

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

Выпуск 675

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. 22.12.2020.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 107,00. Уч.-изд. л. 53,00
Тираж 26 экз. Заказ 3823/62.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Басыров А.Г., Кошель И.Н., Шушаков А.О.* Модель параллельных вычислений в деградирующей бортовой вычислительной системе космического аппарата 8
- Васильев А.С., Калюжный А.В., Ширококов В.В.* Алгоритм планирования параллельной обработки информации в распределенной динамической сетевой структуре орбитальной группировки микроспутников 16
- Гончаревский В.С.* Энергетически оптимальное управление взаимным маневром космических аппаратов в свободном пространстве 23
- Казанцев Д.И.* Методика организации виртуализации вычислительных ресурсов комплекса средств автоматизации при решении целевых задач 28
- Казахов Б.Д., Козлов В.В., Лагун А.В.* Обоснование показателей для оценки результативности функционирования системы защиты ракетно-космического комплекса в условиях внешнего деструктивного воздействия 36
- Калюжный А.В., Шульгин А.Н., Шушаков А.О.* Модель и алгоритм оптимального управления ресурсоемкостью стохастических параллельных вычислительных процессов 45
- Колесник А.В., Ортиков М.Ю., Чарушников А.В.* Обоснование состава инструментария разработки программных средств моделирования космических систем 53

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Благодыренко Е.В., Коробченко И.П.* Наблюдение космических объектов наземными оптико-электронными системами с регистрацией спектрофотометрической информации 62
- Бучинский Д.И., Вознюк В.В.* Помехоустойчивость когерентного демодулятора двоичных фазоманипулированных сигналов с расширенным спектром при воздействии гауссовской помехи с ограниченным по полосе равномерным спектром 69
- Зиннуров С.Х., Новиков Е.А., Степанова Е.А.* Моделирование процессов генерации и обслуживания трафика со сложной структурой с использованием

программного комплекса логико-событийного моделирования MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW 77

Козлов Ю.В., Кукушкин М.А., Михеев О.Ю. Методический подход к оцениванию устойчивости информационного обмена в контуре управления орбитальными группировками космических аппаратов в условиях деструктивных воздействий 87

Махов Д.С., Финько О.А. Способ пространственно-временного кодирования информации в параллельных радиоканалах радиотехнических систем 95

Пименов В.Ф., Попов А.С. Анализ степени подавления коррелированной с сигналом помехи в линейной антенной решетке при оптимизации по минимуму среднеквадратического отклонения 108

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Алексеев А.В., Рагимов Э.А. Обоснование оптимального числа исходных данных для построения алгебраического полинома при создании карт пластики рельефа 120

Алексеев В.Ф., Андриевская В.Ю. Определение допустимой дискретности гравиметрических измерений для обеспечения требуемой точности восстановления функции вторых производных геопотенциала 125

Ивановский В.С., Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю., Кузнецова Н.В., Саркисов С.В., Сенюкович М.А., Усвяцов Б.М. Направления совершенствования систем отведения поверхностного стока урбанизированных территорий 129

Литинский Е.И., Макаренко А.А., Масленников С.А. Методика обоснования рационального способа комплексного применения космических систем картографирования и наблюдения для построения цифровой модели рельефа 139

Станиславичюс Р.-Б.Б., Суворов А.В., Яковлев А.И. Исследования влияния ошибок исходных астрономо-геодезических данных на работу инерциальных навигационных систем 150

Чернов И.В., Якунин В.И. Модель процесса гиротеодолитных работ для решения задачи оценивания качества его результатов 156

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Абашева И.В., Еремеев М.А., Криулин А.А., Нефедов В.С., Потерпеев Г.Ю. Применение методов машинного обучения к задачам обнаружения вредоносного программного обеспечения 164

| | |
|--|-----|
| <i>Соловьев И.А., Соловьева М.В., Трофимова Н.А.</i> Исследование безопасности доступа к удаленным информационным ресурсам с применением технологии сквозной аутентификации на основе стандарта SAML | 172 |
|--|-----|

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

| | |
|---|-----|
| <i>Абдурахимов А.А., Гончаров П.С., Денисов А.М., Кухтин А.В.</i> Обобщенная математическая модель процесса функционирования бортового обеспечивающего комплекса космического аппарата в условиях техногенного загрязнения околоземного космического пространства | 182 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| <i>Абдурахимов А.А., Карев М.С., Краснощеков С.Н., Скворцов Д.В.</i> Методика определения места приложения внешней силы к корпусу космического аппарата, оснащенного силовым гироскопическим комплексом | 195 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| <i>Белихин Е.Н.</i> Методика распределения допусков на параметры бортовых оптико-электронных средств космических аппаратов | 204 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| <i>Белянин Д.Г., Герасименко С.Ю., Пирогов С.Ю., Тупаев В.В.</i> Оценка влияния класса ракеты-носителя на снижение удельной стоимости выведения полезного груза за счет многократного использования жидкостного ракетного двигателя первой ступени | 213 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| <i>Болдырев К.Б., Карчин А.Ю., Поспишенко В.И.</i> Комбинированная модель нагружения корпуса ракетного блока в условиях действия разрушающих аэротермодинамических нагрузок на этапе спуска | 217 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| <i>Боцвин С.А., Гарковенко А.С., Хватков В.А.</i> Основные проблемы и тенденции развития автоматизированных систем учета личного состава Вооруженных Сил Российской Федерации | 223 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| <i>Гасюк Д.П., Дубовский В.А., Стативка В.С.</i> Методика оптимизации перемещений неисправного ракетного вооружения | 228 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| <i>Герасименко С.Ю., Пирогов С.Ю., Поспишенко В.И.</i> Исследование зависимости начальных параметров движения отделяемых частей ракет-носителей от параметров ракетодинамической системы спасения | 237 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| <i>Грудинин И.В., Пальгуев Д.А., Шентябин А.Н.</i> Информационная подсистема сбора, обработки и обмена радиолокационной информацией сетевой структуры | 243 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| <i>Долгов И.И., Панкратов А.В., Эсаулов К.А.</i> Алгоритм восстановления информационно-вычислительного комплекса сложных технических систем с учетом приоритета решаемых задач | 254 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| <i>Калабин П.В.</i> Исследование влияния параметров двигателей-маховиков на характеристики оптимального по быстрдействию разворота малого космического аппарата | 266 |
| <i>Клепов А.В., Поляков С.А., Шаповалов Д.В.</i> Методика обоснования перспективных планов эксплуатации оборудования сложных технических комплексов космических войск | 276 |
| <i>Ковалев Ф.Е., Миргородский А.Н., Эльцофон Д.А.</i> Оптимизация затрат на эксплуатацию объектов наземной космической инфраструктуры | 288 |
| <i>Копкин Е.В., Попов Д.В., Чикуров В.А.</i> Эвристический алгоритм выбора многозначных диагностических признаков на основе их ценности для оценивания технического состояния объекта | 294 |
| <i>Косырев С.В., Лебедев М.Ю., Соколов Д.А.</i> Организация обращения с твердыми коммунальными отходами на военных объектах | 308 |
| <i>Литвинова Н.Б., Тупицин Ю.Е., Шишкин Е.В.</i> Методика определения сроков проведения технического обслуживания оборудования технических систем специальных объектов при использовании гибких стратегий | 317 |
| <i>Сальников В.М., Хальметов Р.Р., Шишкин Е.В.</i> Утилизация теплоты ракетного топлива на стартовом сооружении | 324 |
| <i>Самойлов Е.Б., Шмелёв В.В.</i> Оценивание энергетических характеристик ракетно-космической техники по результатам внешнетраекторных измерений | 329 |
| <i>Сасункевич А.А., Силантьев Д.С., Силантьев С.Б.</i> Повышение точности расчета параметров управления на внеатмосферном участке полета без расчета параметров движения ракеты-носителя | 340 |
| <i>Яцечко М.И.</i> Алгоритм оптимального управления инженерно-авиационной службой при подготовке к полетам группы воздушных судов в условиях ограниченного количества личного состава | 348 |
| ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК | |
| <i>Ванягин В.Е., Ванягина М.Р., Молдованова С.М.</i> Оценивание уровня доверия к результатам дистанционного контроля обученности испытуемых в технологии прокторинга | 362 |
| <i>Голубев М.А., Розанова Л.В.</i> Функциональная модель организации работы со служебными отзывами на выпускников Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского | 369 |

