С. 19–26.

4. Оценивание выпускной квалификационной работы в военно-учебном заведении в ходе государственной итоговой аттестации / Н.С. Кужекин, В.В. Мышко, А.В. Смирнов, В.А. Чикуров // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 661. – С. 225–234.

5. Положение о конкурсе на лучшую лекцию среди преподавателей Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – 3 с.

6. Статистические методы обработки результатов наблюдений /под ред. Р.М. Юсупова. – МО СССР, 1984. – 563 с.

В.Л. Гузенко,
кандидат техн. наук, профессор;
Р.М. Дулишкин;
М.Ю. Касавцев,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ КОМАНДИРА ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ ПО ФОРМИРОВАНИЮ КОМАНДНО-МЕТОДИЧЕСКИХ НАВЫКОВ И НАВЫКОВ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЕННО-ПОЛИТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ У КУРСАНТОВ ПРИ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрен процесс совершенствования процесса формирования командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы. Анализ практики повседневной деятельности показывает, что уровень формируемых у курсантов навыков недостаточен. Решением для данного вопроса, по мнению авторов, станет совершенствование работы командира подразделения по формированию командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы у подчиненных при повседневной деятельности. В статье обоснован выбор бюджета времени для данной работы, в итоге основной акцент сделан на систематизацию работы командиров подразделений во внеучебное время. Кроме того, авторы выявили ряд проблемных аспектов работы по формированию командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы, решение которых даст возможность повысить уровень формируемых навыков. В результате авторами разработана и апробирована методика, позволяющая повысить качество формируемых у курсантов командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы при выполнении мероприятий повседневной деятельности.

Ключевые слова: военно-профессиональная компетентность, военно-профессиональная компетенция, командно-методические навыки, навыки организации военно-политической работы, внеучебное время, командир подразделения, повседневная деятельность, выпускник военного вуза.

В настоящее время в Вооруженных силах Российской Федерации одной из задач подготовки офицеров для замещения первичных офицерских должностей является формирование у курсантов военно-учебных заведений военно-профессиональной компетентности, важной составляющей которой являются командно-методические навыки и навыки организации военно-политической работы [17]. Указанные навыки относятся к военно-профессиональным качествам офицера, изложенным на сайте Минобороны России [10]. В перечень этих качеств входят: военно-профессиональная компетентность; дисциплинированность; командирская воля; организаторские способности; творческая активность; психологические качества и физические качества. Весь этот «арсенал» необходим выпускнику военного вуза, как будущему командиру подразделения, для качественного решения служебных задач. Важными составляющими военно-профессиональных качеств офицера являются командно-методические навыки и навыки организации военно-политической работы.

Проведенный авторами анализ научных публикаций выявил, что задача формирования у военнослужащих командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы (ранее – навыки воспитательной работы) исследовалась разными учеными и с разных ракурсов. Так, теоретические аспекты способов и приемов формирования командных и методических навыков рассмотрены в работах ряда отечественных ученых, известных в области военной психологии и педагогики. Например, А.Г. Маклаков в своей публикации [22] рассмотрел подходы к формированию навыков военно-профессиональной деятельности; навыков выполнения приемов, связанных с уставными правилами поведения; навыков командной речи и коммуникативных навыков. В работе под общей редакцией А.В. Барабанщикова [20] изложены способы формирования у военнослужащих навыков самостоятельного устного выступления, педагогических, методических и организаторских

навыков. Авторский коллектив под руководством О.Ю. Ефремова [8] рассмотрел способы формирования командных навыков, навыков устного изложения, дискуссии и общения, навыков управления подразделениями и навыков выполнения обязанностей солдата и командира. Также авторы И.А. Алехин, О.А. Анашкин, О.Ю. Ананьин и А.Н. Бельский в работе [9] предложили при изучении личности военнослужащих учитывать уровень методических навыков, навыков в принятии оперативных решений, навыков изучения подчиненных, а также навыков организации индивидуально-воспитательной работы; планирования воспитательной работы; организации учебы, службы, мероприятий; мобилизации личного состава на выполнение поставленных задач. Кроме того, авторы указывали на необходимость формирования у курсантов навыков самообразования, навыков и умений обучения и воспитания подчиненных, проведения воспитательных мероприятий, навыков работы по управлению социальными процессами в воинских коллективах, воинскому и нравственному воспитанию личного состава, укреплению воинской дисциплины.

Вместе с тем публикуются результаты эмпирических исследований по вопросам формирования командно-методических навыков и навыков воспитательной работы. Так, Л.А. Бугрова предлагает разработанные ею методы формирования методических навыков курсантов в процессе изучения дисциплины «Физика» [5]. Также А.Р. Горячев сформулировал организационно-методические рекомендации по реализации и совершенствованию системы формирования командно-методических навыков и навыков воспитательной работы у студентов военных кафедр [12]. Кроме того, В.В. Белоножкин и А.Р. Сторублевцев ввели понятие «командно-методическая компетенция» и разработали предложения по совершенствованию процесса организации формирования у курсантов командно-методических навыков [3]. В работе [11] Г.А. Гиренок описал процесс формирования коммуникативной компетенции на занятиях по английскому языку. Алгоритмическую модель системы формирования военно-профессиональных компетенций у студентов разработали и предложили Г.М. Антонов, А.К. Афанасьев и В.Н. Михелькевич [2].

В Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского ряд авторов исследовали различные проблемные аспекты процесса формирования профессиональных компетенций у выпускников. Так, например, специфика формирования у курсантов академии математической компетенции рассматривалась в работах Н.В. Васильевой и Н.Б. Кунтуровой [7], а также Д.А. Булекбаева, А.Г. Катранова и А.В. Морозова [6]. Особенности формирования компетенции программирования изучались И.Е. Калмычковым, А.М. Рахматулиным, Д.Н. Смирновым [14]. Также проблемные аспекты формирования профессиональной компетентности рассматривались М.М. Пеньковым [21], Б.Д. Казаховым, Д.А. Колягиным и Е.В. Шалоновым [13]. Кроме того, Н.С. Кужекин, Н.В. Курдай и А.Б. Пауков представили анализ работы по формированию командно-методических навыков и навыков воспитательной работы в академии [16].

Варианты учета формируемых компетенций исследовались М.Ю. Касавцевым, Е.А. Михайловой и Н.В. Селихиной в процессе диагностики личности военнослужащего [15], а модель мониторинга формирования профессиональных компетенций разработали Г.К. Осипов и В.В. Хиленко и представили в работе [18]. Кроме того, моделирование процесса формирования компетенций у курсантов академии рассмотрели Ю.М. Богук, М.А. Голубев, Д.В. Ставицкий, А.В. Фетисов [4]. Проблемные аспекты оценивания компетенций были раскрыты в публикациях С.Б. Пашкина, Г.Ю. Иконникова и В.П. Башкирцева [19], а также В.В. Алейника, Н.С. Кужекина, В.В. Мышко и В.А. Чикурова [1].

Однако все эти результаты только выборочно раскрывают вопросы формирования командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы (КМН и НОВПР) у военнослужащих (курсантов), поскольку в одном случае эти навыки авторы рассматривают лишь в рамках одной дисциплины общеобразовательного курса; в другом – для студентов военных кафедр; в третьем – предложения по совершенствованию процесса орга-

низации формирования у курсантов КМН и НОВПР были только разработаны, но не апробированы.

Априорная оценка исследуемого вопроса позволила выявить противоречие. С одной стороны, существующая в вузе система формирования у курсантов КМН и НОВПР в течение общего бюджета учебного времени создана с учетом требований руководящих документов [17]. С другой – эта система дает недостаточный уровень сформированных КМН и НОВПР у военнослужащих, который отмечается в ходе выполнения мероприятий повседневной деятельности. Поиск путей разрешения существующего противоречия актуализировал исследование, проведенное авторами.

Авторы представили разработанную методику совершенствования работы командира подразделения по формированию КМН и НОВПР у подчиненных при повседневной деятельности (далее – Методика), которая не встречалась в рассмотренных публикациях, что подтверждает новизну полученного результата.

В рамках исследования авторами была выдвинута следующая гипотеза – внедрение в работу командира подразделения по формированию КМН и НОВПР при повседневной деятельности разработанной Методики позволит повысить уровень формируемых у военнослужащих КМН и НОВПР при повседневной деятельности. Выдвинутая гипотеза обусловила цель исследования – повышение качества формируемых у курсантов командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы при повседневной деятельности.

Исследование проводилось с применением методов анализа научных публикаций и материалов подведения итогов, наблюдения и опроса. Схема исследования представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема исследования

В представленной работе под термином «военно-профессиональная компетентность» будем иметь в виду качество личности военнослужащего, предполагающее владение им военно-профессиональной компетенцией и готовность применять ее при выполнении служебных обязанностей. А говоря *военно-профессиональная компетенция* курсанта-выпускника, понимаем полученную в вузе совокупность знаний, умений, навыков и жизненного опыта при применении им требований Общевоинских уставов Вооруженных Сил Российской Федерации (ОВУ ВС РФ) в процессе повседневной деятельности. Определение термина «*навыки организации военно-политической работы*» в настоящее время определено руководящим документом [17], хотя в ретроспективе своей имело такие названия, как «навыки воспитательной работы» или «навыки работы с личным составом».

Работа по формированию КМН и НОВПР у курсантов академии проводится профессорско-преподавательским составом и командирами подразделений курсантов в течение общего

бюджета учебного времени, установленного основной профессиональной образовательной программой, с учетом основных положений существующей в академии системы методической подготовки [15]. Анализ учебного времени показал, что время контактной работы преподавателя с курсантом (на примере учебной дисциплины «Общевойсковая подготовка») составляет 12–24 ч в семестр. Это время, в течение которого руководителем занятия у курсантов формируются знания, умения и навыки выполнения требований ОВУ ВС РФ при выполнении мероприятий повседневной деятельности, но для формирования такой составляющей военно-профессиональной компетенции, как «жизненный опыт» этого времени недостаточно. Для успешного решения этой задачи, а также реализации принципа непрерывности процесса формирования КМН и НОВПР в течение всего времени обучения необходимо также использовать бюджет внеучебного времени. Ведь именно во внеучебное время командиры подразделений имеют возможность формировать и совершенствовать составляющую «жизненного опыта» выполнения требований ОВУ ВС РФ при осуществлении мероприятий повседневной деятельности (по сути, КМН и НОВПР), при необходимости используя методическую помощь профессорско-преподавательского состава соответствующей кафедры академии. Объем внеучебного времени для младших курсов составляет порядка 1500 ч в семестр, а для старших курсов 600 ч в семестр, количество внеучебного времени определялось с учетом мероприятий распорядка дня и регламента служебного времени. Очевидно, что объем времени у командира подразделения на 1-2 порядка больше, чем у преподавателя. Поэтому именно это время необходимо использовать для решения задачи повышения качества формируемых КМН и НОВПР.

В ходе исследования были проведены наблюдения за действиями военнослужащих экспериментальной и контрольной групп при выполнении ими мероприятий повседневной деятельности и опрос исследуемых для выяснения состояния работы по формированию КМН и НОВПР у курсантов, проводимой командирами подразделений. Результаты опроса, представленные в табл. 1, показали, что большая часть военнослужащих (ЭГ – 82% и КГ – 88%) знает, что такое КМН и НОВПР. Все респонденты считают, что КМН и НОВПР им необходимы, и они хотят их совершенствовать. Данный результат подчеркивает, что у курсантов есть желание и готовность работать над формированием КМН и НОВПР, что, безусловно, положительно скажется на результатах работы командира. Кроме того, стали очевидны некоторые проблемные аспекты работы, проводимой командиром подразделения по формированию КМН и НОВПР. Перечислим их.

Во-первых, работа по формированию КМН и НОВПР ведется эпизодически, поэтому только около половины выборки военнослужащих (ЭГ – 41% и КГ – 39%) правильно назвали этап формирования КМН и НОВПР, который проходит в подразделении сейчас.

Во-вторых, недостаточная персонификация данной работы приводит к тому, что только часть военнослужащих подразделения знают свои оценки за КМН и НОВПР, полученные за прошлый семестр.

В-третьих, командиры подразделений не акцентируют внимание военнослужащих на том, какие навыки формируются при проведении того или иного мероприятия у конкретного курсанта. Как результат – военнослужащие неуверенно назвали КМН и НОВПР (всего 11-12% правильных ответов), которые у них формировались в прошедшем семестре и формируются в текущем семестре.

В-четвертых, командиры подразделений не всегда указывают мероприятия, на которых формируются КМН и НОВПР. В итоге правильно эти мероприятия назвали около трех четвертей опрошенных (ЭГ – 79% и КГ – 71%).

Для разрешения существующего противоречия с учетом выявленных проблемных аспектов авторами была разработана методика совершенствования работы командира подразделения по формированию КМН и НОВПР у подчиненных при повседневной деятельности.

Сформулируем положения Методики.

1. Проведение занятий с командирами курсантских подразделений по изучению информации, необходимой для работы командира подразделения по формированию КМН и НОВПР у подчиненных военнослужащих.

Цель: исключение лакуарности в подготовке командиров подразделений – непосредственных организаторов мероприятий по формированию КМН и НОВПР при повседневной деятельности во внеучебное время.

Таблица 1

Результаты опроса военнослужащих экспериментальной группы (ЭГ) и контрольной группы (КГ) «до» и «после» внедрения разработанной Методики

Вопрос	Кол-во ответов, %			
	ЭГ		КГ	
	«до»	«после»	«до»	«после»
Знаете ли Вы что такое командно-методические навыки и навыки организации военно-политической работы (КМН и НОВПР)?				
– да;	82	97	88	87
– нет	18	3	12	13
Как Вы считаете, необходимы ли Вам КМН и НОВПР?				
– да;	100	100	100	100
– нет	0	0	0	0
Хотели бы Вы совершенствовать свои КМН и НОВПР?				
– да;	100	100	100	100
– нет	0	0	0	0
Какой этап формирования КМН и НОВПР проходит у Вас сейчас?				
– верно;	41	91	39	43
– неверно;	17	7	20	18
– не знаю	42	2	41	39
Перечислите, какие КМН и НОВПР Вы сформировали в предыдущем семестре обучения.				
– верно;	12	82	15	17
– неверно;	23	18	26	28
– не знаю	65	-	59	55
Как был оценен уровень Ваших КМН и НОВПР за предыдущий семестр обучения?				
– знаю;	53	84	58	62
– не знаю оценки.	47	16	42	38
Перечислите, какие КМН и НОВПР Вы должны сформировать в текущем семестре обучения?				
– верно;	11	87	14	17
– неверно;	26	9	28	32
– не знаю	63	4	58	51
При проведении каких мероприятий, по Вашему мнению, у Вас формируются КМН и НОВПР?				
– верно;	79	96	71	74
– неверно;	5	3	7	8
– не знаю	16	1	22	18

2. Постоянное взаимодействие с профессорско-преподавательским составом кафедры организации повседневной деятельности и боевой подготовки для оказания методической помощи командирам подразделений по вопросам формирования КМН и НОВПР.

Цель: консультирование и содействие командирам подразделений в неоднозначных или неординарных ситуациях, возникающих в процессе формирования КМН и НОВПР при повседневной деятельности.

3. Обмен передовым опытом между командирами подразделений по вопросам формирования КМН и НОВПР в рамках Дня курсового офицера.

Цель: повышение эффективности мероприятий по формированию КМН и НОВПР при повседневной деятельности за счет применения передовых достижений и наработок коллег.

4. Систематизация и персонификация учета уровня сформированности КМН и НОВПР командирами подразделений.

Цель: формирование системы учета и контроля уровня сформированности КМН и НОВПР при повседневной деятельности, индивидуальный подход к военнослужащим, отсутствие обезличенности результатов работы по формированию КМН и НОВПР.

5. Акцентирование внимания военнослужащих подразделения на достижениях военнослужащих-передовиков в вопросах формирования КМН и НОВПР.

Цель: создание и поддержание в подразделении положительного образа военнослужащего с высоким уровнем КМН и НОВПР при повседневной деятельности – одной из целей воинского обучения каждого курсанта.

6. Подготовка лично командиром подразделения сержантского состава, грамотного в вопросах формирования КМН и НОВПР.

Цель: создание в подразделении компетентного младшего командного состава, способного реализовать политику командира подразделения в отношении формирования КМН и НОВПР при повседневной деятельности.

7. Обмен передовым опытом между сержантами подразделений по вопросам формирования КМН и НОВПР в рамках Дня сержанта.

Цель: формирование площадки для обсуждений и дискуссий проблемных и насущных вопросов формирования КМН и НОВПР при повседневной деятельности.

8. Учет результатов уровня сформированности КМН и НОВПР у военнослужащих конкретного подразделения при подведении итогов конкурса командиров подразделений на звание «Лучший начальник курса» и «Лучший курсовой офицер».

Цель: реализация принципа состязательности между подразделениями академии при формировании КМН и НОВПР в процессе повседневной деятельности.

9. Организация работы по формированию КМН и НОВПР с соблюдением психолого-педагогических рекомендаций, выдвинутых в работе [4, с. 288].

Цель: достижение эффективности формирования КМН и НОВПР у курсантов с учетом научных достижений отечественной военной педагогики и психологии.

Апробация разработанной Методики проводилась в одном из курсантских подразделений академии в течение полугода. В одинаковых по численности экспериментальной и контрольной группах (по 22 военнослужащих). Апостериорная оценка исследуемого вопроса показала следующее:

1. Результаты опроса выявили положительную динамику числа военнослужащих ЭГ, у которых сформировалось понимание процесса формирования КМН и НОВПР (кто формирует, что формирует, на каких мероприятиях, как оценивается и т.д.).

2. Анализ материалов подведения итогов выявил систематизацию учета оценок за КМН и НОВПР у военнослужащих.

3. Персонификация работы по формированию позволила выявить военнослужащих-передовиков с высоким уровнем КМН и НОВПР, на пример которых смог опираться в своей работе командир подразделения.

4. Постоянное акцентирование внимания военнослужащих на значимых аспектах формирования КМН и НОВПР при проведении мероприятий повседневной деятельности позволили добиться качественного прироста уровня формируемых навыков.

5. Прирост среднего балла за КМН и НОВПР за полугодие составил 12,2% в ЭГ – 4,38 (был 3,77), 2,6% в КГ – 3,92 (был 3,79).

Таким образом, применение методики совершенствования работы командира подразделения по формированию командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы позволило найти пути решения проблемных аспектов работы, проводимой командиром подразделения по формированию КМН и НОВПР, и разрешить выявленные противоречия. Апробация разработанной методики подтвердила гипотезу исследования, выдвинутую авторами, а также позволила добиться повышения уровня формируемых у курсантов командно-методических навыков и навыков организации военно-политической работы при выполнении мероприятий повседневной деятельности, которые организуются командирами подразделений во внеучебное время.

Список используемых источников

1. Оценивание уровня сформированности компетенций выпускников военно-учебного заведения в ходе государственной итоговой аттестации / В.В. Алейник, Н.С. Кужекин, В.В. Мышко, В.А. Чикуров // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 656. – С. 189–197.

2. Антонов Г.М., Афанасьев А.К., Михелькевич В.Н. Педагогическая система формирования у студентов – будущих офицеров резерва Вооруженных сил РФ военно-профессиональных компетенций // Самарский научный вестник. – 2018. – Т. 7, № 1(22). – С. 234–238.

3. Белоножкин В.В., Сторублевцев А.Р. Актуальность формирования командно-методических компетенций у курсантов военно-воздушной академии // Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук. – 2017. – № 11. – С. 44–46.

4. Моделирование процесса формирования компетенций у выпускников военно-учебных заведений / Ю.М. Богук, М.А. Голубев, Д.В. Ставицкий, А.В. Фетисов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 667. – С. 410–417.

5. Бугрова Л.А. Пути и формы привития методических навыков курсантам в процессе изучения физики // Материалы Всероссийской педагогической научной конференции «Проблемы и современные направления развития образования в области аэронавигации», 27 мая 2016 г., г. Сызрань. – Сызрань, 2016. – С. 101–103.

6. Булекбаев Д.А., Катранов А.Г., Морозов А.В. Формирование компетенций в курсе математики // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 648. – С. 192–201.

7. Васильева Н.В., Кунтурова Н.Б. Использование электронных образовательных ресурсов при формировании математической компетентности у будущих военных специалистов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 189–193.

8. Военная педагогика / под ред. О.Ю. Ефремова. – СПб.: Питер, 2017. – 640 с.

9. Военная педагогика: учебник для вузов / под общ. ред. И.А. Алехина. – М.: Юрайт, 2018. – 414 с.

10. Военно-профессиональные качества. – URL:<https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12822%40morfDictionary> (дата обращения: 26.02.2020).

11. Гиренок Г.А. Коммуникативная компетенция как способность и готовность курсантов к иноязычному речевому общению // Самарский научный вестник. – 2017. – Т. 6, № 3(20). – С. 275–279.

12. *Горячев А.Р.* Формирование умений и навыков управления повседневной деятельности подразделений в процессе военно-профессиональной подготовки студентов военных кафедр при гражданских вузах // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 11. – С. 340–343.
13. *Казахов Б.Д., Колягин Д.А., Шалонов Е.В.* Формирование профессиональной компетентности обучающихся в ходе исследовательских командно-штабных военных игр // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – С. 240–245.
14. *Калмычков И.Е., Рахматулин А.М., Смирнов Д.Н.* Формирование компетенции программирования при освоении образовательных программ подготовки специалистов в области обработки радиосигналов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 375–380.
15. *Касавцев М.Ю., Михайлова Е.А., Селихина Н.В.* Учет возрастных и психологических особенностей развития личности курсанта в системе обучения и воспитания военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 194–198.
16. *Кузнецкин Н.С., Курдай Н.В., Пауков А.Б.* Формирование методической подготовленности курсантов в ходе освоения основной профессиональной образовательной программы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 658. – С. 225–228.
17. Об организации военно-политической работы в Вооруженных Силах Российской Федерации: приказ министра обороны Российской Федерации № 404 от 22 июля 2019 г. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/456046040> (дата обращения: 15.02.2020).
18. *Осиповым Г.К., Хиленко В.В.* Научно-методические основы мониторинга формирования профессиональных компетенций у курсантов высших военно-учебных заведений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 652. – С. 215–224.
19. *Пашкин С.Б., Иконников Г.Ю., Башкирцев В.П.* О содержании тестовых заданий оценки компетенций магистрантов – психологов при проведении государственной итоговой аттестации // Новая наука: психолого-педагогический подход. – 2017. – № 1. – С. 73–78.
20. Педагогика и психология высшей военной школы / под ред. А.В. Барабанщикова. – М.: Изд-во ВПА им. В.И. Ленина, 1979. – 283 с.
21. *Пеньков М.М.* Внедрение новых образовательных технологий в учебный процесс подготовки офицеров Космических войск в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского // Вестник военного образования. – 2017. – № 3(5). – С. 44–50.
22. Психология и педагогика. Военная психология: учебник для вузов / под. ред. А.Г. Маклакова – СПб.: Питер, 2005. – 464 с.

А.В. Ерофеев,
кандидат военных наук, доцент;
В.О. Кацик,
кандидат техн. наук, доцент;
Л.В. Покидов,
кандидат военных наук

МЕТОДИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТАКТИКО-СПЕЦИАЛЬНОГО УЧЕНИЯ С КУРСАНТАМИ

Рассмотрен один из подходов повышения информационных возможностей учебных органов управления учебных воинских частей, а также возможностей преподавателя-посредника контролировать и своевременно корректировать деятельность обучающихся на тактико-специальном учении за счет использования современных информационных технологий, применение которых потребует развертывания локальной вычислительной сети на учебных командных пунктах и на ее базе соответствующей информационной системы.

Ключевые слова: информационные технологии, информационная система, локальная вычислительная сеть, методика, принятие решения, информационное сопровождение действий обучающихся, боевые расчеты, боевые посты, информационные возможности.

ВВЕДЕНИЕ

Применению современных информационных технологий (ИТ) в сфере военного образования уделяется в настоящее время особое внимание ввиду несомненной их эффективности. Информационные технологии представляют собой приемы, способы и методы применения средств вычислительной техники при выполнении функций сбора, хранения, обработки, передачи и использования данных [1, 3]. Поэтому в образовательном процессе ИТ позволяют создавать, хранить, перерабатывать учебную информацию, обеспечивать эффективные способы ее представления обучающимся, моделировать различные процессы, по-новому организовывать взаимодействие всех субъектов образовательной деятельности [5].

Уже сейчас ИТ повсеместно, в том числе и в нашей академии, широко применяются в учебно-воспитательном процессе на различных видах занятий в качестве средств обучения, средств коммуникации, средств автоматизации процессов контроля и др. Однако, на наш взгляд, не все возможности ИТ используются на таком важном виде занятия, как тактико-специальное учение (ТСУ), проводимом с курсантами на завершающем этапе обучения. Поэтому для эффективного использования ИТ на ТСУ необходимо определить, как и для решения каких дидактических задач их применять.

Наибольший интерес представляет использование ИТ в качестве информационно-методического обеспечения решения обучающимися учебно-боевых задач и управления образовательным процессом в ходе проведения ТСУ. Но для того, чтобы использовать ИТ на ТСУ в качестве информационно-методического обеспечения и управления учебно-воспитательным процессом, необходимо иметь соответствующую информационную систему, основой которой должны быть вычислительные средства, размещенные определенным образом на учебных командных пунктах (УКП) и объединенные в локальную вычислительную сеть (ЛВС). При этом под информационной системой (ИС) будем понимать совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств [3]. Локальная вычислительная сеть (ЛВС) охватывает небольшую территорию и использует ориентированные на эту территорию средства и методы передачи данных [2]. Вычислительная сеть – взаимосвязанная сово-

купность территориально рассредоточенных систем обработки данных, средств и (или) систем связи и передачи данных, обеспечивающая пользователям дистанционный доступ к ее ресурсам и коллективное использование этих ресурсов.

Кроме развертывания ЛВС также необходимо определить и подготовить информационные, методические, программные и другие аппаратные (технические) средства для реализации ИТ на ТСУ.

Таким образом, учитывая изложенное выше, целью данной статьи является определение путей реализации современных информационных технологий в учебном процессе и разработка предложений по их применению в интересах профессиональной подготовки курсантов в ходе ТСУ к будущей службе в войсках.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПОСРЕДНИКАМИ-ПРЕПОДАВАТЕЛЯМИ ДЕЙСТВИЙ ОПЕРАТОРОВ УЧЕБНОГО ОРГАНА УПРАВЛЕНИЯ

Тактико-специальное учение, проводимое в академии, является высшей формой процесса формирования у курсантов профессиональных компетенций на завершающем этапе их обучения. По организации подготовки и проведения оно имеет существенные отличия от ТСУ, проводимых в войсках. Эти отличия обусловлены иным содержанием целевой установки учения, содержанием и составом информационного обеспечения обучающихся, иными, в отличие от войск, возможностями материальной базы академии, уровнем сложности учебно-боевых задач, отсутствием войскового опыта у обучающихся по исполняемой на ТСУ должности [6]. Степень влияния данных особенностей на ход и результаты ТСУ во многом зависят от действий посредника.

На посредников-преподавателей в ходе ТСУ возлагается не только функция контроля за действиями обучающихся, но также они должны обеспечивать розыгрыш действий согласно замыслу ТСУ, изучать и объективно оценивать принятые решения, отработанные документы и работу обучающихся в целом.

Наиболее сложной частью работы посредников-преподавателей является оценка принимаемых решений учебными органами управления (ОУ) и оценка практических действий каждого отдельного обучающегося.

Сложность заключается в разнообразии задач, решаемых операторами учебного ОУ по должностному предназначению. Решение каждой задачи требует анализа большого объема информации, направленной на всестороннюю оценку обстановки, подготовки предложений командиру, разработки проектов боевых документов по управлению подразделениями и боевыми расчетами учебной воинской части. Необходимо учитывать также тот факт, что деятельность учебного ОУ неразрывно связана с действиями боевого расчета командного пункта. Поэтому общий состав обучающихся, входящих в учебный ОУ, достигает 17–20 курсантов.

В процессе ТСУ, как было уже сказано, посредник-преподаватель обучает, обеспечивает информацией и контролирует действия каждого курсанта из этого состава.

Однако при достаточно большой численности учебного ОУ, разнообразии решаемых каждым оператором задач в динамичной обстановке, необходимости использования операторами информации, размещенной в различных источниках, посредник не всегда способен оказать своевременную информационную помощь обучающимся, что в значительной мере снижает оперативность и качество управления подчиненными подразделениями.

По результатам ежегодно проводимых ТСУ наиболее часто отмечались следующие недостатки в действиях операторов учебного ОУ воинской части:

- низкая оперативность принятия решений;

- слабые навыки самостоятельного поиска информации в справочной литературе и, как следствие, обращение за консультацией к посреднику;
- поверхностная оценка обстановки и представление командиру предложений для принятия решения, не отвечающих полноте и качеству заданных требований (особенно в сложной ситуации);
- недостаточный уровень взаимодействия между операторами в ходе выработки управленческих решений;
- недостаточная штабная культура при оформлении боевых документов.

Основной причиной неумелых действий и ошибочных решений обучающихся является низкий уровень информационной поддержки действий операторов учебного ОУ при уяснении и оценке обстановки, организации выполнения учебно-боевых задач, проведении мероприятий всестороннего (главным образом – «боевого») обеспечения [6]. Учитывая данное обстоятельство, необходимо на ТСУ создать условия, которые позволили бы каждому оператору учебного ОУ оперативно получать в достаточном объеме и в любое время необходимую информацию, реже обращаясь к посреднику за помощью. Эти условия могут быть созданы применением ИТ посредством развертывания на УКП соответствующей ИС на базе ЛВС и будут способствовать реализации таких организационных и методических задач в ходе ТСУ, как:

- моделирование процессов и условий, которые могут иметь место в ходе реальных действий воинской части при выполнении задач по предназначению в войсках;
- выработка у обучающихся чувства уверенности и ответственности за самостоятельно принятое решение;
- одновременное использование курсантами знаний, умений, навыков, полученных по нескольким учебным дисциплинам, при решении сложных практических задач;
- обучение профессиональному взаимодействию между операторами учебного ОУ в ходе решения практических задач управления подразделениями;
- использование программного обеспечения, позволяющего осуществлять контроль правильности и соответствия принятого обучающимися решения заданной тактической обстановке.

Таким образом, можно сделать вывод, что за счет применения ИТ перечень традиционных методов информационного сопровождения действий операторов учебного ОУ посредниками-преподавателями на ТСУ может быть расширен при создании соответствующей ИС на УКП учебных воинских частей и соединений.

Структура развертываемой ИС будет зависеть от варианта выбранной топологии ЛВС, используемого программного обеспечения, состава загруженной справочной информации согласно замыслу ТСУ, а применяемые ИТ – от умения обучающихся пользоваться этой ИС и справочной информацией в интересах решения запланированных на ТСУ задач.

ВАРИАНТ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ЕЁ ПРИМЕНЕНИЮ НА ТАКТИКО-СПЕЦИАЛЬНОМ УЧЕНИИ

Для придания содержанию статьи большей определенности рассмотрим предложения по созданию и использованию ИТ в ходе ТСУ на примере обучающихся курсантов, выполняющих должностные обязанности в составе учебных ОУ на УКП воинской части управления космическими аппаратами (КА), развернутого на учебно-лабораторной базе (УЛБ) 101-й кафедры – УКП учебного оик. Основой создаваемой ИС, как было уже сказано, будет являться ЛВС. Она должна охватывать боевые посты операторов учебной группы боевого управления (ГБУ) оик, должностных лиц боевого расчета (БР) командного пункта, а также обозначенный на ТСУ УКП Главного испытательного космического центра (ГИКЦ).

Информационные задачи, решаемые этой ИС, ограничиваются учебными образовательными функциями, предусмотренными замыслом ТСУ. Состав должностных лиц-пользователей ИС на ТСУ представлен в табл.1.

Взаимодействие пользователей ИС с другими участниками ТСУ (с БР подчиненных подразделений учебной воинской части, территориально размещенных на УЛБ выпускающих кафедр факультетов) может осуществляться по телефону. В перспективе при развитии учебно-материальной базы БР подразделений также войдут в состав пользователей ИС, подключившись к разворачиваемой ЛВС.

Персональные компьютеры, установленные на указанных в табл. 1 постах учебных органов управления, соединяются кабелями, образуя топологию ЛВС типа «звезда» (рис. 1). При использовании этой топологии информация между постами передается через сервер и контролируется посредником. В случае повреждения какого-либо канала связи с сервером остальные каналы связи продолжают работать.

Таблица 1

Состав должностных лиц-пользователей информационной системой на ТСУ

Номер поста	Наименование должностных лиц в составе органа управления воинской части
1	Начальник ГБУ
2	Начальник штаба
3	Помощник командира части по политико-воспитательной работе
4	Командир дежурных сил
5	Оперативный дежурный КП оик и его помощник
6-14	Операторы ГБУ по соответствующим с замыслом ТСУ направлениям (службам)
15	Оперативный дежурный КП ГИКЦ и его помощник

Для приведенного в табл. 1 количества операторов посты, оснащенные персональными компьютерами и объединенные в ЛВС, могут размещаться в одном помещении УКП оик. Пост оперативного дежурного КП ГИКЦ и его помощника можно разместить в этом же помещении или в соседнем (в зависимости от наличия оборудованных УКП).

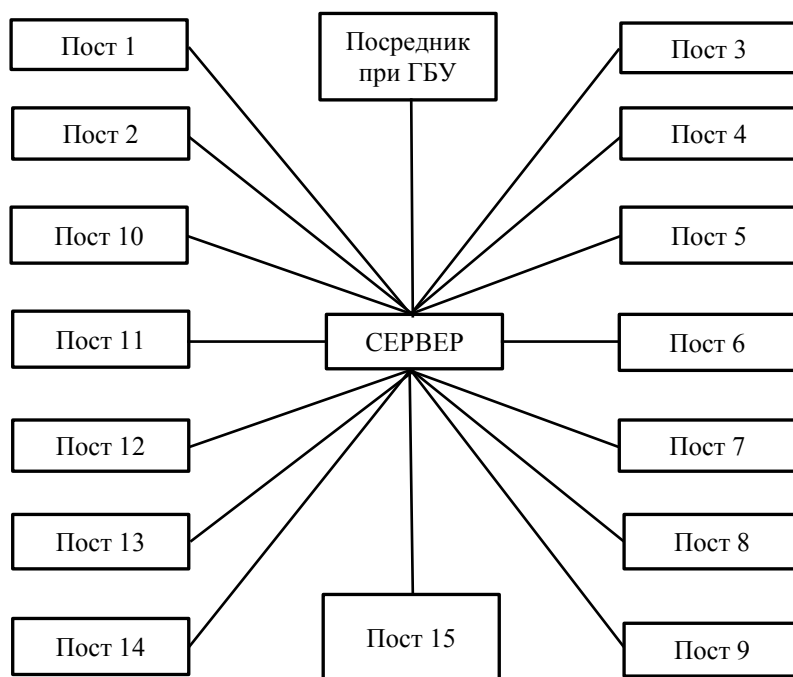


Рис. 1. Схема построения ЛВС для учебных органов управления (вариант)

Представленная схема ЛВС должна иметь вычислительные средства с программным обеспечением, позволяющим выполнять следующие операции:

- поиск справочной информации операторами ГБУ в интересах оценки обстановки для принятия решения;
- наглядная имитация результатов выполнения операций управления КА при проведении сеанса управления;
- вывод на средства отображения оперативного и астрономического времени, управление оперативным временем (возможность изменять и останавливать);
- хранение в электронном виде разработанных обучающимися на ТСУ решений и документов по управлению подразделениями оикв;
- регистрация всей входящей и исходящей информации, поступающей в учебный ОУ ГИКЦ с привязкой к оперативному времени;
- выбор обучающимися (при необходимости) кафедральных вариантов решений вводной (с разрешения посредника);
- возможность контроля посредником результатов действий обучающихся с целью оценивания их деятельности на всех этапах ТСУ;
- контроль посредником затрат времени при решении вводных обучающимися.

Вся необходимая для работы обучающихся и посредников справочная информация должна быть размещена в ЛВС таким образом, чтобы она была всегда доступна пользователям, но при этом должно обеспечиваться разграничение доступа к ней обучающихся и посредника.

Так, например, посредник при ГБУ должен иметь доступ к информации замысла ТСУ и «Плану наращивания...» с кафедральными вариантами решений по каждой вводной и временем ее выдачи, а обучающимся такого рода информация не должна быть доступна.

Наибольший объем информации справочного характера, которая необходима обучающимся при оценке обстановки и принятии решений, должен храниться на сервере и иметь примерно следующее содержание:

- справочные данные по составу сил и средств, ГТХ образцов вооружения, тактические схемы, отражающие формы, способы и порядок действий, данные по боевым возможностям обозначаемого на ТСУ условного противника;
- состав своих сил и средств, привлекаемых для решения основной задачи по предназначению, характеристики средств НАКУ, а также состав сил и средств, обеспечивающих выполнение основной задачи по предназначению (по видам всестороннего обеспечения);
- таблица плановых задач по управлению КА по этапам оперативного времени («План применения средств НАКУ на сутки...»);
- пакет формализованных образцов документов, предусмотренный замыслом ТСУ, по управлению подчиненными частями и подразделениями, а также обеспечивающий решение основной задачи по предназначению;
- таблица с данными, отражающими состав сил и средств соседей и порядок взаимодействия с ними;
- данные, характеризующие район расположения воинской части, а также методику оценки тактических свойств данного района.

Для каждого должностного лица учебного ОУ должен быть разработан электронный документ под названием «Методика работы оператора поста №» в различных тактических ситуациях. Этот электронный документ может корректироваться ежегодно в зависимости от выносимых на ТСУ вопросов, требований руководящих документов, произошедших изменений в средствах вооружения, тактике действий подразделений и частей.

В качестве примера в табл. 2 приведен вариант формы и содержания предлагаемого электронного документа для одного из операторов (пост №8 «Оператор по оценке состояния средств НАКУ»).

Таблица 2

Методика работы оператора поста № 8

Тактическая обстановка	Ожидаемые действия
Занятие исходного положения на ТСУ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Занять пост №8, получить документы. Доложить командиру о готовности к работе. 2. Уточнить текущее оперативное время, сигналы управления и оповещения, тактическую обстановку согласно заданию на ТСУ. 3. Уяснить, какая работа осуществляется в окик по управлению КА на данное оперативное время согласно «Плану применения средств НАКУ», какая объявлена технологическая готовность, состояние средства НАКУ. 4. Отдать распоряжения начальникам боевых расчетов (НБР) по подготовке к очередному сеансу управления (о порядке представления докладов при подготовке, проведении сеанса, возникновении неисправностей на средствах НАКУ, о результатах сеанса управления КА)
Проведение плановых и дополнительных к «Плану...» сеансов управления КА	<ol style="list-style-type: none"> 1. Контролировать через оперативного дежурного (ОД) или НБР ход подготовки и проведения сеансов управления. 2. Учитывать в Журнале несения боевого дежурства результаты всех проведенных сеансов управления КА. 3. При получении от ОД КП ГИКЦ и от начальника ГБУ распоряжения на проведение дополнительного сеанса управления контролировать подготовку БР и средств НАКУ к данному сеансу и его проведение (исправность и готовность средств НАКУ, наличие всех исходных данных для сеанса, режимы работы средств, взаимодействие). 4. Контролировать представление на КП ГИКЦ докладов о результатах проведенных сеансов управления КА
Выход из строя средств НАКУ (техническая причина)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценить совместно с НБР причину и влияние возникшей неисправности на управление КА. 2. Представить командиру предложения по устранению неисправности или замене вышедшего из строя средства НАКУ (способ устранения, требуемое время, необходимые силы и средства). 3. Довести указания (распоряжение) командира до НБР. 4. Доложить на КП ГИКЦ согласно Табелю докладов и сделать запись в Журнале несения дежурства
Изменение электромагнитной обстановки. Воздействие помех на РТС	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уточнить через ОД (НБР) степень влияния помех на выполняемую задачу по управлению КА. 2. Совместно с оператором поста №10 выработать и представить командиру предложения по снижению воздействия помех: <ul style="list-style-type: none"> – определить по карте азимут источника помех, принадлежность помехи; – определить меры по устранению (снижению влияния) помехи; – проанализировать целесообразность отмены сеанса управления КА. 3. По указанию командира доложить на КП ГИКЦ (по Табелю докладов или кодограммой), сделать запись в Журнал несения дежурства
Приведение окик в высшие степени боевой готовности (ВСБГ)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Получить от командира задачу на приведение в ВСБГ. 2. Уяснить мероприятия по приведению средств НАКУ в готовность к применению согласно «Плану приведения в боевую готовность». 3. Уточнить через НБР состав средств НАКУ, находящихся в ремонте, на техническом обслуживании, подготовить доклад на КП ГИКЦ (по Табелю докладов). 4. Подготовить предложения командиру: <ul style="list-style-type: none"> – по обеспечению окик резервными источниками электропитания; – по обеспечению окик ГСМ, ЗИП, расходными материалами. 5. Разработать «План применения средств НАКУ» на очередные сутки. 6. Доложить на КП ГИКЦ о восстановлении средств НАКУ в готовность к применению (по Табелю докладов)

Окончание табл. 2

Тактическая обстановка	Ожидаемые действия
Воздействие условного противника средствами поражения	1. При уничтожении (повреждении) противником средств НАКУ: <ul style="list-style-type: none"> – оценить потери средств НАКУ и их влияние на выполнение задач омик; – рассчитать потребное время на восстановление средств НАКУ; – представить предложения начальнику ГБУ по управлению КА с учетом потерь средств НАКУ; – представить на КП ГИКЦ доклад о воздействии противника, о потерях средств НАКУ по Табелю докладов. 2. Разработать Боевое распоряжение командиру эксплуатационно-технической роты на подготовку к работе резервных источников электроснабжения.

Наличие данного информационного документа, соответствующего по содержанию должностному предназначению каждого оператора, позволит ему действовать целенаправленно, сократить время на решение вводных, что будет способствовать повышению оперативности управления при выполнении задач по предназначению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены преимущественно техническая сторона вопроса и методическое обеспечение применения ИТ на ТСУ. Установлено, что применение ИТ существенно повысит качество образовательного процесса. В дальнейшем необходимо проанализировать исследуемую предметную область на предмет подходящего для решения задач ТСУ программного обеспечения и разработать предложения по его использованию с учетом заданных требований.

В целом изложенные в публикации подходы к организации проведения ТСУ базируются на анализе многолетних результатов проведения ТСУ, и их использование может значительно повысить эффективность формирования профессиональной компетентности курсантов, так как ИТ позволят создать на ТСУ условия, адекватные реальным действиям войск. Достоинством применения ИТ является также то, что обучающийся в течение меньшего количества часов учебного времени получает качественные компетенции будущей профессиональной деятельности, более организованными и целеустремленными становятся взаимоотношения посредников и обучающихся. Обучающиеся более оперативно и качественно смогут обрабатывать учебно-боевые задачи, а преподаватель постоянно контролировать и при необходимости своевременно корректировать их работу.