| | |
|---|-----|
| <i>Дегтярев А.Н., Спирин А.П.</i> Формирование у курсантов отношения к национальной идентичности как профессиональной ценности в ходе изучения гуманитарных дисциплин | 373 |
| <i>Ерохин В.И., Кадочников, А.П., Маркина М.К., Сотников С.В.</i> Методика оценивания результативности научных работников научно-исследовательской организации | 379 |
| <i>Иноземцева Л.А., Кужекин Н.С.</i> Психолого-педагогические императивы формирования профессиональной компетентности преподавателя военного учебного заведения | 388 |
| ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК | |
| <i>Ренях Н.А., Хрустова А.Н.</i> «Новая поэтическая философия» Владимира Фёдоровича Одоевского как предтеча философии русского космизма | 394 |
| Рефераты статей | 400 |
| Сведения об авторах | 412 |
| Сведения о рецензентах | 423 |

А.Г. Басыров,
доктор техн. наук, профессор;
И.Н. Кошель;
А.О. Шушаков,
кандидат техн. наук

МОДЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ДЕГРАДИРУЮЩЕЙ БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассмотрено функционирование параллельной бортовой вычислительной системы (БВС) космического аппарата (КА), деградирующей в результате различных деструктивных воздействий. Предложена модель параллельных вычислений в условиях деградации вычислительной системы.

Рассмотрены примеры моделирования функционирования БВС КА с оценками предельно возможной результативности ее функционирования при различных реализациях планов параллельных вычислений. Сделаны выводы и сформулированы предложения по планированию параллельной обработки информации в условиях критической деградации БВС.

Ключевые слова: планирование параллельной обработки, предельно возможная результативность, деструктивное воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции к развитию бортовой обработки информации в КА военного назначения требуют научно обоснованного подхода к моделированию параллельных вычислительных процессов (ПВП) в бортовых вычислительных системах КА.

Задача моделирования ПВП при штатном функционировании вычислительной системы (ВС) успешно решается [1], однако при ее деградации необходимы подходы к моделированию, обеспечивающие превентивное (упреждающее) планирование параллельных вычислений, направленное на достижение максимально возможной, в условиях деградации вычислений, результативности функционирования ВС.

Внешние деструктивные воздействия на БВС КА могут иметь различную природу и особенности реализации. Не теряя общности моделирования процессов функционирования БВС в условиях деструктивных воздействий, в статье рассматриваются различные виды воздействий на БВС КА, реализация которых приводит к полной утрате ее работоспособности.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДЕГРАДИРУЮЩЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим функционирование БВС КА, входящей в состав бортового комплекса управления или специального комплекса КА и состоящей из нескольких вычислительных модулей (процессоров или отдельных ЭВМ), в условиях возможной ее деградации.

Выполнение набора программ в реальном масштабе времени реализуется по плану параллельного вычислительного процесса. Будем считать, что планирование ПВП направлено на обеспечение выполнения программ (задач) на заданном множестве вычислительных модулей (ВМ) к заданному директивному сроку.

Реализация ПВП в условиях деградации БВС может быть прервана ее разрушением, что приводит к сокращению срока завершения вычислений и выполнению не всех запланированных задач, а только части из них.

План ПВП (рис. 1) можно представить массивом кортежей, содержащих номер задачи, номер вычислительного модуля, который будет выполнять задачу, плановое время начала (окончания) выполнения задачи.

В условиях возможного нештатного завершения решения целевых задач внешним деструктивным воздействием (разрушением БВС) целесообразно оценивать применение БВС предельно возможной результативностью ее функционирования [2]. Предельно возможная результативность функционирования БВС – степень достижения БВС наибольшего качества выполнения целевых задач КСА при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, в том числе повреждениях и отказах компонентов.

Показателем предельно возможной результативности функционирования деградирующей БВС является объем работы (количество задач или временные затраты на их решение), выполненный на интервале (штатном или нештатном) функционирования БВС.



Рис.1. План параллельного вычислительного процесса

При этом нормированным показателем R_q предельно возможной результативности функционирования БВС КА можно считать величину, равную отношению количества η

выполненных задач, к общему числу n задач, т.е. $R_q = \eta / n$, где $\eta = \sum_{i=1}^n x_i$, $x_i = 1$, если i -я

задача выполнена, $x_i = 0$ – в противном случае.