К недостаткам применения ИТ можно отнести:

- необходимость оснащения рабочих мест сложной, дорогостоящей техникой;
- объемная и длительная подготовка ТСУ, связанная с подбором и освоением программного обеспечения, создание электронных моделей обстановки;
- отсутствие психологического напряжения и ответственности обучающихся, которые сопровождают решение задач в реальных условиях.

Вместе с тем при оптимальном соотношении применения ИТ и традиционных форм обучения на ТСУ возможно повышение качества подготовки военного специалиста, что соответствует достижению цели, поставленной в данной статье.

Список используемых источников

1. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009.
2. ГОСТ 24402-88. Телеобработка данных и вычислительные сети. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2005.
3. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: федеральный закон от 27.07.2006 №149-ФЗ // Российская газета. – 2006. – 27 июля.
4. Федоренко В.С. К вопросу о применении компьютерных форм оперативной подготовки при обучении слушателей Военно-воздушной академии // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – №.6. – С. 34–39.
5. Панус В.С. Информационно-коммуникационные технологии и военное образование // Военная мысль. – 2009. – №6. – С. 48–50.
6. Ерофеев А.В., Покидов Л.В. Методика применения специального программного комплекса учебного командного пункта для формирования у обучающихся профессиональных компетенций по тактико-специальной подготовке // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 365–369.

Н.Б. Кунтурова,
доктор педагогических наук, доцент

ОЦЕНИВАНИЕ ВАРИАТИВНОСТИ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ФОРМИРОВАНИЮ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ ОБРАЗОВАНИЯ У КУРСАНТОВ ВОЕННОГО ВУЗА НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Анализируется вопрос оценивания результативности методических подходов к обучению в военном вузе, сравнивается успешность учебной группы курсантов в течение всего срока изучения одного предмета и учебных групп потока между собой за определенный период на основании разработанного в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского «Программного модуля визуализации образовательной траектории обучающегося в вузе». Приведен содержательный пример, иллюстрирующий представленные теоретические положения.

Ключевые слова: уровень образования, качество подготовки, методы обучения, образовательная траектория, коэффициент компетентности.

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к качеству подготовки выпускников военного вуза и основные задачи модернизации профессионального образования ориентированы на преобразование содержания программ военно-профессиональной подготовки и технологий обучения, как со стороны их вариативности, так и со стороны их результативности. Вопросы индивидуализации и вариативности образования поднимаются в трудах Ш.А. Амонашвили, А.В. Хуторского и других, рассматриваются в Государственной программе Российской Федерации «Развитие образования» на 2013–2020 годы, ФГОС ВО как ключевые направления реформирования образования [1, 7, 8].

Квалификация преподавателя, его умение целенаправленно применять методы и средства обучения, ориентировать курсантов в направлении, необходимом для усвоения определенных дисциплиной знаний и умений, оптимизирует процесс профессиональной подготовки будущих военных специалистов.

ОЦЕНИВАНИЕ ВАРИАТИВНОСТИ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ФОРМИРОВАНИЮ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ ОБРАЗОВАНИЯ У КУРСАНТОВ

Способ достижения какой-либо цели, решения конкретной задачи; совокупность приемов или операций практического или теоретического освоения действительности, определенным образом упорядочивающих действительность, определяется как метод [9]. Так, Р. Декарт трактовал понятие «метод» как набор осознанных действий при определенных условиях. В трудах Н.М. Борытко отмечается, что «основная идея, заключающаяся в методе как педагогическом термине – это указание к педагогически целесообразному действию, предписание как действовать» [5, 14]. Педагогические методы определяют виды взаимосвязи между деятельностью педагогов и обучающихся в интересах достижения поставленной цели.

Методы обучения, определяя алгоритм взаимодействия курсантов с преподавателями, должны носить ситуативный и альтернативный характер. Оптимизируя обучение будущих военных специалистов, преподаватель может использовать различные методы взаимодействия с обучающимися: коммуникативные, познавательные, наглядные, иллюстративные, диалогические, репродуктивные, эвристические и т.п. Преподаватель принимает самостоятельное решение при выборе необходимых методов для изложения своей дисциплины, при

этом он опирается на цели обучения, уровень начальных компетенций курсантов, их возрастные особенности, условия, влияющие на образовательный процесс и т.п.

При обосновании теоретических положений и решении практических задач преподаватели используют необходимый набор методов обучения, который разрабатывается, корректируется и модифицируется в зависимости от уровня знаний обучающихся и целей дисциплины, что способствует оптимизации процесса обучения,

Целью подготовки будущих военных специалистов является формирование у них определенных компетенций в рамках конкретной дисциплины, поэтому обоснованным является применение всего спектра существующих методов обучения.

Сделать выводы о преимуществе использования какого-либо метода обучения возможно только после осуществления классификации всего разнообразия характеристик и сравнения равнозначных учебных групп по результатам обучения. Российский педагог И.Я. Лернер отмечает, что «многообразие – это неограниченная смена методов и приемов, опирающихся на одни и те же психологические характеристики и в иных случаях утомляющая учащихся больше, чем повторность и однообразие» [10], следовательно, всё разнообразие методов обучения опирается на различные сочетания одних и тех же психологических функций: памяти, мышления, речи и восприятия, и не требует их бесконечной перемены при осуществлении деятельностного и познавательного процессов. По мнению Ю.К. Бабанского, рациональный подход к применению многообразия методов обучения «не утомляет, не распыляет энергию субъектов, участвующих в образовательном процессе, а связывает воедино активность психических функций, экономит рабочие усилия. При этом главное назначение такой «разнообразной системы методов состоит в том, что она позволяет наиболее полно воздействовать на личность, наиболее обстоятельно рассмотреть необходимый материал, увидеть его во всей широте связей и отношений с другими явлениями и факторами» [3].

В образовательном процессе военного вуза применяются различные методы обучения: и традиционные, и инновационные, например используются мультимедиа слайды, плакаты, демонстрирующие пошаговое решение задач, выполняются расчетно-графические и курсовые работы при изучении предметов естественного-научного цикла [1, 6, 13].

Возможность формирования курса дисциплины с различным уровнем сложности, учитывающим образовательные потребности и способности обучающихся, позволит осуществлять вариативность подхода к формированию требуемого уровня образования у обучающихся.

Сопоставляя компетенции ФГОС ВО и требования, предъявляемые к выпускнику военного вуза, можно выделить совокупность связанных между собой военно-профессиональных функций, выполняемых выпускником военного вуза при осуществлении им служебной деятельности. Нацеленность курса изучаемых в военном вузе дисциплин на развитие у обучающихся таких функций требует специального отбора элементов, его наполняющих, а также вариативности методических подходов в процессе обучения. Получаемый результат освоения курса дисциплины должен сформировать определенные общекультурные и профессиональные компетенции личности и позволить ей выполнять необходимые функции, нацеленные на избранный вид служебной деятельности.

Опираясь на такой подход, можно модифицировать содержание модулей дисциплины, что позволит обеспечить индивидуализацию образовательного процесса, разнообразить методические подходы в процессе обучения и прогнозировать достижение качества образовательных результатов.

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ И РАСЧЕТ СРЕДНЕГО КОЭФФИЦИЕНТА КОМПЕТЕНТНОСТИ УЧЕБНОЙ ГРУППЫ

Оценить полученные образовательные результаты можно воспользовавшись программным модулем визуализации образовательной траектории обучающегося в вузе [11], разрабо-

таным в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Используя результаты учебных достижений обучающихся, можно рассчитать обобщенную оценку – меру качества, выражающую степень достижения поставленных целей.

Результирующим показателем качества обучения служит коэффициент компетентности k_i обучающегося, являющийся количественным показателем образовательного потенциала каждого курсанта. Величину коэффициента компетентности k_i рассчитываем по формуле

$$k_i = \frac{W_\phi}{W_M} \cdot 100. \quad (1)$$

Фактический результат вычисляем по формуле

$$W_\phi = \frac{9}{5} \cdot p_i + \frac{16}{5} \cdot m_i + 5 \cdot l_i, \quad (2)$$

где p_i, m_i, l_i – число итоговых оценок i -го курсанта: «удовлетворительно», «хорошо», «отлично» соответственно. Оценку «неудовлетворительно» не рассматриваем, так как она не приводит к увеличению компетентности, это отсутствие изменений показателя качества обучения. Максимально возможный результат – это результат отличника:

$$W_M = 5 \cdot s, \quad (3)$$

где $s = p_i + m_i + l_i + c_i$. Символом c_i здесь обозначено число «неудовлетворительных» оценок.

Построение образовательной траектории представлено на рис. 1. Осуществляется движение из начальной точки А по правилу: если все оценки «отлично», то это максимальное перемещение из точки А в точку С за рассматриваемый временной период Δt_i , если оценки не только «отлично», то перемещение складывается из суммы векторов $\overrightarrow{AM} + \overrightarrow{MP} + \overrightarrow{PN}$.

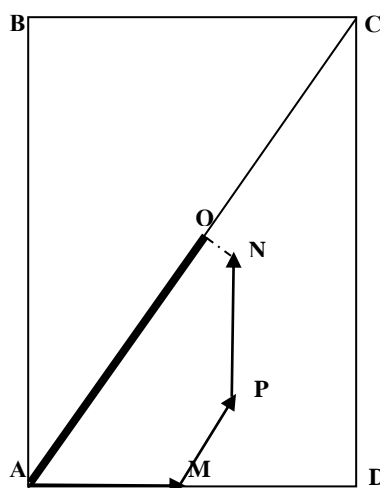


Рис. 1. Построение образовательной траектории обучающегося $AMPN$ за период Δt_i

В построенном прямоугольнике сторона AD кратна 3, сторона AB кратна 4 и AC кратна 5. Если получена оценка «удовлетворительно», то двигаемся параллельно AD, если оценка «хорошо» – параллельно AB, если оценка «отлично» – параллельно главной диагонали AC, при этом за точку начала каждого вектора примем точку результирующего положения на предыдущем этапе перемещения. Оценка «неудовлетворительно» не приводит к перемещению, это стагнация. Конечную точку траектории N проецируем на главную диагональ AC и получаем величину W_ϕ , равную длине отрезка AO.

Можно проиллюстрировать коэффициент компетентности k_i как отношение отрезков АО – проекции образовательной траектории обучающегося АМРН на отрезок АС, соответственно равный W_M , к длине отрезка АС.

Таким образом, выполняется построение образовательной траектории для каждого обучающегося, а так как оценивание осуществляется дискретно, то имеется возможность оценивать состояние системы на каждом временном этапе и, следовательно, осуществлять контроль и управление процессом.

Программа, описывающая этот процесс, с построением оболочки и конечных точек образовательной траектории представлена в «Программном модуле визуализации образовательной траектории обучающегося в вузе» [6, 11], разработанном в академии.

Алгоритм построения рассеяния результатов обучения учебной группы курсантов, выраженных через рассчитанный коэффициент компетентности, условно можно разбить на три блока: ввод исходных данных, расчет необходимых параметров и отображение полученных результатов в виде изображения.

Исходными данными алгоритма служат массивы данных, образованные результатами курсантов конкретной учебной группы: ЕГЭ по предмету, аттестациями/экзаменами. В расчетном блоке осуществляется вычисление величины коэффициента профессиональной компетентности способом интегральной свертки. Полученный результат – коэффициент компетентности k_i выводится на экран в виде изображения (см. рис. 1), весь массив точек образует картину распределения результатов обучения группы курсантов по рассматриваемой дисциплине (рис. 2).

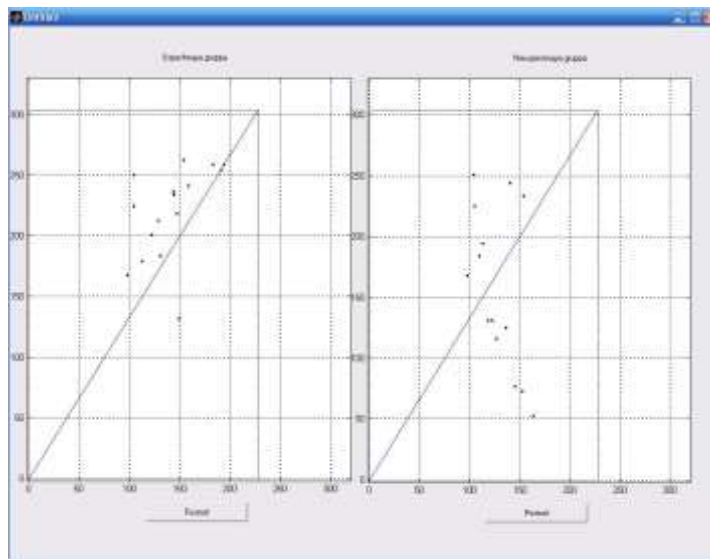


Рис 2. Иллюстрация распределения результатов успешной и неуспешной учебных групп

Для каждой учебной дисциплины можно построить рассеяние результатов обучения курсантов учебной группы за определенный образовательный период (аттестация, семестр), что позволит оценить результаты образовательного процесса учебной группы курсантов по выбранной дисциплине и даст возможность сравнить результаты различных групп между собой как на одном, так и на разных факультетах, сравнивая не только учебные достижения, но и вариативность подходов в методике преподавания.

При поступлении кандидата в академию его балл ЕГЭ по математике является аналогом рассчитываемого коэффициента компетентности k_i по предмету [12, 13] и приравнивается к

нему. Это позволяет использовать этот результат как базовый коэффициент компетентности каждого курсанта, а также рассчитать средний коэффициент компетентности по предмету для учебной группы курсантов, поступивших в академию, до начала обучения:

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ji}}{n_j}, \quad (4)$$

где k_{ji} – коэффициент компетентности i -го курсанта;
 j – номер учебной группы;
 n_j – количество курсантов в j -й группе.

В процессе обучения, например, математическому анализу в течение I семестра каждый курсант аттестуется не менее трех раз, эти оценки позволяют вычислить индивидуальный коэффициент компетентности k_i по предмету за I семестр и рассчитать средний коэффициент компетентности по группе в конце семестра и после сдачи сессии R_j (табл. 1), полученные результаты можно сравнивать между собой и делать выводы о протекании процесса обучения дисциплине.

Можно проанализировать успешность одной учебной группы на протяжении времени изучения дисциплины (III семестра), можно сравнивать между собой группы потока за определенный период. В этом случае особый интерес вызывает ситуация, когда лекции потока читает один преподаватель, а практику в потоке ведут различные преподаватели. Это позволяет сравнить между собой вариативность методических подходов, применяемых этими преподавателями при проведении занятий по дисциплине.

Таблица 1

Изменения коэффициента компетентности учебной группы за период изучения учебной дисциплины «Математический анализ»

№ учебной группы	R_j												
	Балл ЕГЭ R_{j1}	I семестр R_{j2}	Изменения R_{j1} и R_{j2}	С учетом ЭКЗ R_{j3}	Изменения R_{j3} и $R_{j2} \setminus R_{j1}$	II семестр R_{j4}	Изменения R_{j4} и R_{j3}	С учетом ЗО R_{j5}	Изменения R_{j5} и $R_{j4} \setminus R_{j1}$	III семестр R_{j6}	Изменения R_{j6} и R_{j5}	С учетом ЭКЗ R_{j7}	Изменения R_{j7} и R_{j6}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
**1	54,9	52,7	-2,2	53,8	1,1\(-1,1	51,8	-2	53,4	2,6\(-1,5	52,7	-0,7	55,8	3,1
**2	48,8	45,6	-3,2	47,7	2,1\(-1,1	46,5	-1,2	49,1	2,6\(+0,3	48,7	-0,4	52,3	3,6
**3	53,6	50,4	-3,6	52,3	1,9\(-1,3	51,4	-0,9	53,7	2,3\(+0,1	54,3	0,6	57,1	2,8
**4	42,7	40,2	-2,5	43,1	2,9\(+0,4	42,3	-0,8	44,1	1,8\(+1,4	45,3	1,2	49,1	3,8
**5	51,4	47,9	-3,5	49,8	1,9\(-1,6	47,9	-1,9	51,2	3,3\(-0,2	50,7	-1,5	54,4	3,7
**6	58,2	57,3	-2,9	59,8	2,5\(+1,7	56,7	-3,1	60,6	3,9\(+2,4	59,9	-0,7	63,2	3,3
**7	44,7	43,4	-3,3	45,1	1,7\(+0,4	43,8	-1,3	47,1	3,3\(+2,4	47,0	-0,1	50,2	3,2

Используя массивы оценок, рассчитывается k_i – коэффициент компетентности i -го курсанта и средний коэффициент компетентности учебной группы R_j за каждый временной период, эти коэффициенты можно сравнить между собой и со средним значением баллов по ЕГЭ.

Оценивание вариативности методических подходов осуществляется с помощью коэффициента h , показывающего изменения среднего коэффициента компетентности учебной группы. Коэффициент $h = R_{j_{n+1}} - R_{j_n}$, где $n = \overline{1,7}$ номер столбца в табл. 1, если колебания, определенные опытным путем, величины коэффициента h находятся в промежутках: $-4,2 \leq h \leq -0,1$ и $h \geq 0,1$, то можно сделать выводы об успешности применяемых методических приемов обучения и/или корректировать работу преподавателя, если присутствует стагнация $[-0,1; 0,1]$ или спад результатов при $h < -4,2$.

Проанализировав результаты, приведенные в табл. 1, можно сделать выводы о продуктивности выбранных методических подходов к преподаванию указанной дисциплины.

Снижение вычисленного коэффициента компетентности группы в течение семестров обучения (см. табл. 1) может быть связано с уровнем предъявляемых преподавателем требований, при этом отмечается рост коэффициентов в период сдачи экзаменов и зачета, подтверждая правильность выбора методов обучения дисциплине преподавателем.

Полученные результаты позволяют сравнить успешность учебных групп между собой, а результаты расчетов показывают, что картина распределения конечных точек построенных образовательных траекторий с рассчитанным значением коэффициентов компетентности каждого из курсантов в успешной группе за определенный период времени отличается от картины распределения в неуспешной группе. Большинство конечных точек образовательной траектории группируются в успешной группе выше главной диагонали и превышают ее среднее значение, следовательно, и средний коэффициент профессиональной компетентности такой учебной группы выше (см. рис. 2).

На рис. 2 показана фактическая продуктивность обучаемых, отражающая влияние вариативности методических подходов к обучению по рассматриваемой дисциплине. Представлены конечные точки образовательных траекторий курсантов, соответствующие индивидуальным значениям коэффициентов компетентности, двух сравниваемых учебных групп.

В процессе обучения все заинтересованные стороны могут использовать полученную информацию для целенаправленной коррекции применяемых методических приемов изучения дисциплины, проведения и контроля процесса обучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый методический подход способствует достижению требуемых результатов обучения и повышает информированность всех субъектов образования, обобщает данные о текущей успеваемости курсантов, учебных групп и результатах итогового контроля, а также позволяет анализировать информацию о результативности деятельности преподавателей.

Список используемых источников

1. Алтухов А.И., Калинин В.Н. Мультимедийное сопровождение лекций как важнейшая дидактическая составляющая физического образования в военном вузе // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 322–328.
2. Амонашвили Ш.А. Личностно-гуманная основа педагогического процесса. – Минск: Университетское, 1990. – 559 с.
3. Бабанский Ю.К. Избранные педагогические труды – М.: Педагогика, 1989. – 342 с.

4. *Болбат О.Б.* Формирование профессионально-значимых качеств при изучении инженерной графики в образовательной системе школа – вуз: дис. канд. пед. наук: 13.00.08: – Новосибирск, 2002. – 210 с.

5. *Борытко Н.М., Мацкайлова О.А.* Воспитание субъектности студента как основа гуманизации профессионального образования // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. – 2009. – № 4 (38). – 47 с.

6. Оценка влияния современных инновационных технологий на формирование математической компетентности будущих специалистов в вузах силовых структур / Н.В. Васильева, Н.Б. Кунтурова, Е.А. Малыгина, Е.В. Калач // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Проблемы высшего образования. – 2017. – № 3. – С. 23–27.

7. *Трушников Д.Ю.* Аксиологическая модель воспитания в инженерном вузе // Высшее образование сегодня. – 2008. – № 6. – С. 66–70.

8. *Хуторской А.В.* Методика личностно-ориентированного обучения. Как обучать всех по-разному?: пособие для учителя. – М.: Владос-Пресс, 2005. – 383 с.

9. *Махмутов М.И.* Теория и практика проблемного обучения. – Казань: Издательство Казанского государственного университета, 1972. – 126 с.

10. *Лернер И.Я.* Дидактические основы методов. – М.: Педагогика, 1981.

11. Программный модуль визуализации образовательной траектории обучающегося в вузе: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS № 2015610507 / Н.Б. Кунтурова, А.В. Панков, Н.В. Селихина, А.В. Назаров. – № 2014612299; заявка от 18.03.2014; опубл. 13.01.2015.

12. Оценивание профессиональной компетентности военного специалиста при реализации дополнительной профессиональной программы повышения квалификации / Н.Б. Кунтурова, Д.А. Мосин, Н.В. Селихина, Е.В. Шалонов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 271–277.

13. *Яковлева Н.А., Кунтурова Н.Б.* Подход к оцениванию профессиональной компетентности специалистов силовых структур по видам деятельности при организации контроля формирования профессиональной компетентности // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2016. – № 2 (70). – С. 146–150.

14. Толковый словарь русского языка начала XXI века. Актуальная лексика / под ред. Г.Н. Складневской. – М.: Bookmate, 2008. – 800 с.

15. *Пиралова О.В.* Теоретические основы оптимизации обучения профессиональным дисциплинам в условиях современного технического вуза. – М.: Академия Естествознания, 2011.

В.П. Огородников,
доктор философских наук, профессор

СВЯЗЬ ИСТОРИЧЕСКОГО И ЛОГИЧЕСКОГО В ФОРМИРОВАНИИ ИДЕАЛОВ И НОРМ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье раскрывается история становления идеалов и норм научного исследования в ее связи с развитием философии. Показывается, что в системе идеалов и норм науки наблюдается историческая и содержательно-логическая преемственность. При этом рассматривается детерминированность идеалов и методов науки развивающейся техникой и технологией материального производства и обратное воздействие науки на материальное и духовное производство. Демонстрируется диалектика эволюции и революции в научном познании.

Ключевые слова: научное познание, методология науки, эмпиризм, рационализм, позитивизм, материальное производство, идеалы, нормы, исторические этапы развития науки.

Идеалы, на которые ориентируется ученый или научное сообщество, нормы и методы, которые они используют в исследованиях, непосредственно детерминируют результаты таких исследований. Данное обстоятельство определяет актуальность изучения тех факторов, которые участвуют в формировании самих идеалов и норм, а следовательно, и разработке методов науки в конкретном социуме в конкретный исторический момент его развития. Сказанное раскрывает содержание проблемы связи исторического и логического в формировании идеалов и норм научного исследования, которой посвящена представленная статья.

В связи со сложившейся полисемией в определении понятий «идеалы науки» и «нормы науки» следует в начале разговора о них попытаться дать рабочие определения.

Идеалы – те мировоззренческие установки и принципы, которыми руководствуется человек в процессе познавательной и практической деятельности. В этом ракурсе рассмотрения идеалы представляют собой прежде всего некую желанную цель, идеальный образ потребного будущего. Кроме того, к идеалам можно отнести и предполагаемые средства достижения цели.

По последнему аспекту «идеал» сближается с «нормой». Однако норма шире идеала, ибо включает в себя научные, нравственные, законодательные, экономические, политические, эстетические и другие нормы. Норма в науке – это система правил и установок, принципов научного исследования.

Идеалы и нормы науки имеют исторически конкретный характер, то есть представляют конкретные периоды развития научного познания. История развития человеческого познания мира вообще и научного познания в частности повторяет этапы развития материального производства. Во взглядах первобытного человека на мир преобладало объяснение всех природных и социальных процессов действием сверхъестественных причин. Однако развитие материального производства создало новую среду обитания для человека. На определенной степени развития техники и технологии человека уже окружала «вторая природа» – предметы, вещи и орудия труда, в естественном происхождении которых он не сомневался. Появилась потребность применить естественное объяснение и для всех объектов и процессов «первой природы». В этом наука качественно отличается от предшествующих ей религиозного и мифологического мировоззрений.

Первый этап развития научного познания детерминирован революцией в производительности труда, связанной с переходом к производству (помимо необходимого) прибавочного продукта, превращающегося в товар. Это определило разделение социума на классы имущих, то есть обладающих средствами производства, и неимущих – не владеющих средствами производства. На этой же основе произошло разделение умственного и физического труда.

Умственный труд становится прерогативой класса, владеющего средствами производства. Из этого класса и выделилась группа, которая включала в себя людей, ставших субъектами становления научного познания. В Древней Греции эта группа людей получила название «философы», то есть – «любители мудрости». Любители мудрости искали сущность в любых процессах – начиная с явлений личной и общественной жизни и заканчивая внешней природой. Философия явилась исторически первой формой научного знания, включающей в себя зачатки всех последующих наук, как естественных, так и гуманитарных.

Существенное отличие науки от разнообразных видов и форм донаучного и ненаучного познания – в ее предмете, в том, какие стороны, свойства объекта выступают целью познания, а также в том, как нечто познается, какие методы и приемы при этом используются. Цель познания, как и цель любой деятельности, представляет собой идеальный образ потребного будущего, то есть идеал, к которому следует стремиться. В отличие от обыденного познания, находящего свою цель в непосредственной деятельности и направленного на преобразование объекта деятельности, научное познание имеет такую цель только в начале своей истории. Но уже и здесь идеал научного познания устремлен не только на изменение практики, но и на получение знаний, которые родоначальник экспериментирующего естествознания Нового времени Ф. Бэкон (1561–1626) назвал «светоносными», то есть расширяющими мировоззрение, знание мира и людей. Разделение знаний на плодоносные и светоносные свидетельствует о появлении двух уровней научного познания – эмпирического и теоретического.

Прерогатива формулирования идеалов и норм научного познания с античности и до наших дней принадлежит философии. При этом история взаимосвязанного развития философии и науки разделяется на четыре этапа.

1. Становление и развитие философии как преднауки, включающей в себя все последующие формы научного познания и мировоззрения, разработку специфических научных идеалов, методов и норм научного познания (около VIII века до н.э. до первых веков нашей эры).

2. Период европейского средневековья, когда в связи со стагнацией технического развития и закатом греко-римской цивилизации происходит отход от идеалов и норм античной науки, замена их христианскими ценностями и нормами (первые века нашей эры до эпохи европейского Возрождения).

3. Этап становления и обособления от философии конкретно-научного знания, прежде всего естествознания, призванного решить задачи, стоящие перед материальным производством Нового времени (от XVII до середины XIX века).

4. Появление в конце XIX века неклассической, а в середине XX века постнеклассической науки, что характеризуется качественным изменением в субъекте и объекте познания, перевернувшим идеалы, нормы и методы классического научного познания (от середины XIX века до настоящего времени).

На первом, философском, этапе научное познание устремлено на познание абстрактных сущностей мира – на всеобщий субстрат и всеобщую субстанцию. Это составляет предмет философии и определяет методологию – движение от единичного к всеобщему, абстрагирование и обобщение.

Но философы античности отнюдь не сходятся в объекте познания. Так, если милетцы, Гераклит Эфесский (544–483 гг. до н. э.) и Демокрит (460–370 до н. э.) искали всеобщий субстрат и субстанцию в природе, в космосе, то Сократа (469–399 до н. э.) природа не интересует – он устремлен на поиски сущности человека, всеобщих идеалов нравственности. Ученик Сократа, Платон (427–347 до н. э.) ищет основу единства человека и природы и находит ее в мире идей – всеобщих сущностей. При этом предметом для всех мудрецов античного мира остается всеобщее. Платон прямо указывает, что задачей любого философа является познание общего в единичном, вечного в преходящем. Это и есть путь постижения сущности – цели-идеала для научного познания любого уровня и исторического этапа.

Аристотель (384–322 до н.э.), открыв основные законы формальной логики, вооружил

научное исследование системой общелогических методов, которая не подвергалась сомнению вплоть до середины XIX века. При этом Аристотель существенно уточнил некоторые научные идеалы, служившие целями научного познания для его предшественников.

Согласно материалистическому учению Демокрита, в мире нет ничего, кроме атомов (неделимых и неуничтожимых материальных частиц) и пустоты (неподвижное и вечное пространство). При этом атомы движутся в пустоте, подчиняясь абсолютной необходимости причинно-следственной связи. Случайность – выдумка людей, не познавших какие-то причинно-следственные отношения. Поэтому-то Демокрит заявлял, что предпочитает знание только одной причинно-следственной связи персидскому престолу.

Такое мировоззрение нацеливало научный поиск на познание объективной необходимости. Необходимость на долгие столетия стала идеалом, целью и критерием истинного знания. Автор теории вероятностей П.-С. Лаплас (1749–1827) через тысячелетия почти полностью воспроизвел мысль Демокрита о случайности как следствии незнания истинных и необходимых причин. Лапласовский детерминизм утвердился в науке как метод и идеал познания вплоть до выявления неклассической наукой диалектической связи необходимого и случайного в объективных взаимодействиях микромира. Однако печально известный советский биолог, академик Т. Лысенко (1898–1976) успел-таки «разгромить» постулаты генетики и способствовал репрессированию многих виднейших представителей этой науки в СССР, руководствуясь лозунгом «Наука – враг случайности».

Аристотель же в своем далеком IV в. до н. э. умудрился понять, что упразднение из научного познания объективной случайности ведет к упразднению самой науки, ибо никакое познание не имеет практического значения, если все фатально предопределено. Тогда не нужно ничего изучать, спорить, вырабатывать на основе знания какую-то стратегию и тактику деятельности. Мудрец и глупец одинаково беспомощны перед абсолютной необходимостью, одинаково ей подчинены. Бессмысленной становится и выведенная Б. Спинозой (1632–1677) формула: «Свобода – познанная необходимость».

До Г. Гегеля (1770–1831) никто не раскрыл заложенное Аристотелем понимание диалектической связи необходимого и случайного, не понял его мировоззренческого и методологического значения.

Вместе с тем Аристотель развил и укрепил методологию объективного идеализма, разработанную его учителем Платоном. Открыв и обосновав два основных типа умозаключения – дедукцию и индукцию, великий мыслитель античности отдал предпочтение наиболее пространному виду дедукции – простому категорическому силлогизму. Ведь именно категорический силлогизм при истинности суждений-посылок и соблюдении правил вывода гарантирует истинность заключения. С другой стороны, дедукция воспроизводит и укрепляет основной посыл аристотелевской философии – развитие мира идет от всеобщего (от Бога), как формы всех форм, к конкретно-единичному, в котором идеальная форма воплощается в материи.

Величайшая заслуга Аристотеля перед наукой состоит в том, что он разработал систему общелогических методов познания:

- правила определения и операций с понятиями;
- правила образования суждений;
- правила дедуктивного и индуктивного выводов;
- правила доказательства и опровержения.

Так как логика – наука о правильном мышлении, то общелогические методы познания являются основой *рациональности* как идеала науки на всем протяжении ее становления и развития. В этом наука не совместима ни с какой религией, ни с каким иррационализмом.

Подводя итог сказанному о наработках научного познания на стадии преднауки – философии, следует указать на разработанные античными мыслителями идеалы и нормы научного знания, которые и по сей день служат критериями отличия науки от любых форм ненаучного и антинаучного мировоззрения:

- 1) объективность рассмотрения, предполагающая поиск естественных причин;
- 2) рациональность, связанная с применением в научном исследовании указанных выше общелогических методов;
- 3) направленность познания на постижение сущности;
- 4) направленность на познание устойчивых, повторяющихся связей и отношений законов, при помощи которых возможно объяснить, определить сущность явлений и предсказать будущие этапы развития исследуемых процессов;
- 5) возможность проверки полученных знаний в повторяющейся практике или экспериментах;
- б) основания системного подхода, позволяющего изучать любой момент действительности как элемент единого целого, системы.

Кроме того, античная наука отличалась особой ролью философов-мудрецов в социальной жизни. Философы во многом определяли нормы экономических, политических, нравственных, эстетических и всех других социальных отношений.

Диалектический подход к соотношению общественного бытия и общественного сознания предполагает, что на определенном этапе эволюции общества общественное сознание может доминировать над общественным бытием, детерминировать его развитие. В этом контексте можно говорить о временах, когда принятые на веру идеалы и нормы жизни определяют общественное бытие. Это происходит в связи с тем, что старые формы производственных отношений всё более отстают от потребностей общественного производства, а новые еще не получили основания своего становления в новой технике и технологии. Совершённый в европейском средневековье отказ от научной рациональности привел к стагнации и производство, и науку, и всю социокультурную систему жизнедеятельности. Религиозные догматы, из которых выделяется знаменитое утверждение Тертуллиана (165 –220) «Верую, ибо абсурдно», продемонстрировали свою полную несостоятельность как «методология» познания и преобразования природы и человека.

«Тертуллиан исходил из того, что между философией и религией – “Афинами” и “Иерусалимом” – лежит пропасть. После Христа не нужна никакая любознательность, а после Евангелия не нужно искать никакой мудрости» [1]. Это заявление представляло откровенную антисциентистскую позицию церкви. При этом отвергались и все разработанные античными мыслителями идеалы, нормы и методы научного познания. Главными «методами» познания на века становятся «откровение», ниспосланное «прозрение», религиозный экстаз и тому подобное.

Однако современные апологеты Тертуллиана пытаются интерпретировать его, например, таким образом: «Тертуллиан исходит из того, что, если мы говорим о Боге, мы не можем мерить Его нашими земными мерками, оценивать Его нашим человеческим умом. Бог превосходит наш ум. Сибирский валенок не может использовать свою простоту как инструмент для постижения компьютера. Если бы валенок мог мыслить, он должен был бы допустить, что компьютер не всегда ведет себя так, как валенок. Между человеком и Богом разница несколько побольше, чем между валенком и компьютером» [2]. Автор этих строк, – баптистский проповедник родом из СССР, с 2005 года живущий в США, Новочехов (Цюкало), претендует на аутентичность понимания Бога. Но он нам рассказал о той пропасти, которая разделяет Бога и человека. Значит, автор познал сущность Бога, перешагнул через пропасть? Но по его логике на это не может претендовать никто, кто «ниже» Бога! Как он вообще может рассуждать о сущности и существовании Бога, будучи человеком – «сибирским валенком»? Одно из двух: либо автор человек, и тогда он (по его же «доводам») не имеет права писать и рассуждать о Боге и даже судить о его существовании, либо автор равен или, страшно сказать, выше Бога, и тогда он нисходит к нам, «сибирским валенкам», чтобы объяснить (хотя это, по его мнению, абсолютно невозможно) свою божественную парадоксальную сущность. Практически все теологические писания и всевозможные онтологические, гносеологические и логические доказательства бытия Бога

от Тертуллиана до наших дней заполнены подобными алогичными рассуждениями. Воистину «Верую, ибо абсурдно»!

Вера и аскеза – путь в пещеру, а не к человеческой целенаправленной и целесообразной деятельности. Идеал-цель науки – объективная истина. Идеал-цель веры – Бог, как его представляет человек. Поэтому напрасны были усилия Фомы Аквинского (1226–1274) и его contemporaries последователей – неотомистов примирить веру и науку.

Эпоха Возрождения в Европе была вызвана новым революционным скачком в производительности труда, связанным со многими техническими изобретениями и технологическими новшествами. Среди первых следует назвать изобретение в XIII веке в Европе новой плавающей печи – «штукофена». Топились такие печи углем, добыча которого развернулась в это время. Внедрение штукофена позволило обрабатывать более тугоплавкие руды и получать не только чугун и ковкое железо, но и сталь. В свою очередь, без стали невозможен был подъем промышленного производства в Новое время.

Большую роль в становлении капиталистического производства сыграло расширяющееся использование новой формы организации труда – мануфактуры – пооперационного разделения труда при изготовлении определенного изделия. Такая технология позволила существенно увеличить производительность труда даже при использовании старой техники. Вместе с тем мануфактура требовала перехода от ремесленного производства к цеховому, объединявшему специалистов различных направлений деятельности. Всё это создавало предпосылки становления промышленного производства и стимулировало совместное использование двигателя (в эпоху крупного промышленного производства – паровых машин).

Нельзя не отметить и изобретение в XV веке книгопечатания, которое позволило значительно ускорить распространение новой технической и социальной информации и также приближало новую промышленную и социальную революцию.

Еще одним новшеством, подготовившим закат феодализма в Европе, было вторичное (после древнего Китая) изобретение в XIV веке немецким монахом-алхимиком Бертольдом Шварцем пороха. Изобретение привело к созданию и использованию в военных конфликтах огнестрельного оружия, прежде всего пушек. В результате сильные и богатые государства захватили и присоединили слабые. Создание больших государств уничтожало феодальную раздробленность, что вкупе с названной выше новой техникой и технологией привело к переходу основного материального производства в города. Так зарождался новый способ производства – капитализм.

Эпоха Возрождения в определенном смысле была возвратом к античному наследию, возврату к человеку, его миру и его интересам. Одновременно это было возрождением идеалов и норм преднауки – античной философии. А церковь неминуемо шла к реформации как единственному своему спасению...

В начале Нового времени Ф. Бэкон убедительно показал, что дедуктивный метод ведет науку к догматизму, постулирует генетическую первичность сущности над существованием. Новое знание можно получить только индуктивным методом, позволяющим обобщить данные эмпирического опыта. Эмпиризм Ф. Бэкона возвратил науку Нового времени к материалистическому мировоззрению, без которого, как показывает вся история становления науки, научное познание невозможно. Развивая индуктивный метод, Бэкон разработал успешно используемые до сих пор методы установления причин явлений.

Засилье объективного идеализма и упования на сверхъестественное было вытеснено растущим интересом к античному наследию, человеку и изучающим его наукам. Однако в науке Нового времени материалистический подход отнюдь не возобладал, как можно было ожидать. Причина опять в том, что субъективные детерминанты развития науки – идеалы и нормы – по-прежнему разрабатывались в философии, которая сохранила свою противоречивость и неоднозначность в силу неравномерности развития производственных отношений в разных странах Европы Нового времени. Провозглашенный Бэконом эмпиризм был поддержан и развит в передовой стране становящегося капитализма – Англии. Эмпирический подход и

индуктивный метод развивали англичане – ученик Бэкона Т. Гоббс (1588 – 1679) и Дж. Локк (1632 – 1704).

Вместе с тем их эмпиризм не избежал метафизических абсолютизаций. У Гоббса это выразилось в увлечении математическими (геометрическими) методами доказательства и в органической теории общества. Локк абсолютизировал роль чувственного познания, заявив, что в разуме есть только то, что до этого было в чувстве.

В противовес этому подходу Р. Декарт (1596–1650) – выдающийся французский философ, механик, физик, физиолог и математик – создатель аналитической геометрии и современной алгебраической символики возвращается в идеалах и нормах науки к Аристотелю, пытаясь доказать, что дедукция – единственный метод, ведущий ученого к истине. Индукция, по мнению Декарта, обобщая данные чувственных впечатлений, имеет своим итогом заблуждение, ибо чувство всегда обманывает человека. Философ выдвигает концепцию «врожденных идей», которые представляют собой чистые сущности и помещены в голову человека... Богом. При помощи интуиции человек извлекает врожденную идею из «шишковидной железы» и, дедуцируя, снисходит от высших сущностей к конкретному существованию. И об этом пишет ученый, все естественнонаучные концепции которого были получены путем обобщения данных множества экспериментов, а не при помощи интуиции! Воистину «на всякого мудреца довольно простоты»...

При всей внешней оригинальности гносеологии Декарта легко заметить параллель его методологии познания с теорией Платона, утверждавшего, что истину человек получает благодаря «припоминанию» бессмертной души о тех идеях-сущностях, с которыми она общалась, когда пребывала (равная среди равных) в мире идей. Рассуждая о методе познания и об основаниях обнаружения истины, Декарт выдвигает принцип «радикального сомнения» относительно достоверности любого суждения. Разъясняя этот принцип, Декарт пишет, что можно сомневаться в достоверности чего угодно, включая собственное существование. Но нельзя сомневаться в том, что ты сомневаешься. Нельзя мыслить, что ты не мыслишь. Следовательно, единственное, что не подпадает по сомнение – собственное мышление. Отсюда знаменитый вывод Декарта «*Cogito, ergo sum*» – мыслю, следовательно, существую. Поэтому самосознание выступает отправной точкой познания истины.

Однако с данной концепцией плохо согласуется выдвигаемый Декартом критерий истинности суждения. С его точки зрения истинное суждение обнаруживает себя как таковое, если оно ясно и очевидно по форме: «...никогда не принимать за истинное ничего, что я не познал бы таковым с очевидностью... включать в свои суждения только то, что представляется моему уму столь ясно и столь отчетливо, что не дает мне никакого повода подвергать их сомнению» [3]. Здесь критерием истинности выдвигается уже субъективная уверенность, основывающаяся на субъективной же ясности и очевидности. Но то, что одному будет ясно и очевидно, другим может представляться совершенно неясным. Так, в рассуждениях Декарта субъективный идеализм причудливо и противоречиво соединяется с объективным идеализмом в утверждении, что источником истинного знания являются врожденные идеи, заложенные в голову человека Богом. Однако такая концепция познания многим философам пришлась по душе, и рационализм, как антипод эмпиризму, находит свое признание и применение и в современной эпистемологии.

В Новое время методология рационализма развивалась в учениях Б. Спинозы, В. Лейбница и их последователей. Критическое отношение к рационализму не должно заслонять того обстоятельства, что он противостоял и продолжает противостоять иррационализму как откровенно антинаучному учению. Вместе с тем рационализм не стал ни идеалом, ни нормой, ни методом для классической науки Нового времени. Подтверждением этого тезиса являются работы И. Ньютона (1642–1727) – вершины классической науки нового времени. В главной своей работе «Математические начала натуральной философии» Ньютон указывает, что философскими постулатами, являющимися идеалами-нормами всего его учения, выступают следующие, сформулированные еще античными мыслителями положения:

1. Материя состоит из вечных, неизменных и абсолютно твердых частиц – атомов, не способных к самопроизвольному движению.

2. Время и пространство абсолютны, существуют сами по себе, независимо от всего материального, состоящего из атомов.

3. В мире нет ничего случайного и свободного. Абсолютная необходимость мира представлена законами механики.

4. Все сложное можно и должно свести к простому, простым причинам – из начал механики выводятся все законы природы [4].

Нетрудно заметить почти полное воспроизведение Ньютоном тех постулатов мировоззрения, которые выдвинул еще Демокрит. И это было бы возвращением к идеалам материализма, если бы не одно обстоятельство. Постулировав инертность материи, Ньютон не мог найти источника движения мира и возвратился к идее божественного первотолчка. Однако именно работы Ньютона подняли авторитет науки, возвысили ее над теологией. Упоминание о Боге как перводвигателе ничуть не умаляют значение материалистических норм и идеалов, введенных Ньютоном в науку. Ньютоновская механика стала эталоном, нормой для всего естествознания нового времени. Так Ампер разработал на этой мировоззренческой и методологической основе программу создания обобщающей теории электричества и магнетизма.