Кроме того показателем предельно возможной результативности функционирования БВС КА является доля R_w объема выполненной БВС работы к потребному объему всей работы, т.е. суммарная длительность выполненных задач, деленная на общую длительность решения всех задач:

$$R_w = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \tau_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \quad (1)$$

где τ_i – время выполнения i -й задачи.

Отметим, что показатель (1) является более общим, так как при $\tau_i = \text{const} = 1$ имеет место равенство $R = R_w$, т.е. оба показателя совпадают при одинаковой длительности решения задач.

Учитывая вероятность нештатного завершения вычислений, вызванного внешним воздействием, целесообразно сокращать время решения задач, т.е. повышать оперативность расчетов. Оперативность функционирования БВС КА характеризуется временем, которое затрачивает БВС на решение целевых задач. При параллельной обработке информации показателем оперативности функционирования вычислительной системы является коэффициент ускорения [3], определяемый как отношение времени решения задач на одном ВМ ко времени их решения на всех ВМ БВС КА:

$$R_t = \sum_{i=1}^n \tau_i / \max_i \{t_i\}, \quad (2)$$

где t_i – время завершения i -й задачи в соответствии с планом параллельной обработки информации.

В описанных выше условиях функционирования БВС КА целесообразно максимизировать показатели результативности и оперативности ее функционирования. Таким образом, обобщенным показателем качества функционирования БВС КА можно считать величину

$$R = R_w \cdot R_t = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \tau_i / \max_i \{t_i\}. \quad (3)$$

Ниже в модели функционирования бортовой вычислительной системы в условиях ее деградации будет определена зависимость этого показателя от плана параллельных вычислений и параметров деструктивного воздействия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЕЕ ДЕГРАДАЦИИ

Задача моделирования функционирования БВС КА в условиях ее деградации может быть сформулирована следующим образом.

По заданным параметрам задач, параметрам БВС, параметрам возможного деструктивного воздействия на БВС найти зависимость значения предельно возможной результативности функционирования БВС от плана вычислительного процесса.

Математическая постановка задачи.

Дано:

1) множество Z задач с параметрами: $\{\tau_i\}, i = 1, \dots, n$, τ_i – время решения i -й задачи, n – количество задач;

2) параметры V возможного воздействия:

– множество T интервалов времени $T = \{[t_{s1}, t_{f1}], [t_{s2}, t_{f2}], \dots, [t_{s\mu}, t_{f\mu}]\}$ возможных воздействий, где t_{si} – момент времени начала интервала i -го воздействия, t_{fi} – момент времени окончания интервала i -го воздействия, μ – количество воздействий;

– вероятности проведения i -го деструктивного воздействия $\alpha_i, i = 1, \dots, \mu$;

– функции распределения моментов времени реализации i -го деструктивного воздействия $G_i(t), i = 1, \dots, \mu$;

3) вектор плана вычислительного процесса $\Xi = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, где $t_i, i = 1, \dots, n$ – планируемые моменты времени завершения выполнения задач.

Найти: зависимость $R(\Xi, Z, V)$ обобщенного показателя качества функционирования БВС КА от плана вычислительного процесса, параметров задач и параметров деструктивных воздействий.

МОДЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ДЕГРАДАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Если в соответствии с планом ПВП i -я задача, $i=1, 2, \dots, n$, завершается в момент времени t_i , и известна функция распределения $F(t)$ момента времени завершения вычислений,

вызванного деструктивным воздействием, то с вероятностью $\bar{F}(t_i) = 1 - F(t_i)$ будут решены задачи, планируемое время завершения которых не превосходит t_i (рис. 2).

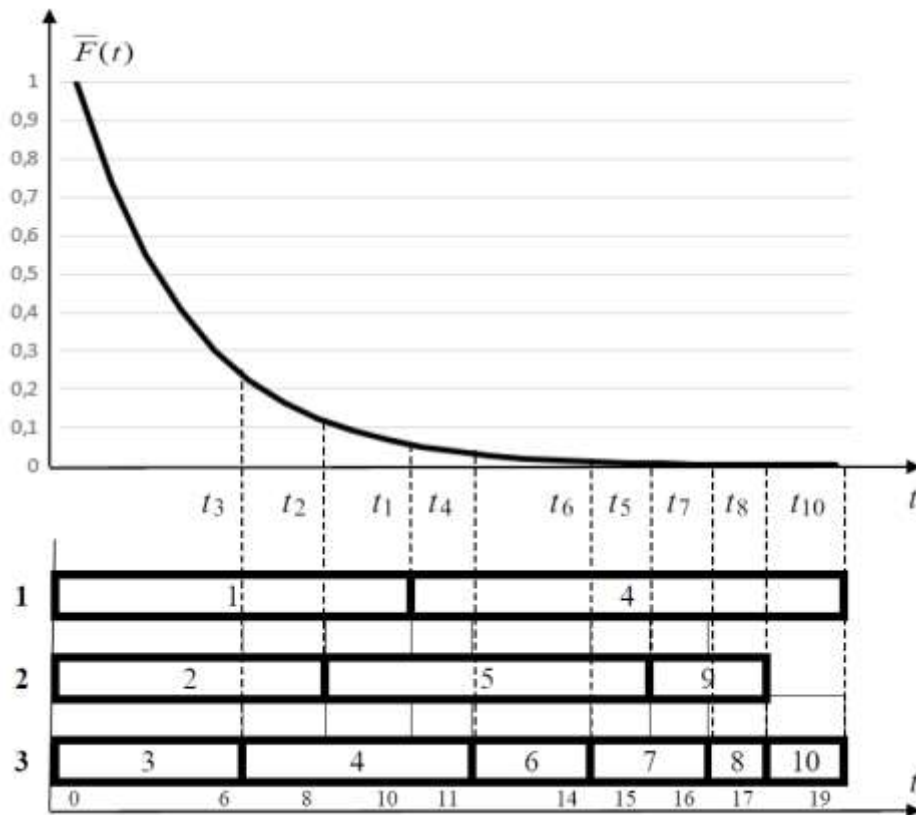


Рис. 2. Функция распределения времени завершения вычислений

Средний объем выполненной БВС работы составит

$$R_w = \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot (1 - F(t_i)), \quad (4)$$

а обобщенный показатель (3) качества функционирования БВС КА определится выражением

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \cdot (1 - F(t_i))}{\max_i \{t_i\}}. \quad (5)$$

Значения t_i , а значит и значение выражения (5), при заданной функции распределения $F(t)$ времени завершения вычислений, зависят от длительности и порядка (последовательности) выполнения задач. При этом общее время решения задач (потребный объем всей вычислительной работы) фиксировано и составляет $\sum_{i=1}^n \tau_i$.