К середине XIX века новый этап развития европейского материального производства, вступившего в эпоху промышленной революции, детерминировал и становление нового периода развития научного познания. Изначально это было связано с очередным пересмотром идеалов и норм науки. Постулаты античной науки, составляющие основания классической науки Нового времени подверглись критическому пересмотру, прежде всего в философии позитивизма.

Родоначальник позитивизма О. Конт (1798–1857) пересмотрел не только историю науки, но и историю общества. Эволюция общества с его точки зрения детерминируется развитием познавательной деятельности, насчитывающей три этапа.

На первом этапе этого развития – теологическом – человечество довольствуется верой в сверхъестественные причины всех явлений.

Второй этап – метафизический (философский) – связан со стремлением избавиться от сверхъестественного путем введения представлений о всеобщих сущностях мира, которые и порождают все чувственно воспринимаемые явления. Но к науке и к истине такое мировоззрение не имеет никакого отношения.

Третий этап – позитивный – характеризуется отказом от погони за фантомами всеобщего и переходом к положительной науке, отыскивающей единичные причины единичных следствий.

Негативное отношение к философии, как «отжившей» форме мировоззрения и познания, было выражено Контом в девизе «Наука – сама себе философия». Эта формула, пришедшая по душе многим ученым-естественникам XIX и XX веков, используется и поныне.

Наиболее лаконично идеалы, предлагаемые позитивизмом науке, можно представить следующим списком норм-установок:

1) номинализм – идеалом-целью науки должно стать познание конкретно-единичного. Общее существует лишь в человеческом уме;

2) эмпиризм – источником знания могут быть только данные чувственного опыта;

3) феноменологизм – познанию доступны лишь явления – факты и их описание, но не причины;

4) антиномологизм – объективных закономерностей нет – наука может познавать только единичные факты, а не их закономерную связь (вытекает из 1, 2 и 3).

Названные принципы вступили в противоречие с открытиями физики конца XIX – начала XX столетий. Первым из них было открытие Джозефом Томсоном (1856–1940) в 1897 году электрона.

Первая элементарная частица была принципиально не наблюдаема, не поддавалась описанию в нормах классической физики и даже не имела массы покоя. И хотя последняя характеристика была дана электрону ошибочно, но первых хватало, чтобы утвердился в мысли, что электрон не материален. В этом убедил научное сообщество другой выдающийся физик рубежа XIX – XX веков – А. Пуанкаре (1854–1912). Он показал, что в силу того, что электрон может быть описан только математическими уравнениями, но не непосредственным наблюдением, эта элементарная частица не объективная реальность, а результат соглашения, конвенции (как и сами уравнения) между учеными-специалистами. Конвенционализм Пуанкаре был основанием глубокого кризиса физики начала XX века. Многие физики прекращали научную деятельность из-за ложного сознания того, что все, что они исследуют, есть лишь «фантомы ума», а не объективная реальность. Отец квантовой механики – Вернер Гейзенберг (1901–1976) в своей работе «Физика и философия» отмечал, что основные выводы античной философии вполне корреспондировались и служили идеалами в развитии классической физики Ньютона [5, с. 40]. Но для физики микромира эти постулаты не годятся, как не годятся и позитивистские установки [5, с. 47]. Только возвращение к заложенным в XIX столетии Гегелем и Марксом идеалам и нормам материалистической диалектики позволило ученым XX века открыть многие тайны микромира [5, с. 129].

Интересно, что осуществлялось множество попыток описать электрон и другие элементарные частицы при помощи норм классической физики. Наиболее известной является планетарная модель атома Резерфорда, в которой атом изображен как солнечная система – с ядром, вокруг которого вращаются по разным орбитам электроны.

Мы не случайно начали рассмотрение идеалов и норм современной науки с физики. Именно физика уже с нового времени стала той «правофланговой» наукой, идеалы и нормы которой определяют развитие не только естествознания, но и гуманитарного знания. Смена периодов развития науки от классической к неклассической, и от неклассической к постнеклассической определялась также революционными открытиями физики. При этом нельзя забывать и тот отмеченный выше факт, что развитие науки в главном и основном детерминировано развитием материального производства.

Проблему детерминантов революционных изменений в науке поднял уже во второй половине XX века известный американский историк и философ науки Томас Кун (1922–1996). В работе «Структура научных революций» он выдвинул идею, что революция в конкретной науке есть смена ее парадигмы. Под парадигмой Кун понимал систему концептуальных схем, принципов, идеалов, норм, методов и правил, определяющих связность научных идей, направленность исследований и общую перспективу развития науки в определенный период. Научная революция происходит тогда, когда парадигма исчерпает свой эвристический и творческий потенциал. Важно подчеркнуть, что, являясь одним из ярких представителей постпозитивизма, Кун считал, что каждая наука развивается вполне самостоятельно и потому надо рассматривать эволюцию и революцию каждой конкретной науки, а не науки вообще. Поэтому ни материализм, ни диалектика не представляют для Куна, в отличие от В. Гейзенберга, идеалами и нормами для научного познания. В некотором противоречии со сказанным Кун находит те ценности, на которые должна ориентироваться всякая научная теория. Это – эмпирически подтвержденная истинность, логичность (непротиворечивость), возможность экстраполировать результаты на другие области знания и креативность (направленность на новые открытия) [6, с. 136–140]. Можно согласиться с этими постулатами с одной лишь оговоркой – в постнеклассической науке нельзя возвращаться к требованиям классической науки об эмпирическом подтверждении истинности теории.

Вместе с тем в философии науки XX века на гребне критики позитивистской трактовки научного познания появляются иррационалистические мотивы, которые представлены работами философов-постмодернистов. Наиболее видным представителем этой философской школы является австрийский и американский философ науки Пол Фейерабенд (1924–1994). Его основная работа по методологии науки названа достаточно красноречиво: «Против метода.

Очерк анархистской теории познания» В самом начале этого труда автор заявляет, что наука принципиально не отличается от религии и представляет собой, как и последняя, систему догматических суждений и методов, принятую на веру. Заявляя право на владение и распространение истины, наука антидемократична. Она принуждает к использованию ее методологии везде и всюду – от школьного образования, до решения бытовых проблем [7, С. 1–3].

Главный порок науки – монизм метода и истины. Утверждая это, Фейерабенд пытается доказать, что в познании следует использовать методологический плюрализм, означающий равноистинность всего многообразия используемых методов и получаемых результатов. Плюрализм демократичен – монизм авторитарен, утверждает философ, стремясь найти аргументы к своему методологическому кредо «всё дозволено, всё допустимо» [7, С. 30]. В познании нельзя допустить монизм метода, ибо в единстве мнений нуждается только церковь. Фейерабенд не замечает, что плюрализм в его же аргументах демонстрирует свою иррационалистическую и тем самым антинаучную сущность.

Видный представитель постпозитивизма Карл Поппер (1902 –1994) в работе «Логика и рост научного знания» в противовес Фейерабенду отнюдь не призывает изгнать науку из общества, отказаться от научной методологии. Напротив, он – рационалист и считает, что именно научные открытия детерминируют социальное развитие. Однако Поппер отвергает причинно-следственный анализ процессов объективного мира, считая, что принцип причинности следует удалить из научного познания как «метафизический» [8, С. 84]. Все дело в том, что философ отождествляет детерминизм с его демокрито-лапласовским вариантом.

Впадая в другую крайность – в индетерминизм, Поппер в работе «Открытое общество и его враги» пытается доказать, что в истории общества всё индетерминировано, случайно. Поэтому все гуманитарные науки несостоятельны, ибо пытаются разыскать закономерности там, где их нет. А следовательно, ни о каком идеале, нормах или методологии гуманитарного знания даже и говорить не приходится.

Подводя итог сказанному, можно резюмировать, что в системе идеалов и норм науки наблюдается историческая и содержательно-логическая преемственность. Общим основанием становления науки является развитие материального производства. Однако в науке новейшего времени, вступившей в середине XX века в эпоху научно-технической революции, наблюдается обратное движение – научные открытия начинают во всё более расширяющемся масштабе определять развитие материального и духовного производства. Кроме того, в неклассической и постнеклассической науке возрастает роль философских принципов и идей как методологических предпосылок в интерпретации полученных фактов.

Список используемых источников

1. Квинт Тертуллиан (160–220). – URL: <https://intencia.ru/Pages-print-179.html> (дата обращения: 08.03. 2020).
2. Что значит фраза: «Верую, потому что абсурдно»? – URL: <https://novochekhov.com/chto-znachit-fraza-veruju-potomu-что-абс> (дата обращения: 08.03.2020).
3. Декарт Р. Рассуждение о методе для руководства разума и отыскания истины в науках: соч. в 2 т. – М.: Мысль, 1989. – Т. 1. – С. 260.
4. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989. – 502 с.
5. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое: пер. с нем. – М.: Наука, 1989.
6. Кун Т. Структура научных революций. – М.: Наука, 1975.
7. Фейерабенд П. Против методологического принуждения. Очерк анархистской теории познания. – Б.: БГК им. И.А. Бодуэна де Куртенэ, 1998.
8. Поппер К. Логика и рост научного знания. Избранные работы. – М.: Прогресс, 1983.

Н.Н. Гусев,
доктор техн. наук, профессор;
А.О. Кучеренко

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОУСЛОВИЙ НА ХАРАКТЕР ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТАРТОВОЕ СООРУЖЕНИЕ ПРИ ПУСКЕ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Статья посвящена воздействию на стартовое сооружение отраженных акустических волн газодинамической струи двигателей ракет-носителей. Выдвинута гипотеза о том, что при низкой облачности происходит многократное отражение акустической волны двигателей ракет-носителей как от стартового сооружения, так и от нижней границы облаков над стартовым сооружением, при котором наблюдается явление интерференции волн. Рассмотрено влияние эффекта интерференции при оценке вибродинамических параметров несущих конструкций стартовых сооружений при функциональной вибродиагностике стартовых сооружений, а также анализе результатов контроля динамической составляющей напряженно-деформированного состояния конструкций стартового сооружения. На основе экспериментальных данных, полученных при пусках ракет-носителей, доказана прямая связь между метеорологическими условиями в районе стартового сооружения с динамическим откликом конструкций на воздействие на них газодинамической струи ракет-носителей при штатных пусках. Анализ экспериментальных данных показал, что газодинамические нагрузки на стартовое сооружение даже при штатном запуске ракеты-носителя могут отличаться от пуска к пуску в разы при определенном сочетании метеорологических условий в районе стартового сооружения. Доказано, что принятый в нормативных документах по проектированию строительных конструкций стартовых сооружений 5-6-кратный запас прочности при определенных метеорологических условиях может оказаться недостаточным для обеспечения их несущей способности. В статье представлены результаты экспериментов, подтверждающих возрастание пульсационной (динамической) составляющей напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты стартового сооружения при наличии интерференции в условиях низкой облачности при старте ракеты-носителя. Предложено расширить перечень особых нагрузок путем включения в них нагрузок, обусловленных метеорологическими условиями в районе стартового сооружения.

Ключевые слова: стартовое сооружение, воздействие газодинамических нагрузок, отраженные акустические волны, динамическое напряженно-деформированное состояние несущих конструкций, функциональная вибродиагностика, натурные эксперименты, техническое состояние несущих конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

Нагрузки, действующие на стартовое сооружение (СС), подразделяются на постоянные (собственный вес строительных конструкций) и временные (длительные, кратковременные и особые). Длительные и кратковременные представляют собой эксплуатационные нагрузки, особые – аварийные. В свою очередь, кратковременные нагрузки могут быть статическими (вес подвижного технологического оборудования, вес заправленной ракеты-носителя (РН), температурные и влажностные сезонные колебания, а также снеговые нагрузки) и динамическими (газодинамические нагрузки, нагрузки и воздействия при аварийном выключении двигателей, тепловое воздействие газовой струи и ветровые нагрузки). Особые нагрузки представлены только динамическими нагрузками (нагрузками, возникающими при взрыве на рассчитываемом СС, нагрузками, возникающими при аварийном взрыве на соседнем СС и сейсмическими нагрузками). В данной статье рассматривается преимущественно воздействие эксплуатационных газодинамических нагрузок на СС, хотя отдельные положения статьи распространяются и на воздействие на СС других динамических нагрузок, в том числе аварийных.

Нагрузка на несущие конструкции СС от газодинамической струи двигателей РН представляет собой довольно сложное сочетание ударных, акустических, температурных полей, а также полей пульсаций давления, распределенных по поверхностям СС [1]. Кроме того, при

взаимодействии струй с конструкциями СС возникают акустические процессы, относящиеся условно к типу эффектов Пауэрла или Гартмана [2, 3], которые связаны с колебаниями газа в полостях СС в результате воздействия обратной акустической или газодинамической связи, то есть с возникновением автоколебаний [4]. Сами эти процессы до конца не изучены. При проектировании СС нагрузки, воздействующие на СС, как правило, задаются в виде упрощенных аппроксимированных графиков зависимости общей тяги РН от времени, а различные ее особенности (ударные волны, акустическое давление, пульсации и т.д.) учитываются путем ведения обобщенных коэффициентов перегрузки. При таком представлении пусковой нагрузки не берется во внимание ряд ее существенных составляющих, и прежде всего случайные пульсации давления, например в пограничной зоне турбулентного потока. Известны попытки снятия этой проблемы с использованием результатов натурных измерений нестационарных давлений потоков струи стартующей РН путем сбора динамических нагрузок в виде равнодействующих сил случайных полей пульсаций давлений. Такой подход позволяет оценить с достаточной достоверностью частотную составляющую вибрационных нагрузок и возможность возникновения резонансных явлений в ходе запуска РН [1], однако не позволяет учесть всё многообразие и сложность физических процессов при старте РН. Полное описание взаимосвязи таких процессов в структуре комплексного воздействия на СС не представляется возможным. В этой связи исследования ведутся преимущественно по отдельным компонентам этого воздействия. Однако из поля зрения исследователей выпал существенный аспект акустического воздействия на СС – воздействие отраженных акустических волн.

В целях контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) строительных конструкций и грунтовых оснований СС на них были развернуты системы испытаний и длительного контроля (ИДК), включающие в себя геодезические, виброметрические и тензометрические комплекты [5]. Анализ результатов контроля, полученных с помощью систем ИДК, выявил устойчивую закономерность: при практически неизменных параметрах эксплуатационных газодинамических нагрузок РН реакция строительных конструкций на них может меняться от пуска к пуску в разы. В настоящей статье описаны закономерности возникновения данного эффекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

Авторами проанализированы материалы научно-исследовательских работ, выполненных по результатам натурных экспериментов, проведенных в процессе пусков РН «Протон К», в частности, результаты натурных экспериментов, в которых впервые фиксировались динамические напряжения в арматуре фундаментных плит СС объекта 548 в процессе запусков с них РН. Измерения проводились с 07 по 26 августа 1983 года и с 02 по 03 марта 1984 года в соответствии с техническим решением №548-24-27-82 от 19.10.1982.

На рис. 1 представлены схемы СС объекта 548 (РН «Протон»), на которых индексами «СИ» (системы измерений) обозначены точки установки первичных струнных преобразователей систем ИДК (арматурных динамометров типа АД-40).

В качестве вторичной аппаратуры использовалась экспериментальная установка СИДН (струнный измеритель динамических напряжений), разработанная в академии имени А.Ф. Можайского, со следующими параметрами. Параметры импульса возбуждения струнного преобразователя с плавной регулировкой:

- напряжение 135–165 В;
- длительность 0,25–1,00 мс;
- период следования 0,20–1,0 с.

Параметры струнных преобразователей АД-40:

- конструктивный зазор δ 0,4 мм;
- чувствительность 0,812 с·кН;
- предел измерения усилия 30000 кгс.

Условия проведения эксперимента:

- 11.08.1983 – безоблачно;
- 26.08.1983 – нижняя граница облаков до 120 м;
- 02.03.1984 – безоблачно;
- 06.03.1984 – безоблачно.

Ракета-носитель (РН) «Протон – К». Режим запуска – штатный.

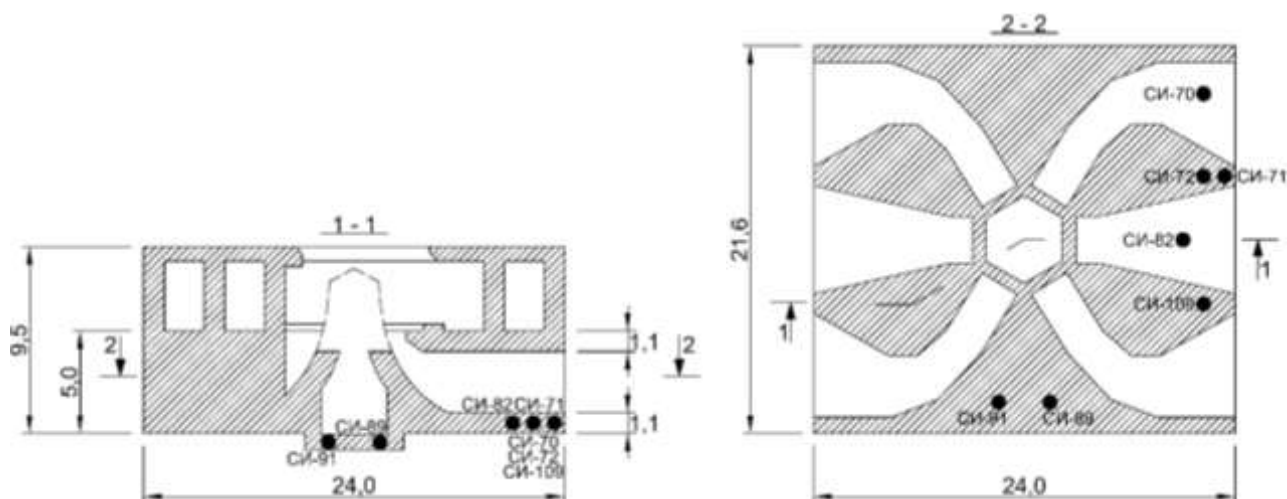


Рис. 1. Схема расположения первичных струнных преобразователей систем ИДК СС РН «Протон»

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

Полученные в ходе эксперимента зависимости напряжений σ , возникающих в конструкциях при пуске РН, от времени t – подготовки и пуска РН, представлены на рис. 2–5.

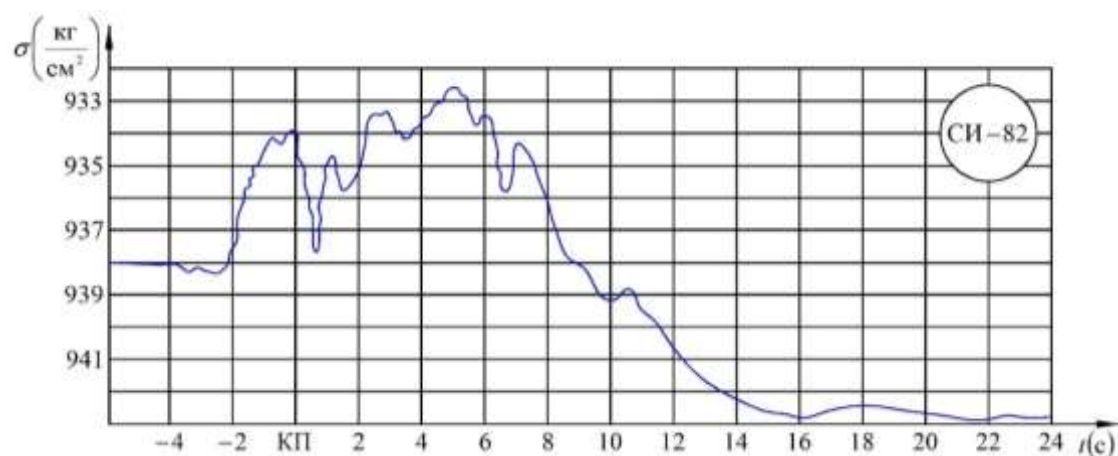


Рис. 2. График механических напряжений в арматуре фундаментной плиты при динамическом нагружении СС в условиях низкой облачности, СИ-82 26.08.1983

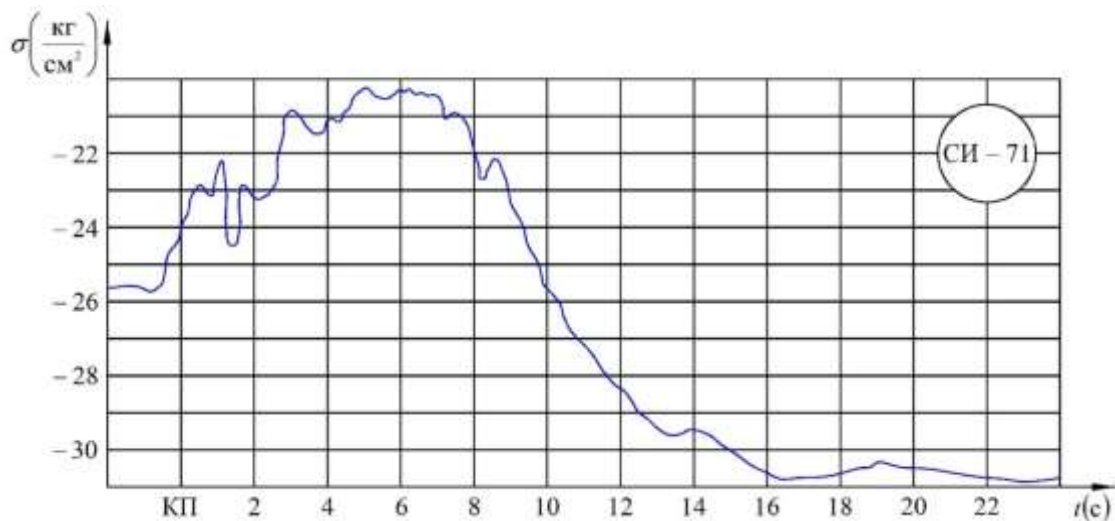


Рис. 3. График механических напряжений в арматуре фундаментной плиты при динамическом нагружении СС в условиях низкой облачности, СИ-71 26.08.1983



Рис. 4. График механических напряжений в арматуре фундаментной плиты при динамическом нагружении СС в условиях безоблачности, СИ-82 11.08.1983

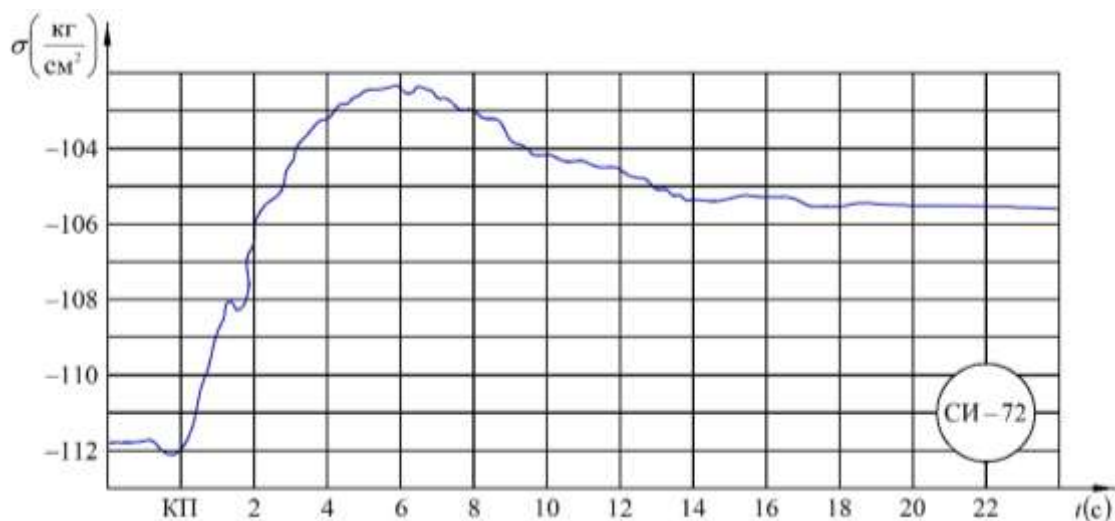


Рис. 5. График механических напряжений в арматуре фундаментной плиты при динамическом нагружении СС в условиях безоблачности, СИ-72 02.03.1984

Результаты эксперимента, представленные на рис. 2–5, позволяют сделать следующие выводы.

1. На графиках (см. рис. 2–5), полученных при низкой облачности, ярко выражены пульсации напряжений, которые в безоблачную погоду отсутствуют (см. рис. 4) или выражены крайне слабо (см. рис. 5).

2. Пульсации напряжений проявляются на интервале от -2 до 10 с, далее резко спадают, что соответствует циклограмме запуска РН (на 10 с полета РН начинается маневр по ориентации ее на требуемый азимут полета, и далее осуществляется программный разворот по тангажу).

3. Максимальное приращение напряжений на интервале от -2 до 10 с при низкой облачности в 2,0–2,3 раза выше (см. рис. 2 и 3), чем при безоблачной погоде (см. рис. 4 и 5).

Кроме того, в процессе экспериментов установлено, что вибрации строительных конструкций выносного заглубленного командного пункта (ЗКП), расположенного на расстоянии не менее 1000 м от СС, при низкой облачности ярко выражены, а при отсутствии облачности отсутствуют или выражены крайне слабо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента (см. рис. 2–5) позволяют выдвинуть гипотезу о том, что при низкой облачности происходит многократное отражение акустической волны двигателей РН как от СС, так и от нижней границы облаков над СС. Эффект отражения акустических волн на границе раздела двух сред, в том числе от облаков, хорошо изучен [6–10], при этом происходит явление интерференции волн, т.е. сложения их в пространстве, при котором в разных точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Этот эффект проявляется по-разному в зависимости от угла падения волн и физических свойств отражающих поверхностей. Известно, что избыточное давление отраженной волны может быть в разы выше давления входящей волны [11]. Кроме того, давно установлено, что акустическая волна способна преодолевать расстояния в сотни километров, в зависимости от метеорологических условий [10, 11].

Полученные выводы имеют принципиальное значение при оценке вибродинамических параметров несущих конструкций СС при функциональной вибродиагностике СС, а также при анализе результатов контроля динамической составляющей НДС конструкций СС. Функциональная вибродиагностика подразумевает, что параметры воздействия газовой струи РН на СС от пуска к пуску лежат в некоем фиксированном диапазоне, который соответствует данному типу РН, и принимается при расчете конструкций. Однако результаты исследований показали, что пульсации результирующего давления на СС, даже при штатной работе двигателей РН, могут отличаться в разы от пуска к пуску.

Следовательно, можно сделать следующие выводы:

1) нагрузки на СС, даже при штатном запуске РН, могут существенно отличаться от пуска к пуску. Если принять во внимание, что пульсационная составляющая газодинамической нагрузки составляет 10–15%, то увеличение ее значения при интерференции в разы не может игнорироваться при динамических расчетах;

2) принятый при проектировании строительных конструкций СС 5-6-кратный запас прочности при определенных метеорологических условиях может оказаться недостаточным для обеспечения их несущей способности;

3) известное обрушение строительных конструкций СС при штатном пуске РН «Протон» на объекте 548 в 1970-х годах требует переосмысления причин, вызвавших потерю этими конструкциями несущей способности;

4) необходимо расширить перечень особых нагрузок путем включения в них нагрузок, обусловленных особым сочетанием метеорологических условий в районе СС.

Таким образом, доказана прямая связь между метеорологическими условиями в районе СС и динамическим откликом конструкций на воздействие на них газодинамической струи РН при их штатных пусках.

Список используемых источников

1. Попов В.А., Гула Д.Н. К вопросу определения расчетных характеристик равнодействующих сил полей пульсаций газодинамических давлений, воздействующих на конструкции стартовых сооружений // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – №9, ч. 3. – С. 506–510.
2. Бочарова О.В., Лебедев М.Г. Автоколебательные режимы взаимодействия сверхзвуковых перерасширенных струй с преградами // *Химическая физика*. – 2011. – №7. – С. 40–47.
3. Acoustic heating effects in Hartmann whistle / S. Narayanan, Bholanath Behera, T. Sundararajan, K. Srinivasan // *Multi-Science Publishing Co. Ltd. In.* – 2013. – Vol. 12. – P. 557–578. – Doi:10.1260/1475-472X.12.5-6.557.
4. Газодинамика стартовых комплексов / Г.П. Бирюков, А.Б. Бут, В.А. Хотулёв, А.С. Фадеев. – М.: Рестарт, 2012. – 364 с.
5. Гусев Н.Н., Кучеренко А.О. Адаптация систем испытаний и долговременного контроля к условиям аварийных ситуаций на стартовых сооружениях наземной космической инфраструктуры // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. – 2018. – Вып. 663. – С. 71–75.
6. Перельман Я.И. *Занимательная физика*. – М.: Издательский дом Мещерякова, 2016. – 448 с.
7. Карзова М.М. Нелинейные эффекты при отражении и фокусировке разрывных акустических волн в задачах атмосферной и медицинской акустики: автореф. дис. канд. физ. мат. наук: 01.04.06 / Карзова Мария Михайловна; МГУ имени М.В. Ломоносова. – М., 2016. – 123 с.
8. Сарапулова В.В. Особенности преломления и отражения звука на границе раздела однофазной и двухфазной систем: автореф. дис. канд. физ. мат. наук: 01.02.05 / Сарапулова Вероника Владимировна; Башкирский государственный университет. – Бирск, 2014. – 102 с.
9. Шагапов В.Ш., Сарапулова В.В. Особенности преломления звука в атмосфере при тумане // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. – 2014. – №6. – С. 683–691.
10. Красенко Н.П. Приземное распространение звуковых волн в атмосфере // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2013. – №2. – С. 86–94.
11. Суслов Б.Н. *Звук и слух*. – М. – Л.: Гостехиздат, 1948. – 47 с.

Б.Д. Казахов,
доктор военных наук, профессор;
Д.М. Попов,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА МАНЕВРЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ ТАКТИЧЕСКОГО ВОИНСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ

Рассматривается методика обоснования рационального способа маневренных действий тактического воинского формирования. Описан порядок ее реализации, а также ее основные возможности на примере выбора рационального варианта маневренных действий, выполняемых в ходе формирования замысла применения тактического воинского формирования.

Ключевые слова: маневренные действия, оценивание эффективности, тактические воинские формирования, выбор рационального способа.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ опыта современных войн и вооруженных конфликтов [1], результатов оперативной и боевой подготовки войск свидетельствует, что успешность применения тактических воинских формирований (ТВФ), таких как соединения, воинские части и подразделения, при выполнении ими задач по предназначению во многом обусловлена их возможностью своевременно и в полном объеме осуществлять маневр в целях занятия выгодного положения, сосредоточения требуемого количества сил и средств в необходимом районе (рубеже, позиции) или вывода подразделений из-под возможных ударов противника.

Значимость маневра в боевой деятельности ТВФ определяет потребность в наличии методического аппарата, позволяющего с должной степенью детализации и адекватности формализованно описывать данную функцию и прогнозировать ее итоги, а также способствующего выработке обоснованных рекомендаций по ее совершенствованию. Вместе с тем общепринятые в настоящее время подходы к оцениванию маневренных возможностей ТВФ не в полном объеме удовлетворяют означенную потребность соответствующих специалистов и требуют существенной корректировки. Для большей убедительности, подтверждающей эту мысль авторов, приведем довод, что применяемые методики оценивания эффективности маневренных действий ТВФ, осуществляемые в ходе применения, как правило, не учитывают разнородность сил, представленных в современных тактических формированиях (в том числе временной структуры), и различную сущность решаемых ими задач.

Указанные выше обстоятельства обуславливают актуальность решения научной задачи, заключающейся в усовершенствовании методических подходов оценивания итогов реализации воинскими формированиями тактического уровня функции маневра.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА МАНЕВРЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ ТАКТИЧЕСКОГО ВОИНСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ

В формализованном виде задача определения рационального способа маневренных действий ТВФ может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} F(x) \rightarrow \max, & x \in M_x; \\ C(x) \leq C_{\text{доп}}, & x \in M_x, \end{cases} \quad (1)$$

где x – вектор параметров реализуемого способа маневренных действий;
 M_x – множество способов маневренных действий;
 $F(x)$ – показатель эффективности маневренных действий;
 $C(x)$ – затраты ресурсов на реализацию способа маневренных действий;
 $C_{\text{доп}}$ – допустимые затраты ресурсов на реализацию маневренных действий.

Одним из возможных подходов к решению задачи (1) является использование метода декомпозиции. Реализация указанного подхода предполагает введение частных показателей эффективности маневренных действий, выбора из полученного множества основного (целевого) показателя и ограничений.

В качестве основного (целевого) показателя предлагается использовать коэффициент тактической готовности ТВФ – $K T_{\text{ТГ ТВФ}}$. Он отражает степень готовности ТВФ к применению по завершению маневренных действий. В качестве показателей ограничений предлагается рассматривать ряд ресурсных ограничений – допустимое время на выполнение маневренных действий и заданный (требуемый) уровень (коэффициент) тактической готовности ТВФ после завершения маневренных действий. Для расчета основного (целевого) показателя была проведена разработка методики оценивания эффективности маневренных действий ТВФ.

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАНЕВРЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ ТАКТИЧЕСКИМИ ВОИНСКИМИ ФОРМИРОВАНИЯМИ

Предлагаемая методика учитывает сущность анализируемой предметной области (подготовки и осуществления маневра), отраженную в нормативной и энциклопедической литературе [2–4] и нацелена на расчет основного (целевого) показателя, характеризующего тактическую готовность перечисленных ранее функциональных элементов к решению возложенных на них задач по мере завершения маневра. Структурная схема методики изображена на рис. 1.

На первом этапе реализации методики осуществляется ввод множества исходных данных по всем ФУ в составе ТВФ. Таковыми являются:

$K_{\text{ТВ ФЭ } i}$ – коэффициент тактической важности i -го ФЭ;
 $K T_{\text{ТГ ФЭ } i \text{ тр}}^{\text{нд}}$ – требуемое значение коэффициента тактической готовности i -го ФЭ;
 $T_{\text{ТГ ФЭ } i}^{\text{расп}}$ – располагаемое время на совершение маневра i -м ФЭ;
 $T_{\text{ФЭ } i}^{\text{пп}}$ – время перевода i -го ФЭ в походное положение;
 $T_{\text{ФЭ } i}^{\text{бп}}$ – время перевода i -го ФЭ в боевое положение;
 $S_{\text{ФЭ } i}^{\text{дв}}$ – протяженность марша i -го ФЭ по избранному маршруту передвижения;
 $V_{\text{ФЭ } i}^{\text{дв}}$ – средняя скорость марша i -го ФЭ по избранному маршруту передвижения;
 $t_{\text{кy } i}$ – продолжительность выполнения работ по организации маневра i -го ФЭ (при их расположении на критическом сетевом пути);

$K_{\text{ТВ ФЭ } i}$ – тактическая важность i -го ФЭ, определяемая множеством решаемых задач в конкретных условиях применения.

На втором этапе реализации методики осуществляется расчет количественных значений показателей, характеризующих маневренные возможности i -го ФЭ.

В блоках 1 и 2 производится расчет значения времени, затрачиваемого на организацию маневра i -го ФЭ при наиболее оптимистической ($\min T_{\text{ТГ ФЭ } i}^{\text{орг}}$) и пессимистической ($\max T_{\text{ТГ ФЭ } i}^{\text{орг}}$) оценке работы должностных лиц ПУ.

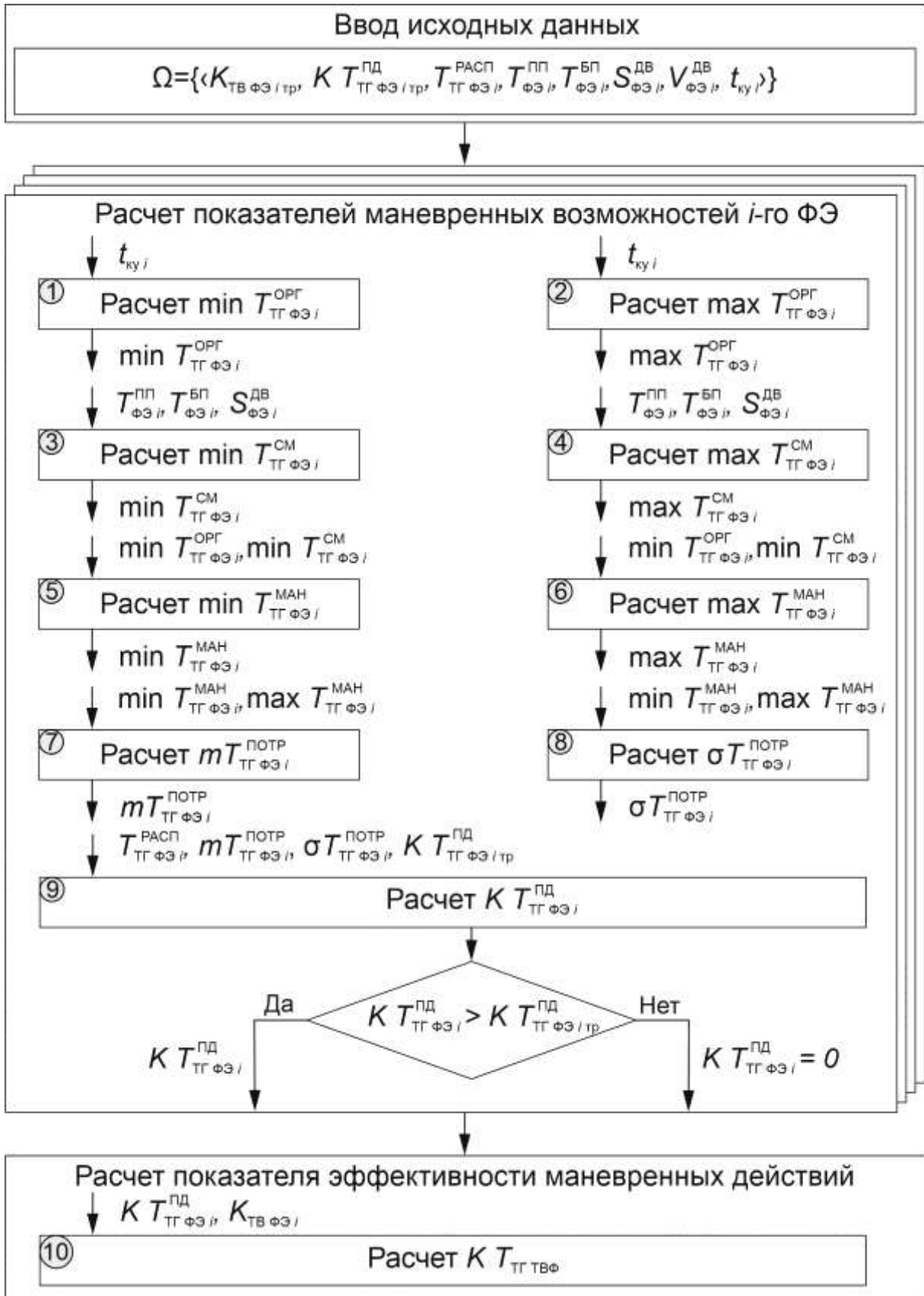


Рис. 1. Методика оценивания эффективности маневренных действий тактическими воинскими формированиями

Расчет значений показателей $\min T_{ТГ\PhiЭ i}^{орг}$ и $\max T_{ТГ\PhiЭ i}^{орг}$ осуществляется методом сетевого планирования. При этом составляются сетевые графики работы должностных лиц пунктов управления, в которых определяются порядок, последовательность и продолжительность выполнения ими отдельных (k -х) работ (t_k) в ходе организации маневра. Затем на основе анализа полученных сетевых графиков из всего перечня k -х работ определяются те работы, которые лежат на критическом пути (y -е работы), а их продолжительность ($t_{k\gamma i}$) является исходными данными для расчета сроков, затрачиваемых на организацию маневра i -го ФЭ при наиболее оптимистической и пессимистической оценке работы должностных лиц пункта управления.

В блоках 3 и 4 производится расчет количественных значений временных интервалов, необходимых для совершения марша i -м ФЭ при оптимистическом ($\min T_{ТГ\PhiЭ i}^{см}$) и пессимистическом ($\max T_{ТГ\PhiЭ i}^{сб}$) прогнозе соответственно. Продолжительность совершения маневра определенного ФЭ, в ходе которого предусматривается смена позиционных районов (стартовых позиций, районов развертывания), зависит от времени его свертывания, перемещения и развертывания в новом районе. При этом анализ результатов статистической обработки результатов войсковых учений, в ходе которых отрабатывались маневренные действия, увеличение сроков перевода ФЭ тактических формирований в походное и боевое состояние, в зависимости от условий обстановки, может составить от 30 до 70% от их нормативных значений.

Ввиду указанных обстоятельств, авторами предлагается осуществлять расчет значений показателей $\min T_{ТГ\PhiЭ i}^{см}$ и $\max T_{ТГ\PhiЭ i}^{сб}$ в соответствии с выражениями:

$$\min T_{ТГ\PhiЭ i}^{см} = 1,3 \cdot (T_{\PhiЭ i}^{пп} + T_{\PhiЭ i}^{бп}) + T_{\PhiЭ i}^{дв}, \quad (2)$$

$$\max T_{ТГ\PhiЭ i}^{сб} = 1,7 \cdot (T_{\PhiЭ i}^{пп} + T_{\PhiЭ i}^{бп}) + T_{\PhiЭ i}^{дв}, \quad (3)$$

где $T_{\PhiЭ i}^{пп}$ – нормативное значение времени перевода i -го ФЭ в походное положение перед перемещением в ходе маневра;
 $T_{\PhiЭ i}^{бп}$ – нормативное значение времени перевода i -го ФЭ в боевое положение по завершении перемещения в ходе маневра;
 $T_{\PhiЭ i}^{дв}$ – время, затрачиваемое i -м ФЭ на движение в ходе маневра, определяемое исходя из протяженности перемещения ($S_{\PhiЭ i}^{дв}$) и средней скорости перемещения ФЭ в соответствии с условиями рельефа местности ($V_{\PhiЭ i}^{дв}$).