Функция $F(t)$ распределения времени завершения вычислений, характеризующая деградацию БВС, представляет собой функцию распределения минимума независимых случайных величин, каждая из которых описывается функцией $G_j(t)$ распределения времени реализации j -го деструктивного воздействия на БВС, приводящего к нарушению (завершению) ее функционирования.

Если за период функционирования БВС возможно μ деструктивных воздействий, каждое из которых будет проведено с вероятностью α_j , $j = 1, \dots, \mu$, и реализовано по закону распределения $G_j(t)$, то функция $F(t)$ распределения времени реализации деструктивных воздействий будет иметь вид

$$F(t) = 1 - \prod_{j=1}^{\mu} (1 - \alpha_j \cdot G_j(t)). \quad (6)$$

Отметим, что в качестве одной из функций $G_j(t)$ можно рассматривать функцию распределения времени отказа БВС, характеризующую ее надежность, а также закон распределения любого воздействия.

Подставляя выражение (6) для функции распределения времени реализации деструктивных воздействий в выражение (3), получим зависимость отношения среднего объема выполненной БВС работы к периоду времени вычислений от вектора моментов времени завершения задач в соответствии с заданным планом вычислительного процесса в условиях деструктивных воздействий:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \prod_{j=1}^{\mu} (1 - \alpha_j \cdot G_j(t_i))}{\max_i \{t_i\}}. \quad (7)$$

Это выражение является искомой аналитической моделью вычислительного процесса при деградации бортовой вычислительной системы.

Новизна предложенной модели заключается в том, что показатель качества функционирования БВС КА учитывает как предельно возможную результативность, так и оперативность функционирования БВС КА и зависит не только от плана назначения задач на вычислительные модули БВС, но и закона распределения времени деградации БВС КА.

ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДЕГРАДИРУЮЩЕЙ БВС

Рассмотрим пример моделей функционирования БВС КА и оценим предельно возможную результативность функционирования БВС для различных вариантов планирования параллельного вычислительного процесса.

Известны три правила (алгоритма) назначения задач на вычислительные модули БВС:

- 1) списковое планирование [5] с правилом назначения задач «меньшая по длительности задача назначается раньше других» (функция приоритетов задач LTM);
- 2) списковое планирование с правилом назначения задач «большая по длительности задача назначается раньше других» (функция приоритетов задач GTM);
- 3) алгоритм Multi-Fit [6] назначения задач (назовем это правило Multi-Fit).

Далее увидим, что порядок назначения задач на вычислительные модули определяет значение показателей (1)–(3).

Пусть имеется 10 задач с длительностями соответственно 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 единиц времени, выполняемых на трех процессорах. Директивный срок завершения выполнения всех задач – 20 единиц времени.

Оценим три плана вычислений: LTM, GTM, Multi-Fit, которые представлены на рис. 3. Время w вычислений (длина расписания) в соответствии с указанными планами составляет 22, 19 и 19 единиц времени соответственно.

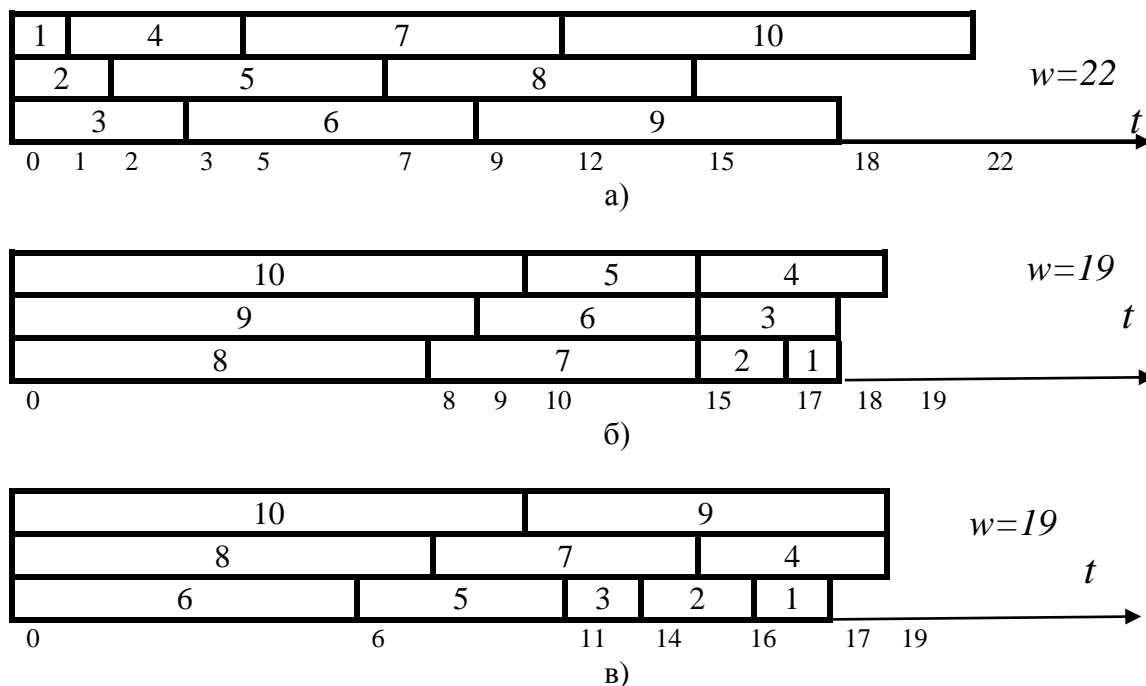


Рис. 3. Планы параллельных вычислений:
 а – LTM; б – GTM; в – Multi-Fit

Вектор $\Xi = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ моментов времени завершения выполнения задач для различных планов вычислительного процесса представлен в табл. 1.