В блоках 5 и 6 производится расчет количественных значений временных интервалов, необходимых для совершения маневра i -м ФЭ при наиболее благоприятных ($\min T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман}$) и неблагоприятных ($\max T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман}$) условиях соответственно. Расчет значений показателей $\min T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман}$ и $\max T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман}$ выполняется в соответствии с выражениями:

$$\min T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман} = \min T_{ТГ\PhiЭ i}^{орг} + \min T_{ТГ\PhiЭ i}^{см}, \quad (4)$$

$$\max T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман} = \max T_{ТГ\PhiЭ i}^{орг} + \max T_{ТГ\PhiЭ i}^{см}. \quad (5)$$

В блоке 7 производится расчет математического ожидания временного интервала ($mT_{ТГ\PhiЭ i}^{потр}$), потребного i -му ФЭ для выполнения маневра. В соответствии с [5, 6] для определения величины $mT_{ТГ\PhiЭ i}^{потр}$ воспользуемся выражением

$$mT_{ТГ\PhiЭ i}^{потр} = \frac{(3 \cdot \min T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман} + 2 \cdot \max T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман})}{5}. \quad (6)$$

В блоке 8 производится расчет величины среднеквадратического отклонения времени ($\sigma T_{ТГ\PhiЭ i}^{потр}$), потребного i -му ФЭ для выполнения маневра. В соответствии с [7, 8] для определения величины $mT_{ТГ\PhiЭ i}^{потр}$ воспользуемся выражением

$$\sigma T_{ТГ\PhiЭ i}^{потр} = \sqrt{\left(\frac{\max T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман} - \min T_{ТГ\PhiЭ i}^{ман}}{5}\right)^2}. \quad (7)$$

В блоке 9 производится расчет показателя ($K T_{ТГ ФЭ i}^{пд}$), характеризующего тактическую готовность i -го ФЭ к решению возложенных на них задач по мере завершения маневра. Расчет производится в соответствии с выражением

$$K T_{ТГ ФЭ i}^{пд} = \Phi^*(x) \left(\frac{T_{ТГ ФЭ i}^{расп} - m T_{ТГ ФЭ i}^{потр}}{\sigma T_{ТГ ФЭ i}^{потр}} \right), \quad (8)$$

где $\Phi^*(x)$ – функция стандартного нормального закона распределения при аргументе, выраженном среднеквадратическим отклонением.

Далее производится сравнение полученной величины показателя $K T_{ТГ ФЭ i}^{пд}$ с требуемым (заданным) его значением ($K T_{ТГ ФЭ i тр}^{пд}$) и расчет значения общего (целевого) показателя $K T_{ТГ ФЭ}^{пд}$. В случае, если полученное значение показателя $K T_{ТГ ФЭ i}^{пд}$ больше или равно требуемому значению данного показателя ($K T_{ТГ ФЭ i тр}^{пд}$), то данный ФЭ учитывается в составе тактического воинского формирования с признаком «тактически готов». В противном случае учет не производится и ФЭ исключается из состава тактического воинского формирования с признаком «тактически не готов» (т.е. показатель $K T_{ТГ ФЭ i}^{пд}$ принимает значение, равное нулю).

Реализация второго этапа методики осуществляется для всех ФЭ в составе ТВФ.

На заключительном этапе методики, в блоке 10, производится расчет значения общего (целевого) показателя коэффициента тактической готовности воинского формирования ($K T_{ТГ ТВФ}$) в соответствии с выражением

$$K T_{ТГ ТВФ} = \frac{\sum_{i=1}^I K T_{ТГ ФЭ i}^{пд} \cdot K_{ТВ ФЭ i}}{\sum_{i=1}^I K_{ТВ ФЭ i}}, \quad (9)$$

где $K_{ТВ ФЭ i}$ – коэффициент тактической важности i -го ФЭ.

Таким образом, рассчитав значение общего (целевого) показателя коэффициента тактической готовности воинского формирования ($K T_{ТГ ТВФ}$), производим оценивание маневренных возможностей ТВФ при выбранном способе маневренных действий.

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА МАНЕВРЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ ТАКТИЧЕСКОГО ВОИНСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ

Используя в качестве основы методику оценивания эффективности маневренных действий, предлагаемая методика обоснования рационального способа маневренных действий позволяет осуществить оценку значений основного (целевого) показателя маневренных действий и осуществить выбор способов, удовлетворяющих заданному критерию. Структурная схема методики обоснования рационального способа маневренных действий ТВФ представлена на рис. 2.

Исходными данными для реализации методики являются данные, аналогичные методике оценивания эффективности маневренных действий ТВФ. Значение $K T_{ТГ ТВФ max}$ принимается равным нулю. Далее с помощью методики оценивания эффективности маневренных действий ТВФ производится расчет значения. Полученное значение основного (целевого) показателя эффективности маневренных действий ТВФ при реализации j -го способа – $T_{ТГ ТВФ j}$ сравнивается с текущим значением $K T_{ТГ ТВФ max}$. Если $K T_{ТГ ТВФ j} > K T_{ТГ ТВФ max}$, то текущий способ маневренных действий отбирается для реализации, в противном случае текущий способ подлежит корректировке и дальнейшей оценке. $K T_{ТГ ТВФ max}$ принимает значение, равное $K T_{ТГ ТВФ j}$. Выполняются дальнейшие последовательные итерации методики для каждого j -го сформированного способа маневренных действий.

Если при последующих итерациях текущее значение $K T_{ТГ\ ТВФ\ j}$ окажется больше, чем текущее значение $K T_{ТГ\ ТВФ\ max}$, то вместе с ранее описанными процедурами происходит замена отобранного ранее способа маневренных действий на текущий. Ранее отобранный способ подлежит дальнейшей корректировке и оценке. Реализация методики осуществляется до полного перебора всех сформированных способов маневренных действий.

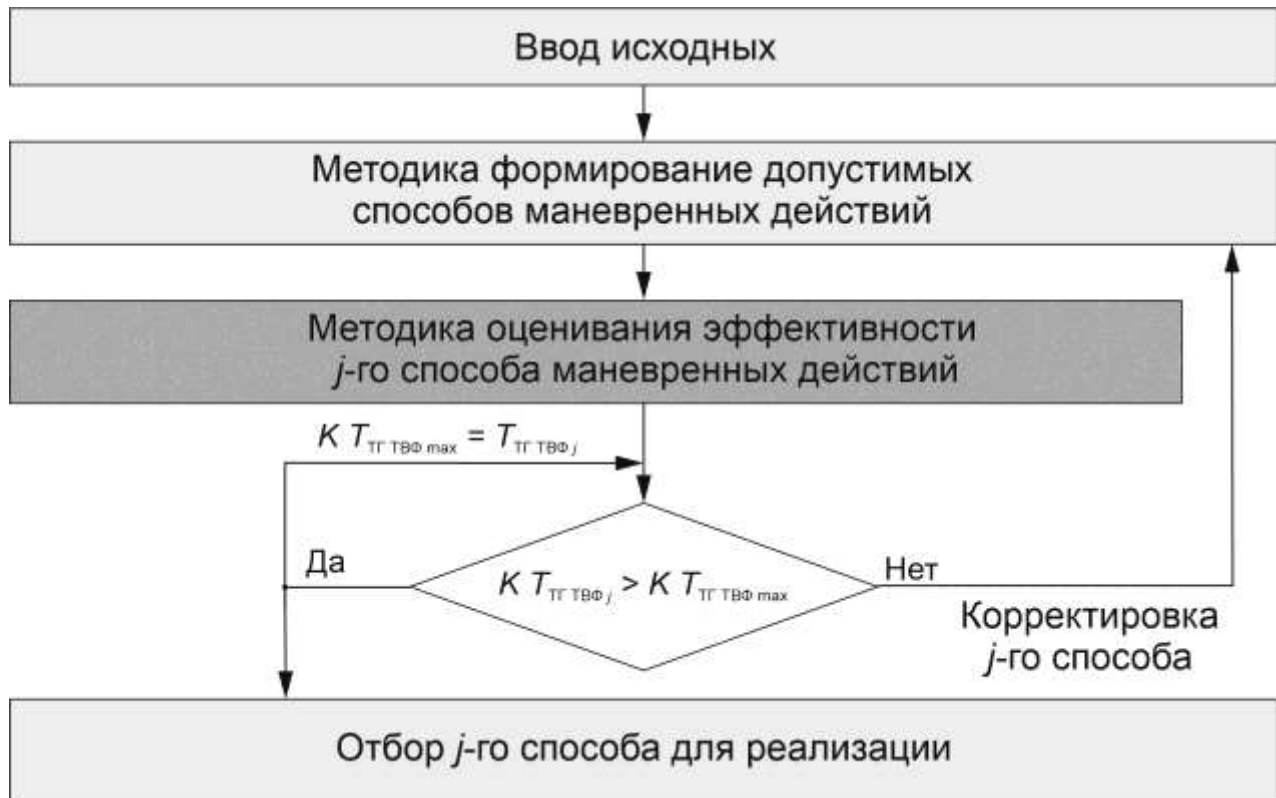


Рис. 2. Методика обоснования рационального способа маневренных действия тактического воинского формирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей статье приводится решение научной задачи, связанной с нахождением рациональных способов применения ТВФ, в частности, с определением рационального способа маневренных действий. Разработанный научно-методический аппарат оценивания эффективности маневренных действий ТВФ позволяет произвести оценку основного (целевого) показателя эффективности маневренных действий. Введенный в ходе разработки методики показатель $K T_{ТГ\ ТВФ}$ отражает степень готовности ТВФ к применению по завершении маневренных действий.

Разработанная методика является основой методического аппарата оценивания эффективности применения ТВФ и в отличие от существующих в настоящее время обеспечивает:

- учет ряда значительных особенностей применения ТВФ при осуществлении маневренных действий;
- позволяет с большой адекватностью оценить результаты функционирования сложной системы «тактическое воинское формирование» применительно к современным условиям применения.

Использование предлагаемой методики на этапе планирования применения ТВФ позволит повысить оперативность управления и обоснованность принимаемых решений.

Список используемых источников

1. Военное искусство в локальных войнах и вооруженных конфликтах. Вторая половина XX – начало XXI века: учебник / А.С. Рукшин, А.В. Усиков, А.Д. Борщов и др. – М.: ВИ, 2008. – 764 с.
2. Военная энциклопедия. – М.: Воениздат, 2004. – Т. 6. – 579 с.
3. Военный энциклопедический словарь. – М.: Воениздат, 2007. – 832 с.
4. Краткий словарь оперативно-стратегических терминов. – М.: ВА ГШ ВС РФ, 2006. – 520 с.
5. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии: военно-теоретический труд / А.А. Бобриков, Б.А. Авотынь, Е.Г. Анисимов и др. – СПб.: Галлея Принт, 2006. – 424 с.
6. Справочник офицера ВВС и войск ПВО / И.П. Азаренок, А.В. Афанасьев, Е.Ф. Бондарович и др. – Минск: Центр военных исследований и информатизации (Командования ВВС и войск ПВО) ВА РБ, 2010. – 512 с.
7. *Вентцель Е.С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
8. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.

Vorotyagin V.N., Goncharov A.M., Pavlov A.N. Methodology for estimating structural-technological life of on-board systems of small space vehicles using the operation of differentiating hypergraph systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 7–17.

The results of numerical-structural modeling and experimental studies are presented. The article proposes a methodological approach. Based on a hypergraphic formal representation of the technological operations of controlling small spacecraft, in which ribs connect the functional elements of the on-board system that are part of a given control process. Using the operation of differentiating a hypergraph to construct its derivative, a fuzzy graph of technological independence of the functional elements of the on-board system is formed, which made it possible to introduce indicators of structural and technological survivability of both functional elements and the entire on-board system of a small spacecraft. The analysis of the criticality of the influence of functional elements on the on-board system of small spacecraft for remote sensing of the Earth during the implementation of technological modes of orientation of the spacecraft in the conditions of emergency flight situations is carried out.

Key words: hypergraph derivative, technological modes of orientation, structural and technological survivability.

Goncharov A.M., Samoylov E. B., Shmelev V.V. Synthesis of the optimum program of classification of telemetered parameters on reliability at identification of onboard systems of the missile and space equipment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 18–35.

The problem of definition of the semantic contents of telemetric data of onboard systems of objects of supervision of the telemetric information received by national technical means of control is considered. The set from 29 classification signs with applied justification of components is offered. For classification, the consecutive conditional determined recognition method adapted for feature of the solved task is used; use of reliability of the received result of classification as the optimized indicator is offered. The example is given.

Key words: space-rocket equipment, telemetric information, reliability of identification of telemetered parameters, dynamic programming.

Kalyuzhnyy A.V., Timofeev V.V. Methodology for solving the problem of optimal redundancy in computer complexes of military-automated system using the reliability indicator of a non-restorable system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 36–41.

An approach is proposed to simplify the objective function for solving the problems of optimal reservation of reconstructed computer systems, which allows to reduce the amount of computation in the problems of optimal backup of restored systems by using the reliability of an unrecoverable system as an objective function. This makes it possible to obtain analytical expressions for objective functions in most practical problems of optimal reservation, which is especially important for dynamically tunable computer systems operating in real time.

Key words: computer complex, optimal reservation task, simplification of the objective function, reliability.

Astakhov E.N., Kosyakov E.N. Operational channel redundancy as a dealing means with congestion of communication directions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 42–47.

There are scientific and technical solutions to combat communication directions congestion by means of operational channel redundancy in the paper. It helps to provide high-speed satellite communication system subscribers the necessary set of telecommunications services.

Key words: central earth station, subscriber earth station, satellite relay complex, frequency and energy resource, high-speed satellite communication system, traffic.

Afonin G.I., Koshkarov A.S., Maltsev G.N. Adaptive correction of atmospheric phase distortions using orthogonal transformations of the wavefront sensor measurements // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 48–60.

An algorithm of orthogonal transformations of wavefront measurements by a gamma-type sensor in phase-mixed systems of adaptive optics is considered, which allows restoring the phase by the phase gradient measured by the wavefront sensor in one calculation iteration. Corrective action, post-solder to the wavefront corrector of the zonal type, is formed as a sum of modal components, described by the orthogonal polynomials of Zernike. The results of the study of the accuracy of adaptive correction of atmospheric phase distortions in orthogonal transformations of the wavefront sensor measurements are presented, depending on the number of wavefront corrector subapertures and the number of Zernike polynomials taken into account during orthogonal transformations. The importance of a joint choice of adaptive optics system pair-meters and the transformations performed, on which the components of the residual error depend, is shown. adaptive phase correction.

Key words: adaptive optics, atmospheric phase distortions, phase recovery by measured radient, zone and modal correction.

Bakurskii K.V., Myslivtsev T.O., Nikiforov S.V. Use of the VLF radio technical systems for transmission of frequency-time information // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 61–67.

The proposals on the reservation of channels for bringing time-frequency information in the very-long-wave range due to the use of the resource of long-range radio-technical systems are substantiated. Proposed a method for the formation, digitization and transmission of time stamps in the signal structure RSDN-20 Alpha. The potential accuracy of the synchronization of the consumer timeline in this way is given.

Key words: time stamp, time scale, long-range navigation system, time era.

Burlakov S.O., Smirnov A.A., Tsvetkov K.U. Scientific and technical proposals for the implementation of the method of distribution of the frequency-energy resource of earth stations and on-board radio-technical complexes of high-speed satellite communication systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 68–78.

There are scientific and technical suggestions for the implementation frequency-energy resource distributing method of earth stations and space board radio engineering complexes to provide the necessary set of telecommunications services for high-speed satellite system subscribers in the paper.

Key words: central earth station, subscriber earth station, space board retransmission complex, frequency-energy resource, high-speed satellite system, network traffic.

Zvonarev V.V., Pimenov V.F., Popov A.S. Method of calculation of a noise stability of reception of a signal with four-position quadrature phase manipulation at influence of a harmonious coherent hindrance // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P.79–89.

Satellite communication links are considered by transfer of quadruple quadrature phase-shifted radio signal at influence of harmonious coherent noise. The offered calculation procedure allows to define precisely the power characteristics of radio channel providing required quality of reception

of the transferred messages in the presence of harmonious noise and also to calculate mean values of probability of character and bit errors in the presence of noises.

Key words: noise stability, four-position quadrature phase manipulation, probability of an error of reception of a symbol, probability of a bit mistake, relation hindrance/noise.

Karev M.S., Skvortcov D.V. The model of formation of static errors of the motion control system of a spacecraft observations // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 90–97.

The results of simulation of the spacecraft motion control system operation in two modes, in the mode of normal operation, in the absence of damaged sensing elements in the system, and in the non-standard mode of operation, in the presence of sensitive elements damaged as a result of adverse factors of outer space in the system are presented. The composition of the sensitive elements of the motion control system, their relationship and the logic of functioning are considered. On the basis of this, a mathematical model of the formation of a static error of the motion control system that occurs when correcting inertial sensors of the system according to information from damaged optical sensors is developed and presented. It is shown that the occurrence of a static error will lead not only to errors in the positioning of the spacecraft, but also to a significant increase in the time of the transition process of the system.

Key words: spacecraft, motion control system, space factors, optical sensor, angular position.

Skorobogatova O.A. Technique of estimation the technical characteristics of radiating elements of a bipolarized vibratory antenna array of wide-angle scanning in the UHF-range // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 98–105.

The proposed a technique of estimation the technical characteristics of radiating elements of a bipolarized vibratory antenna array (AA) of wide-angle scanning in the UHF range on the basis of the choice of the optimum sizes of radiators taking into account their design features is offered. The optimality criterion of the chosen parameters of the design of radiators is the maximum value of the amplification factor (AF) in the set sector of corners provided that values of reflection coefficient do not exceed some set threshold with the operating range of frequencies. The technique can be used at assessment of operability of AA of the big sizes during life cycle of radar station. The technique can be used at assessment of operability of AA of the big sizes during life cycle of radar station.

Key words: cross-vibrator, reflection coefficient, directional diagram, amplification factor, antenna array

Alekseev V.F., Khayrullin R.R. Method for automated assessment of masking properties of vegetation cover in inaccessible areas based on remote sensing data // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 106–116.

The developed method allows creating special maps of masking properties of forest vegetation based on the materials of aerospace survey in automated mode. The results obtained can be used in making decisions on the management of troops and weapons.

Key words: masking properties of the terrain, natural masks, vegetation index, decoding features.

Development prospects of automated hydrometeorological support systems / I.A. Gotur, A.N. Meshkov, M.Y. Rud, I.A. Yaremenko // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 117–125.

The article considers the existing in the Military Forces of the Russian Federation (MF RF) automated systems of hydrometeorological support and defines the prospects development using "big data" technologies. The results of load testing of databases used in the automated systems of hydrometeorological support of the Military Forces of the Russian Federation are presented.

Key words: store data technologies, relational data model, big data, NoSQL data model, MongoDB, PostgreSQL.

Maltsev G.N., Matveev S.A. Mathematical models of the process of overcoming a multiplayer information protection system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 126–135.

The article develops Markov models of the process by which an intruder overcomes a multilevel information protection system. The models are based on a formalized description of the successive violation by the violator of the protection lines in the state space for three basic scenarios, which differ in the description of the transitions between states if the next line of protection is not overcome. The basic nature of the considered scenarios is determined by the possibility of combining them to describe private scenarios. The models make it possible to determine the time variation of the probability of the threat for the given intensities of transitions between states, which are determined by the characteristics of the information protection system and the intruder. The results of calculations of the probability of the threat realization are presented, which allow to qualitatively analyze the nature of its change over time in various ranges of values and compare the change in the security of the information system under various basic scenarios of the violator overcoming the lines of protection.

Key words: information protection, threats to information security, state graph, scenarios of overcoming security lines.

Abdurahimov A.A., Avksentyev A.A., Sasunkevich A.A. Calculation method of place coordinates of a heat-carrying medium outflow from a heat control spacecraft system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 136–144.

The method is based on the use of the telemetering information about the speed of rotation of a space vehicle and the parameters, allowing to calculate the rotating moment developed by power gyroscopes. The method includes calculation algorithm of place coordinates of the known direction straight line crossing with elements of a hydraulic contour of a heat control spacecraft system. The example of calculation for the concrete kinematic scheme of gyroscopes is given. The result may be useful at orbital repair and for elimination of preconditions to occurrence of outflow on made spacecraft.

Key words: spacecraft, heat-carrying medium outflow, power gyroscopes, rotating force, arm.

Absalyamov D.R., Halmetov R.R., Shapovalov D.V. Improvement of circuit solutions for solar systems used as part of the power complex of special technical systems of ground space infrastructure facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 145–151.

The article shows the advantages of solar heating systems in comparison with traditional systems of heat generation and heat supply. Promising circuit solutions for joint production of heat and electricity are presented. The need to apply new circuit solutions to achieve energy-efficient heat supply in special technical systems of ground-based complexes. The expediency of using circuit solutions with alternative, renewable and low-potential sources of thermal energy is shown. The possibility of generating electricity through the integrated use of solar, wind and regular power supply systems has been demonstrated. The relevance of the tasks to be solved for supplying small, Autonomous military units with all types of energy, including units located in the Arctic regions of

the Arctic circle, the coastal shelf along the Northern sea route of the Russian Federation, and the measuring facilities of the Kura polygon is shown.

Key words: solar heating systems, heat supply, solar energy, adjustable parameters, solar-accumulative heat supply.

Averkiev N.F., Kulvic A.V., Khasanov A.Y. Assessment of dangerous situation development after spacecraft destruction in geostationary orbit monitoring // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 152–158.

Article presents assessment of dangerous situation development after spacecraft destruction in geostationary orbit and probability of dangerous rendezvous and collision of fragments with spacecraft from orbital group in geostationary orbit.

Key words: spacecraft, geostationary orbit, spacecrafts destruction, space debris, dangerous rendezvous, spacecrafts collision.

Mathematical model for estimating the dynamic characteristics of rail transport of rocket blocks / A.V. Antropova, A.V. Batalov, V.V. Kozlov, A.V. Lagun // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 159–168.

The main provisions of the mathematical model that allows performing estimation calculations of dynamic loads acting on rocket blocks during their transportation by rail are presented.