Таблица 1
 Моменты времени завершения выполнения задач

| № задачи | Multi-Fit | GTM | LTM |
|----------|-----------|-------|-------|
| | t_i | t_i | t_i |
| 1 | 19 | 18 | 1 |
| 2 | 16 | 17 | 2 |
| 3 | 14 | 18 | 3 |
| 4 | 19 | 19 | 5 |
| 5 | 11 | 15 | 7 |
| 6 | 6 | 15 | 9 |
| 7 | 15 | 15 | 12 |
| 8 | 8 | 8 | 15 |
| 9 | 19 | 9 | 18 |
| 10 | 10 | 10 | 22 |

Рассмотрим четыре варианта деструктивных воздействий (ДВ) на БВС, различающихся законом распределения момента времени реализации ДВ [4].

Вариант 1 – равномерный закон распределения времени реализации ДВ.

Этот вариант соответствует неопределенности момента воздействия. Функция $F(t)$ распределения времени реализации деструктивных воздействий (6) будет иметь вид

$F(t) = \frac{t}{t_\Delta}$, где t_Δ – момент времени завершения интервала функционирования БВС КА (в примере это значение принято равным $t_\Delta = 25$ единиц).

Вариант 2 – экспоненциальный закон распределения времени реализации ДВ.

Этот вариант характеризует надежность БВС КА при штатном функционировании и соответствует вероятности ее отказа вследствие дефектов аппаратуры. Функция $F(t)$ распределения времени завершения вычислений (6) будет иметь вид $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, где λ – интенсивность отказов БВС КА (в примере это значение принято равным $\lambda = 0,1$).

Вариант 3 – распределение времени реализации ДВ по закону Вейбулла.

Функция $F(t)$ распределения времени завершения вычислений (6) будет иметь вид

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k\right], \text{ где } \lambda \text{ – параметр масштаба распределения (в примере это значение}$$

принято равным $\lambda = 20$), k – параметр формы распределения (в примере это значение принято равным $k = 0,5$).

Вариант 4 – одновременно три вышеперечисленных вида ДВ («групповое ДВ»), вероятность проведения каждого из которых составляет $\alpha_j = 1, j = 1, 2, 3$, что соответствует закону распределения минимума случайных величин (6).

Подставим моменты времени завершения задач (табл.1) в выражения показателей качества функционирования БВС для каждого варианта функций распределения моментов времени реализации ДВ и трех рассмотренных алгоритмов планирования параллельных вычислений. Получим значения показателей предельно возможной результативности вычислений (4), оперативности расчетов (2) и обобщенного показателя качества функционирования БВС (7), представленные в табл. 2.

Таблица 2

Значение показателей качества функционирования БВС КА

| Вариант распределения ДВ | Multi-Fit | | | GTM | | | LTM | | |
|--------------------------|-----------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|
| | R_w | R_t | R | R_w | R_t | R | R_w | R_t | R |
| Равномерное | 0,4924 | 2,8947 | 1,4254 | 0,4931 | 2,8947 | 1,4274 | 0,4844 | 2,5000 | 1,2110 |
| Экспоненциальное | 0,3102 | | 0,8979 | 0,3013 | | 0,8722 | 0,3382 | | 0,8455 |
| Распределение Вейбулла | 0,4618 | | 1,3368 | 0,4583 | | 1,3267 | 0,4752 | | 1,1880 |
| Групповое ДВ | 0,0897 | | 0,2595 | 0,0806 | | 0,2333 | 0,1291 | | 0,3227 |

Анализ представленных в примере данных показывает, что вид распределения ДВ и порядок назначения задач на вычислительные модули влияют на показатели результативности и оперативности функционирования БВС. В приведенном примере разница в значении обобщенного показателя качества функционирования БВС при одиночном ДВ составляет более 17%, при групповом – более 38%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход к моделированию функционирования деградирующей бортовой вычислительной системы КА позволяет оценивать предельно возможную результативность решения целевых задач с учетом временных затрат на проведение расчетов.

Рассмотренная модель обеспечивает оперативное оценивание обобщенного показателя качества функционирования БВС КА, что позволяет выбрать рациональный план ПВП из

множества планов, сформированных различными алгоритмами планирования параллельных вычислений.

Анализ влияния на показатели качества функционирования БВС КА как вида распределения моментов времени деградации БВС, так и алгоритма планирования параллельной обработки задач, показывает актуальность совершенствования методов планирования параллельных вычислений с учетом деградации БВС КА.

Список используемых источников

1. Модели и методы исследования информационных систем: моногр. / под ред. А.Д. Хомоненко. – СПб.: Лань, 2019. – 204 с.
2. Басыров А.Г., Захаров И.В., Забузов В.С. Метод превентивного функционально-параметрического конфигурирования бортовой вычислительной системы космического аппарата на основе прогнозирования ее деградации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С.183–193.
3. Цилькер Б.Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем: учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 668 с.
4. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
5. Кустов В.Н. Основы теории ограниченного структурного параллелизма. – Министерство обороны РФ, 1992. – 246 с.
6. Kunde M. A multifit algorithm for uniform multiprocessor scheduling // Bericht 8203. – Kiel: Institut für Informatik und Praktische Mathematik, 1982. – P. 175–185.

А.С. Васильев,
кандидат техн. наук, доцент;
А.В. Калюжный;
В.В. Ширококов,
кандидат техн. наук

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ МИКРОСПУТНИКОВ

В статье рассмотрен подход к организации информационных процессов на основе технологий функционально-распределенных вычислений в перспективной орбитальной группировке микроспутников, построенной по технологии распределенного космического аппарата, в котором взаимодействие осуществляется между микроспутниками-клиентами по высокоскоростным каналам связи, а обработка данных осуществляется одним или несколькими выделенными микроспутниками-серверами, на борту которых установлена высокопроизводительная вычислительная система.

Ключевые слова: планирование параллельной обработки информации, группировка микроспутников, бортовая вычислительная система.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной компонентной базы позволило миниатюризировать космические аппараты. Одним из направлений развития перспективных космических систем является создание многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ) на базе микроспутников (МС), которые образуют кластер. Примером создания таких группировок является система Jilin-1, которая представляет собой спутниковую систему дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), разработанная компанией Changguang Satellite Technology Co. Микроспутники Gaofen-03 весят 42 кг и имеют солнечно-синхронную орбиту высотой 540 км. Девять запущенных МС способны формировать изображения с разрешением около 1 м.

Под кластером понимается совокупность МС как различного, так и одинакового целевого назначения. При этом предполагается, что данные МС совместно выполняют общую задачу, и управляются как единый космический объект.

Как один из перспективных вариантов при формировании кластера следует рассматривать систему «Фрагментированный космический аппарат». Все информационные процессы в этой системе распределяются по множеству МС. При такой реализации система не является структурно целостной, но продолжает сохранять функциональную целостность [1]. Данный подход позволяет адаптивно организовывать управление вычислительными средствами [2], что в конечном итоге позволяет повысить эффективность функционирования ОГ в целом. Обеспечение распределенной обработки информации по технологии «облачных вычислений» осуществляется за счет выделения в кластере одного или нескольких МС, обладающих мощной бортовой вычислительной системой [3].

В предлагаемом подходе используются следующие технологии:

1) технология объединения информационно-вычислительных ресурсов, благодаря которой данные с целевой аппаратуры МС-«клиента» (МС-К) могут обрабатываться на обособленном МС-«сервере» (МС-С) кластера;

2) технология распределения задач между МС, благодаря которой МС-К с установленной соответствующей целевой аппаратурой могут выполнять поставленные задачи (ДЗЗ, связи, навигации).

Применение указанных технологий позволяет минимизировать требования к аппаратным ресурсам МС-К, выполняющих роль сенсоров (ДЗЗ), что в свою очередь позволяет уменьшить их энергозатраты. Также появляется возможность перенести часть вычислительной нагрузки на один или несколько МС-С.

НАПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Одним из подходов к ускорению обработки информации является повышение производительности бортовой вычислительной системы (БВС) МС-С, что приводит к увеличению числа вычислительных модулей (ВМ) в составе БВС и, как следствие, к росту их энергопотребления при обработке данных. Возможным решением данного противоречия может быть организация энергоэффективных вычислений на основе управления вычислительным процессом, которые включают в себя управление ресурсами БВС, планирование и реализацию вычислительного процесса [4, 5].

Основными направлениями организации энергоэффективных параллельных вычислительных процессов являются:

1) построение моделей целевых задач, содержащих степень параллелизма, соответствующую архитектуре параллельной БВС, и выбор архитектуры БВС, адекватной моделям целевых задач;

2) оптимизация алгоритмов целевых задач в направлении снижения числа вычислительных операций;

3) представление алгоритмов целевых задач в объектных кодах программ, адекватных архитектуре микропроцессоров БВС;

4) оптимизация количества ВМ при обеспечении требований по производительности и надежности функционирования БВС;

5) оптимизация загрузки ВМ;

6) оптимизация реализации вычислительных процессов;

7) применение новых архитектурных и технологических решений, направленных на создание и применение высокопроизводительных микропроцессоров с пониженным энергопотреблением.

Организация параллельности вычислений, когда в один и тот же момент выполняется одновременно несколько операций обработки данных, осуществляется, в основном, за счет введения избыточности функциональных устройств (многопроцессорности, многоядерности). В этом случае можно достичь ускорения процесса решения вычислительных заданий. Подобный подход требует организации планирования энергоэффективной параллельной обработки информации, при которой задействуется минимальное число ВМ.

Эффективность алгоритмов оценивается по времени их работы, т. е. по количеству необходимых операций, которые выполняются в алгоритме для составления плана. Разработанный алгоритм относится к классу приближенных алгоритмов «Первый подходящий с упорядочиванием» (FFD), трудоемкость которого составляет $O(n^2)$. Планирование проводится априорно до поступления данных на обработку. Результат планирования определяет подмножество данных, которые могут быть обработаны к заданному сроку, что позволяет выбрать подмножество задействованных в съемке и передаче данных наблюдения МС из ОГ [6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходя из вышесказанного, постановка задачи может выглядеть следующим образом.

Дано:

1) важность i -го поступившего входного задания (w_i);

- 2) время выполнения (длительность обработки данных с учетом алгоритмов) i -го задания (Δt_i);
- 3) предварительное время поступления (раннего начала выполнения) i -го задания (τ_i);
- 4) погрешность времени поступления i -го задания (с учетом накопленной статистики поступления заданий по предыдущим обработкам) ($\Delta \tau_i$);
- 5) директивное время завершения обработки всех данных (t^A);
- 6) количество заданий, поступивших на обработку (k);
- 7) количество ВМ, позволяющих обработать входные задания по заданному алгоритму (n).

Требуется произвести планирование заданий на множество ВМ БВС с учетом моментов времени поступления заданий и их возможных задержек так, чтобы суммарная важность назначенных заданий была максимальной. План выполнения поступивших заданий определяется значениями двоичных коэффициентов $a_{ij} \in [0, 1]$, указывающих на назначение i -го задания на j -й ВМ, а также моментами времени τ_i^s начала выполнения i -го задания и количеством n задействованных ВМ, обеспечивающим выполнение следующего условия:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_i \rightarrow \max. \quad (1)$$

Решаемая задача формулируется как поиск среди всех возможных вариантов такого варианта назначения заданий на ВМ, который обеспечивает максимальную сумму важности назначенных заданий и максимальную загрузку ВМ. Предполагается, что минимально необходимое число n ВМ определяется в процессе назначения заданий на соответствующие ВМ. При этом необходимо учитывать, чтобы время выполнения составленного расписания не превышало установленный директивный срок t^A обработки поступивших заданий на n ВМ.

Ограничения при решении задачи: необходимо, чтобы время окончания выполнения составленного расписания не превысило директивное время завершения вычислений t^A , и при этом использовалось минимальное число ВМ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_i (a_{ij} \cdot (\tau_i^s + \Delta \tau_i + \Delta t_i)) \leq t^A, \forall j = 1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} \leq 1, \forall i = 1, \dots, k, \\ \tau_i + \Delta \tau_i \leq \tau_i^s, \forall i = 1, \dots, k, \\ (\tau_\beta^s, \tau_\beta^s + t_\beta) \cap (\tau_\gamma^s, \tau_\gamma^s + t_\gamma) = \emptyset \mid a_{\beta j} + a_{\gamma j} = 1, \forall \beta, \gamma, j. \end{array} \right. \quad (2)$$

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Стратегия предлагаемого алгоритма планирования заключается в том, что прогнозирование загрузки ВМ производится путем предсказания динамики поступления заданий, представляющих собой последовательность операций по обработке данных, полученных с целевой аппаратуры МС, с учетом возможных задержек поступления заданий, связанных с передачей данных в каналах связи и информационной важности заданий.