Of the large number of factors that affect the dynamics of transportation of rocket blocks, only two are considered, the most significant: the undulation of the railway track and the presence of joints between the rails. The main estimation parameters in the calculations are the overloads acting on the transported flight units and the amplitudes of their fluctuations during transportation. Despite the fact that the high-speed mode of transportation on domestic Railways can reach 120 km/h, the speed of movement is limited to 90 km/h in calculations. In addition, the model gap in the rail track is chosen to be 5 mm, while its value according to Russian Railways standards can reach 21 mm. The results of the calculations performed, despite the sparing initial data, indicate that the assigned level of transverse overloads for the rocket block hulls is exceeded.

Key words: railway transport, rocket block, reloading, rails, rail joints, dynamos, railway track profile.

Modified mass-energy model of launch vehicle TANDEM scheme with the first-stage launcher recovery system / I.A. Apevalov, N.V. Gruzdev, S.Y. Pirogov, E.A. Prokopenko // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 169–175.

The article considers one of the variants of constructing a mass-energy model of a launch vehicle based on the application of the first-stage launcher recovery system. It presents the limitations and additional conditions which should be included in the mass-energy model of the launch vehicle to determine the values of the objective function of the relative mass of the payload.

Key words: launch vehicle, payload mass, first-stage launcher recovery system.

Formation of the composition of properties and indicators space technical perfection rocket complex / D.A. Baranov, R.R. Kazakov, A.N. Mironov, O.L. Shestopalova // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 176–182.

The article describes a formalized method for determining the composition of a set of properties and the corresponding list of indicators of the technical perfection of a space rocket complex, based on a methodological technique, which consists in the formation of quality properties of the processes of creating and functioning of an object using the principle of consistent system analysis

of connections, processes and properties allocated in the system its creation and functioning. The method makes it possible to form a conditionally complete set of single properties of the technical perfection of the space rocket complex and transform it into a truncated subset of essential properties, represented as a tree of significant properties of the technical perfection of the space rocket complex.

Key words: indicator of technical excellence, quality property, system analysis, launch vehicle system.

Bublikov M.A., Zav'yulova G.M., Lebedev E.L. Heat storage material based on gallium in solving problems of thermal stabilization of onboard systems of spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 183–189.

The paper presents an analysis of the possibility of using gallium and alloys based on it as heat storage materials to ensure thermal stabilization of onboard systems of spacecraft. The results of studying the thermal curves of gallium and alloys based on it, data on the thermodynamics of these alloys and their thermophysical properties are presented.

Key words: heat storage material, gallium, paraffin, phase transformation, eutectic.

Gerasimenko E.Y., Pospishenko V.I., Prokopenko E.A. Experimental stand for the development and improvement of advanced methods for monitoring the operation and testing of liquid rocket engines // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 190–197.

The description of the stand of fire tests of the VKA named after A.F. Mozhaisky model LRE is presented. The advantages of experiments on model engines over tests on full-size standard samples of rocket and space technology are outlined. The article presents promising methods of monitoring the functioning and testing conducted in order to improve them.

Key words: liquid rocket engine, experimental stand, vibro-acoustic control method, electrophysical control method.

High voltage source for conducting fire test of an electric rocket engine during ground experimental processing / P.S. Goncharov, V.V. Martynov, V.M. Skutnitskiy, O.Y. Tsybin, N.A. Shunevich // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 198–205.

The necessity and requirements for creating a power source for electric rocket engines used in fire tests in laboratory conditions are substantiated. The basic electrical diagram of the device is developed, the process of its functioning is revealed. The operation of the device in the most stressful modes is considered. Features of implementation, debugging, and application of a high-voltage power supply are described. Recommendations on the direction of further research are given.

Key words: high-voltage power supply, electric rocket engine, concept diagram, device development, fire tests.

Storage system for advanced rocket fuels based on liquefied natural gas / A.V. Kazimirov, A.V. Molostov, E.E. Naumchik, I.K. Prilutsky // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 206–211.

A schematic diagram of a storage system for a promising rocket hydrocarbon fuel – liquefied natural gas, including a vapor gas liquefaction system, is presented. The cycles of vapor gas liquefaction and cooling of nitrogen used as a refrigerant are also considered. The processes included in the cycles are considered and the parameters of the state of working bodies at the characteristic points of the cycles are given.

Key words: propellant components, liquefied natural gas, thermodynamic cycle, thermodynamic process, schematic diagram.

Perfiliev A.S., Sultanov A.E. Approaches to evaluating the dynamic parameters of the hull launch vehicle in flight based on telemetry measurements // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 212–221.

Methods for identifying parameters of the launch vehicle body as an oscillatory system based on spectral-time signal processing of low-frequency oscillation sensors of the design used on all domestic spacecraft launch vehicles are considered. It is shown that it is possible to clarify information about the actual dynamic characteristics of the liquid-fueled rocket body, which are implemented in specific conditions of active operation, when solving the problem of controlling the stability of technological processes for creating a product at the manufacturing plant. The proposed approaches are based on a systematic analysis of the results of processing telemetric information from the launch vehicles, supported by the analysis of the results of numerical modeling of vibrations of the rocket hulls.

Key words: longitudinal vibrations, launch vehicle, flight tests, telemetry information, vibration forms, vibration spectrum.

Method of integral assessment of the formed and professional competencies of cadets / Y.M. Boguk, I.I. Manenok, G.K. Osipov, V.V. Hilenko // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 222–231.

The essence of the integral assessment of the formation of professional competence of cadets, implemented on the basis of the methodology of multiparametric analysis of the quality of complex objects. The structural and logical scheme of the method is considered, the content of its main blocks is revealed. The results of its approbation at the Department of cartography of the military space Academy named after A.F. Mozhaisky on the example of assessment of the formation of professional competencies in the study of the discipline "geoinformation mapping" are presented.

Key words: professional competence, integrated assessment, qualimetric analysis, quality of learning material, level of training, correctness of technological operations, motivation to study the discipline.

Voronkov I.Y., Zinoviev V.G., Kuzhikin N.S. Methodology for evaluating the results of the competition for the best lecture among the academy's teachers // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 232–246.

The problem of evaluating the results of the contest participants' performances distributed in time and place by experts is considered. The features and problematic issues of expert evaluation of the results of the competition based on incomplete data are analyzed. The necessity of introducing a methodology for evaluating the results of the competition with filling in and weighing data is justified. An example of practical evaluation of the results of the competition for the best lecture among teachers of the Academy is given.

Key words: expert evaluation, integral evaluation, incomplete data, correction factor, scale factor, indicator of evaluation availability, indicator of evaluation reliability, data completion.

Guzenko V.L., Dulishkin R.M., Kasavtsev M.Y. Methods of improving the work of the commander of the unit on the formation of command and methodological skills and skills of organizing military and political work of the students in their daily activities // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 247–254.

The article considers the process of improving the process of forming command and methodological skills and skills of organizing military and political work. Analysis of the practice of daily activities shows that the level of skills formed by cadets is insufficient. The solution to this issue, according to the authors, will be to improve the work of the commander of the unit to form command and methodological skills and skills of organizing military and political work in subordinates in everyday activities. The article substantiates the choice of the time budget for this work, as a result, the main emphasis is placed on the systematization of the work of unit commanders in extracurricular time. In addition, the authors identified a number of problematic aspects of the work on the formation of command and methodological skills and skills of organizing military and political work, the solution of which will make it possible to increase the level of formed skills. As a result, the authors have developed and tested a technique that allows improving the quality of command and methodological skills formed in cadets and the skills of organizing military and political work in the performance of daily activities.

Key words: military professional competence, military professional competence, command and methodological skills, skills of organizing military and political work, extracurricular time, unit commander, daily activities, graduate of a military University.

Erofeev A.V., Katcik V.O., Pokidov L.V. Methodological and organizational aspects of the use of information technologies in conducting tactical and special exercises // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 255–262.

The article discusses the methodology for the use of tactical and special exercises by the combat command group of the training of a separate command-and-measuring complex of a local computer network in the interests of fulfilling the military tasks for their intended purpose.

Key words: local area network, methodology, computer information technology, decision making, information support for students' actions, combat crews, combat posts, information capabilities.

Kunturova N.B. Evaluation of the variability of the methodical approach to forming the required level of education at military university cursors on the basis of the implementation of the educational trajectory // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 263–269.

The article analyzes the issue of evaluating the effectiveness of methodological approaches to training at a military university, compares the success of a cadet study group over the entire period of study of one subject and flow study groups among themselves over a certain period, based on the A.F. Mozhaisky "Program module for visualizing the educational trajectory of a student at a university." A substantial example is presented illustrating the presented theoretical positions.

Key words: level of education, quality of training, teaching methods, educational trajectory, competency coefficient.

Ogorodnikov V.P. The connection between historical and logical in the formation of ideals and norms of scientific research // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 270–278.

The article reveals the history of the formation of ideals and norms of scientific research in its connection with the development of philosophy. It is shown that in the system of ideals and norms of science there is a historical and meaningful-logical continuity. This examines the definition of ideals and methods of science by developing technology and material production technology and the reverse impact of science on material and spiritual production. The dialectic of evolution and revolution in scientific cognition is demonstrated.

Key words: scientific cognition, methodology of science, empiricism, rationalism, positivism, material production, ideals, norms, historical stages of science development.

Gusev N.N., Kucherenko A.O. Influence of weather conditions on the nature of dynamic impacts on the launch structure during launch of the launch vehicle // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 279–284.

The article is devoted to the effect of reflected acoustic waves of the gas-dynamic jet of launch vehicle engines on the launch structure. The paper hypothesizes that at low cloud cover, the acoustic wave of the launch vehicle engines is repeatedly reflected both from the launch structure and from the lower boundary of the clouds above the launch structure, where the phenomenon of wave interference occurs. In this paper, the influence of the interference effect in the evaluation of vibrodynamic parameters of bearing structures starting structures in functional diagnostics launch facility, as well as the analysis of the results of monitoring the dynamic component of the stress-strain state of structures the starting structures. Based on experimental data obtained during launches of rockets, proved a direct link between the meteorological conditions in the area of the starting structures with dynamic response of structures exposed to gas-dynamic jet of launch vehicles during normal launches. The analysis of experimental data showed that the gas-dynamic loads on the launch structure even during the regular launch of the launch vehicle can differ from launch to launch at times under a certain combination of meteorological conditions in the area of the launch structure. It is proved that if the standard documents on the design of building structures of launch structures are adopted, the 5-6-fold margin of safety, under certain meteorological conditions, may not be sufficient to ensure their load-bearing capacity. The article presents the results of experiments confirming the increase in the pulsation (dynamic) component of the stress-strain state of the Foundation plate of the launch structure in the presence of interference in low cloud conditions at launch of the launch vehicle. The article proposes to expand the list of special loads by including loads caused by meteorological conditions in the area of the launch structure.

Key words: starting structure, impact of gas-dynamic loads, reflected acoustic waves, dynamic stress-strain state of load-bearing structures, functional vibration diagnostics, field experiments, technical condition of load-bearing structures.

Kazakhov B.D., Popov D.M. Justification technique for rational method of maneuverable actions of tactical military formation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 673. – P. 285–291.

The article discusses the methodology for substantiating the rational method of maneuvering actions of a tactical military formation. The procedure for its implementation, as well as its main capabilities, are described on the example of choosing a rational option for maneuvering actions performed in the course of forming an idea for the use of a tactical military formation.

Key words: maneuvering actions, evaluating effectiveness, tactical military formations, choosing a rational method.

Абдурахимов Алексей Александрович, начальник 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-12.

Абсалямов Дамир Расимович, начальник 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 268-15-33, e-mail: damir73@yandex.ru

Аверкиев Николай Фёдорович, профессор 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: averkiev@mail.ru

Авксентьев Александр Алексеевич, старший научный сотрудник 21-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: aaa1508@yandex.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-76, 8 (911) 217 03 39, e-mail: vka-onr@mil.ru, vfalex_vti@mail.ru

Антропова Александра Владимировна, младший научный сотрудник 133-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 593-53-25, e-mail: aleksx.antro@mail.ru

Апевалов Игорь Анатольевич, научный сотрудник 122-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19.

Астахов Евгений Николаевич, старший преподаватель 35-й кафедры – начальник связи Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 235-30-63, e-mail: 89112979105@mail.ru

Афонин Глеб Игоревич, преподаватель 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-61, e-mail: vka@mil.ru

Бакурский Клим Валерьевич, докторант 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Баранов Дмитрий Александрович, генеральный директор АО «Ракетный-космический центр "Прогресс"» (443009, Россия, г. Самара, ул. Земеца, 18); кандидат технических наук; тел.: 8 (846) 955-13-61, e-mail: mail@samspace.ru

Баталов Алексей Владимирович, старший преподаватель 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 247-23-44, e-mail: batalkin1@mail.ru

Богук Юрий Михайлович, профессор 71-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 694-82-12.

Бубликов Максим Алексеевич, курсант 1-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-11.

Бурлаков Сергей Олегович, профессор кафедры спутниковой связи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 907-79-34, e-mail: SOBurlakov@yandex.ru

Воронков Иван Юрьевич, начальник учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент.

Воротягин Валентин Николаевич, адъюнкт 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: vorotyagin@rambler.ru

Герасименко Евгений Юрьевич, старший научный сотрудник 171-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (904) 613-50-57, e-mail: gerasimenko_evge@mail.ru

Гончаров Алексей Михайлович, заместитель начальника 9-го факультета – начальник учебной части Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-62.

Гончаров Павел Сергеевич, начальник 12-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Готюр Иван Алексеевич, начальник 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Груздев Николай Валентинович, старший научный сотрудник 24-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: NikGruzdew@rambler.ru

Гузенко Виталий Леонидович, профессор 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 969-87-83.

Гусев Николай Николаевич, старший преподаватель 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 958-42-90, e-mail: goussev_nn@mail.ru

Дулишкин Руслан Михайлович, начальник учебной лаборатории (Единой системы управления тактическим звеном) кафедры тактики Дальневосточного высшего общевойскового командного училища имени Маршала Советского Союза К.К. Рокоссовского (675021, Россия, Благовещенск, ул. Ленина, 158).

Ерофеев Алексей Васильевич, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197227, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (911) 981-21-74.

Завьялова Галина Михайловна, доцент 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-11.

Звонарев Виталий Валерьевич, начальник 233-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 254-58-70.

Зиновьев Валерий Григорьевич, профессор 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: zvg54@mail.ru

Казakov Рустем Рифатьевич, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: kazakov13kaf@mail.ru

Казахов Батраз Джумаевич, начальник 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 252-94-31, e-mail: vkakaf@yandex.ru

Казимиров Артём Витальевич, заместитель начальника 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-18, e-mail: kizim2003@rambler.ru

Калюжный Алексей Викторович, адъюнкт 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 117-42-62, e-mail: aleksei.kalyuzhnyi@yandex.ru

Карев Михаил Сергеевич, начальник 111-й лаборатории – заместитель начальника 11-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: mixeu@inbox.ru

Касавцев Михаил Юрьевич, старший преподаватель 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 810-58-68, e-mail: mk-spb@rambler.ru

Кацик Владимир Олегович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 447-55-09.

Козлов Владимир Владимирович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof.kozlov@yandex.ru

Косяков Евгений Николаевич, профессор 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 235-30-63, e-mail: e-kosyakov@yandex.ru

Кошкаров Александр Сергеевич, докторант 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: vka@mil.ru

Кужекин Николай Сергеевич, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (911) 794-16-72, e-mail: kns656@mail.ru

Кульвиц Алексей Владимирович, докторант 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: kh_qqq@mail.ru

Кунтурова Надежда Борисовна, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: k_n_b_26@rambler.ru

Кучеренко Александр Олегович, адъюнкт 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 958-19-80, e-mail: kucher_90@bk.ru

Лагун Андрей Валерьевич, доцент 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 937-09-02, e-mail: Kio@mail.ru

Лебедев Евгений Леонидович, начальник 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-11.

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: georgy_maltsev@mail.ru

Маненок Иван Иванович, старший преподаватель 72-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 694-82-12.

Мартынов Виктор Васильевич, старший научный сотрудник 121-й лаборатории 12-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Матвеев Сергей Анатольевич, адъюнкт 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-32.

Мешков Алексей Николаевич, преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Миронов Андрей Николаевич, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-74, e-mail: mironov-anik@yandex.ru

Молостов Александр Валерьевич, адъюнкт 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-18, e-mail: 5801252@mail.ru

Мысливцев Тимофей Олегович, профессор 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Наумчик Екатерина Евгеньевна, младший научный сотрудник 61-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-18, e-mail: naumchik-e@yandex.ru

Никифоров Сергей Валерьевич, преподаватель 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: uncleserega@yandex.ru

Огородников Владимир Петрович, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор философских наук; профессор; тел.: 8 (951) 668-24-86, e-mail: ogo-vladimir@yandex.ru

Осипов Георгий Константинович, профессор 72-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор географических наук, профессор; тел.: 8 (812) 694-82-12, e-mail: Osipov-G-K-2005@yandex.ru

Павлов Александр Николаевич, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: pavlov62@list.ru

Перфильев Александр Сергеевич, заместитель начальника 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-13, e-mail: vka@mil.ru

Пименов Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 221-й лаборатории 22-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (960) 280-23-77.

Пирогов Сергей Юрьевич, начальник 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-13, e-mail: kafedra17@rambler.ru

Покидов Леонид Викторович, старший преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (921) 782-24-85.

Попов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник 231-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (961) 806-26-58.

Попов Дмитрий Митрофанович, преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (909) 587-05-52.

Поспишенко Василий Иванович, доцент 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; e-mail: pos.vi@yandex.ru

Прилуцкий Игорь Кирович, старший научный сотрудник 11-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-18, e-mail: 5592085@mail.ru

Прокопенко Евгений Алексеевич, начальник 251-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 833-19-51, e-mail: Prokopenko_work@mail.ru

Рудь Мария Юрьевна, преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Самойлов Евгений Борисович, доцент 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: 89602339855@mail.ru

Сасункевич Александр Анатольевич, преподаватель 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

Скворцов Дмитрий Валерьевич, начальник 11-го отдела – заместитель начальника управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mail.ru

Скоробогатова Ольга Анатольевна, старший научный сотрудник 422-й научно-исследовательской лаборатории 42-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Рос-

сия, Санкт-Петербург, ул. Генерала Хрулёва, 16); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 226-98-44.

Скутницкий Владислав Михайлович, начальник 1-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mail.ru

Смирнов Александр Александрович, докторант кафедры спутниковой связи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); кандидат технических наук; тел.: 8 (904) 612-62-03, e-mail: midor012@mail.ru

Султанов Алексей Эдыгарович, старший преподаватель 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8(812) 347-95-13, e-mail: vka@mil.ru

Тимофеев Владимир Васильевич, старший преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (952) 285-4206, e-mail: V.timofeev.53@mail.ru

Хайруллин Радис Рафисович, адъюнкт 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Хальметов Рамиль Ряшидович, адъюнкт 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931) 535-64-24, e-mail: ramilkhalmetov@gmail.ru

Хасанов Антон Юрьевич, начальник 161-й учебной лаборатории 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: kh.www@yandex.ru

Хиленко Владислав Вячеславович, начальник 71-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 694-82-12.

Цветков Кирилл Юрьевич, профессор 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 947-19-58, e-mail: wavelet3@mail.ru

Цыбин Олег Юрьевич, профессор кафедры физической электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (194064, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (921) 933-16-92, e-mail: vka@mil.ru

Шаповалов Дмитрий Викторович, заместитель начальника Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского по военно-политической работе (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 246-15-33, e-mail: dmitriy73@yandex.ru

Шестопалова Ольга Львовна, доцент филиала «Восход» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) в г. Байконуре (468320, Россия, г. Байконур, ул. Юрия Гагарина, 5); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (33622) 5-14-43, e-mail: neman2004@mail.ru

Шмелёв Валентин Валерьевич, заместитель начальника 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: valja1978@yandex.ru

Шуневич Николай Александрович, начальник 122-й лаборатории 12-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Яременко Иван Андреевич, адъюнкт 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, 8 (963) 311-49-26, e-mail: vka-onr@mil.ru

Абдурахимов Алексей Александрович, начальник 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-12.

Басыров Александр Геннадьевич, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexanderbas@mail.ru

Доронин Александр Павлович, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: doronin52@mail.ru

Калинин Владимир Николаевич, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Санкт-Петербургской инженерной академии, член-корреспондент Междуна-родной инженерной академии, Российской инженерной академии, Международной академии информати-зации; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@mail.ru

Каргу Дмитрий Леонидович, начальник 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 964-08-60, e-mail: dmitrii_kargu@mail.ru

Козлов Владимир Владимирович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор, тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof.kozlov@yandex.ru

Кужекин Николай Сергеевич, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (911) 794-16-72, e-mail: kns656@mail.ru

Кунтурова Надежда Борисовна, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: giz26@rambler.ru

Лебедев Евгений Леонидович, начальник 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Лоскутов Андрей Иванович, начальник 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-70, e-mail: rk@viek.ru

Мысливцев Тимофей Олегович, начальник 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Назаров Александр Валерьевич, начальник 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Новиков Евгений Александрович, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: novikov.evg.alex@yandex.ru

Пилькевич Сергей Владимирович старший преподаватель 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук.

Пирогов Сергей Юрьевич, начальник 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-25, e-mail: pirogov205@mail.ru

Репях Николай Андреевич, заведующий 109-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, доцент; тел.: 8 (911) 990-02-38, e-mail: utkinodacha@yandex.ru

Силантьев Сергей Борисович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Софьин Алексей Петрович, доцент 114-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент.

Сычева Анастасия Максимовна, профессор 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент.

Фаттахов Руслан Фаритович, заместитель начальника 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент.

Фоминов Иван Вячеславович, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Цветков Кирилл Юрьевич, профессор 63-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 947-19-58, e-mail: wavelet3@mail.ru

Щукин Георгий Георгиевич, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-52.