Предложенный алгоритм можно разделить на несколько этапов. В первую очередь, выделяется набор входных заданий и определяется их условный вес, который характеризуется отношением важности задания ко времени его обработки на ВМ. Далее осуществляется рас-

пределение поступивших заданий на ВМ в следующей последовательности: первыми подлежат распределению задания, имеющие максимальный вес, затем распределяются задания меньшие по весу и т.д.

Планирование выполняется циклически, путем перебора всех возможных вариантов, каждый раз начиная с первого ВМ. Перед назначением очередного задания на ВМ проверяется резерв свободного времени на этом процессоре. При отсутствии необходимого резерва проводится попытка назначить задание на следующий ВМ.

При наличии резерва времени проверяется возможность назначения задания на обработку в планируемый момент времени его поступления. Если в этот момент ВМ загружен другим заданием, то начало обработки очередного задания переносится на конец обработки загруженного. Если же в планируемый момент времени поступления очередного задания ВМ свободен, но до момента завершения задания планируется выполнение другого задания, то начало выполнения последнего сдвигается вправо до момента окончания первого. В любом случае возможны сдвиги вправо назначенных ранее на процессор заданий. ВМ максимально загружается до директивного времени завершения вычислений заданиями, выбираемыми из очереди в порядке убывания их условных весов.

Процедура планирования завершается либо при назначении всех заданий из очереди, либо при отсутствии необходимых для назначения заданий резервов времени на всех ВМ.

При планировании возможен учет задержек поступления заданий относительно расчетных моментов времени. Учет заключается в увеличении планируемых моментов времени поступления заданий на обработку на некоторый интервал времени. Добавляемый временной интервал формируется на основе статистических сведений, накопленных по результатам предыдущих поступивших заданий и их обработок [7]. Статистика о погрешности расчетных моментов времени, полученная после реализации плана, сохраняется и учитывается при последующих формированиях плана.

Рассмотрим общую структуру алгоритма.

Шаг 1. Начало алгоритма.

Шаг 2. Ввод исходных данных.

Шаг 3. Инициализация (обнуление) матрицы $\gamma = \|a_{ij}\|$ назначений задания i на процессор j ,

где

$$\begin{cases} 1, & \text{если задание } i \text{ будет обрабатываться на процессоре } j, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 4. Вычисление условного веса λ_i каждого i -го задания:

$$\lambda_i = \frac{w_i}{t_i}, \quad \forall i = 1, \dots, k.$$

Шаг 5. Перенумерация заданий согласно правилу:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_k.$$

Шаг 6. Инициализация номера назначаемого задания $i := 1$.

Шаг 7. Инициализация номера используемого процессора $n := 0$.

Шаг 8. Увеличение номера используемого процессора $n := n + 1$.

Шаг 9. Назначение задания i на процессор j .

Шаг 9.1. Определение резерва r процессорного времени:

$$r = t^n - \tau_i + \Delta\tau_i - \sum_{l=1}^k a_{ij} \cdot \max\left(0, \tau_l^f - \max(\tau_i + \Delta\tau_i, \tau_l^s)\right),$$

где τ_l^s и τ_l^f – момент времени начала и окончания выполнения задания l соответственно.

Шаг 9.2. Если $r < \Delta t_i$, то переход на шаг 8.

Шаг 9.3. Если $\exists l : u_{lj} \cdot \tau_l^s < \tau_i + \Delta\tau_i < u_{lj} \cdot \tau_l^f$, то $\tau_i^s := \tau_l^f$, иначе – $\tau_i^s := \tau_i + \Delta\tau_i$.

Шаг 9.4. $\tau_i^f := \tau_i^s + \Delta t_i$.

Шаг 9.5. Для всех заданий, назначенных ранее на процессор j , в порядке возрастания моментов τ_i^s начала их выполнения добиться выполнения условий $\tau_y^s \geq \tau_x^f \mid \tau_x \leq \tau_y$, $x, y \in [1, k]$ путем сдвига вправо моментов времени начала выполнения соответствующих заданий.

Шаг 10. Увеличение номера задания: $i := i + 1$. Если $i \leq k$, то переход на шаг 7, иначе – на шаг 11.

Шаг 11. Конец алгоритма.

Выходные данные алгоритма:

Ψ – план (расписание) обработки заданий;

a_{ij} – массив заданий, которые будут выполнены согласно плану Ψ ;

n – количество задействованных ВМ.

Пример распределения k заданий на n ВМ с учетом директивного времени завершения вычислений показан на рис. 1.

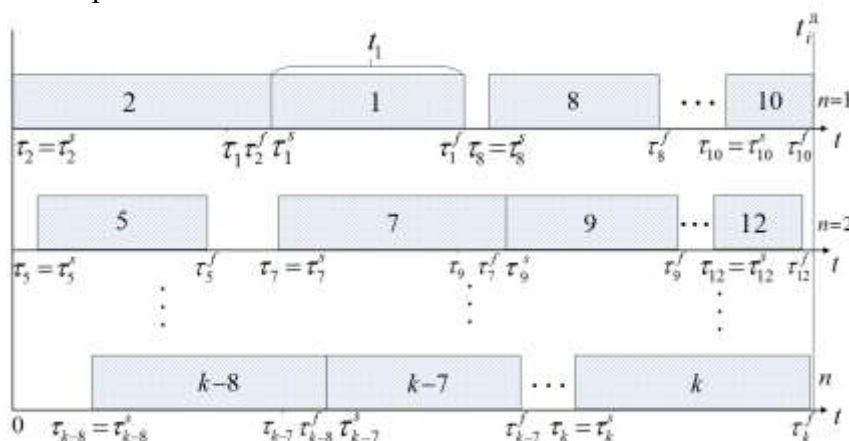


Рис. 1. Пример расписания

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Анализ показателей эффективности применения разработанного алгоритма планирования осуществлялся на основе собранной статистики с использованием разработанного программного обеспечения, позволяющего генерировать случайные последовательности поступления заданий на ВМ. При имитационном моделировании алгоритмов планирования (дисциплины обслуживания очереди поступления заданий) использовались прогнозируемые длительности выполнения поступающих заданий [8].

Статистика наилучшего планирования разработанного алгоритма в существенной степени зависит от применяемого набора тестовых примеров и исходных данных, поэтому генерируемые наборы назначаемых заданий обладают свойствами, приближенными к практической направленности алгоритма. В связи с этим была использована предложенная процедура автоматической генерации примеров, как времени поступления заданий, задержек при поступлении, а также длительностей их обработки. В ходе эксперимента осуществлялась генерация 1000 тестовых вариантов входных вычислительных нагрузок для каждой ВМ. В ходе генера-

ции входных нагрузок в первую очередь осуществлялась случайная генерация временных моментов их поступления, погрешности времени их поступления на обработку в бортовой вычислитель, а также их вычислительная сложность.

На рис. 2 показана зависимость частоты совпадения плана, составленного при помощи предложенного алгоритма, с оптимальным планом, составленным методом полного перебора, от числа вычислителей.

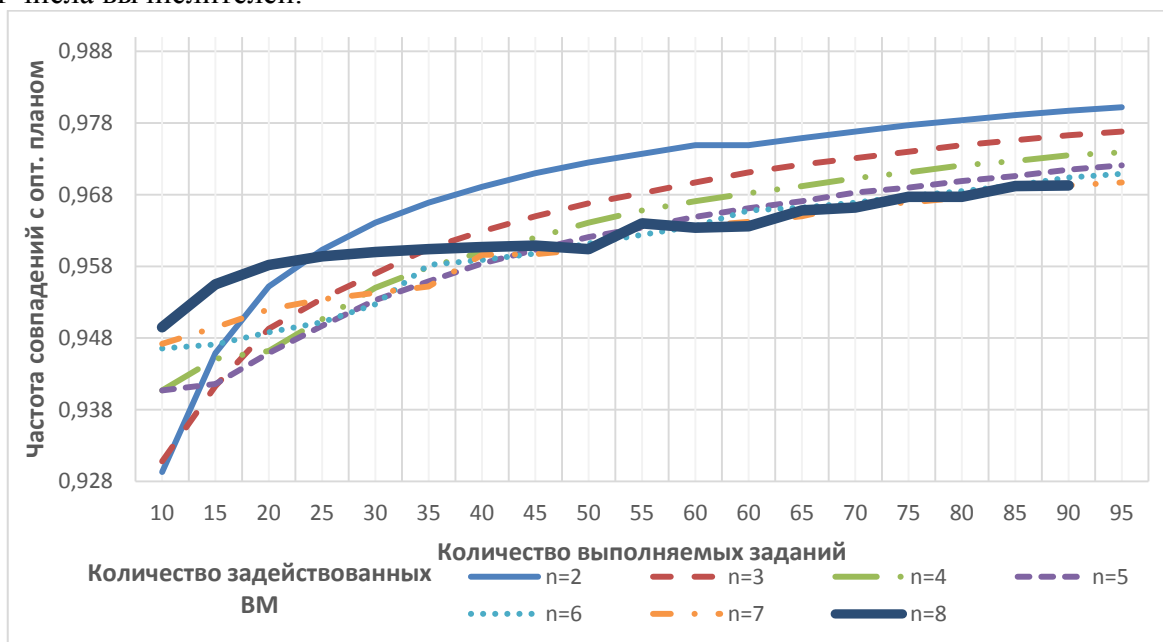


Рис. 2. Зависимость частоты совпадения плана, составленного при помощи предложенного алгоритма, с оптимальным планом

На рис. 3 показана зависимость частоты совпадений результатов предлагаемого алгоритма с оптимальным планом от количества задействованных ВМ при неодинаковом количестве выполняемых заданий.

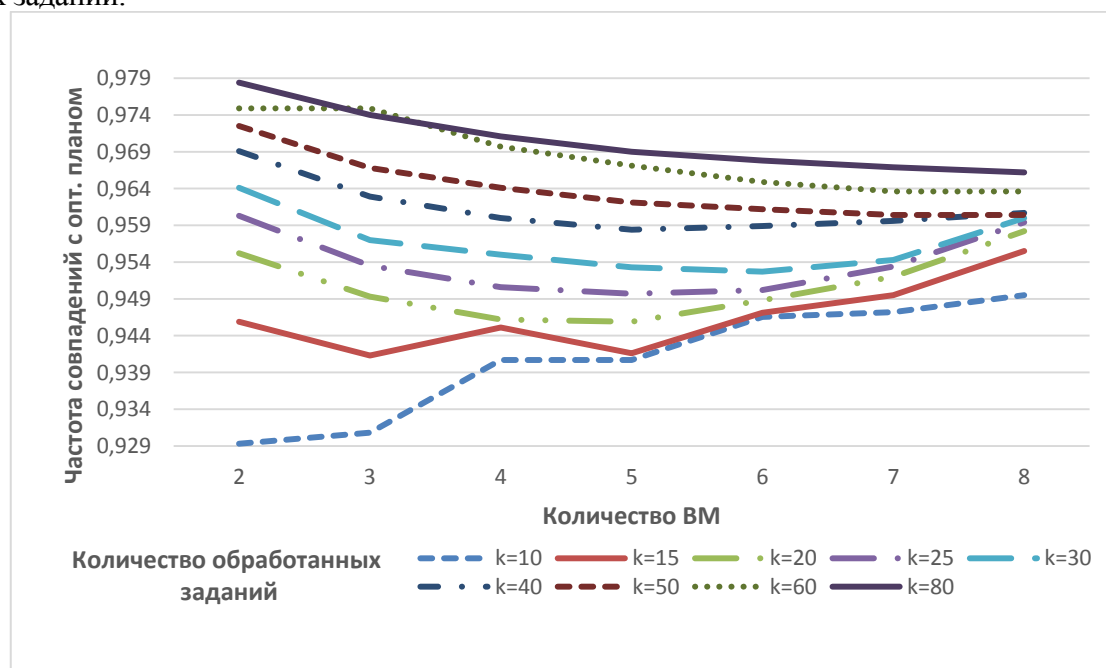


Рис. 3. Зависимость частоты совпадений результатов предлагаемого алгоритма с оптимальным планом от количества задействованных ВМ

Для каждой точки моделировалось по 1000 тестовых вариантов входных вычислительных нагрузок. В результате при доверительной вероятности, равной 0,95, доверительный интервал среднего значения отклонения результата планирования от оптимального составил 0,5%. Сравнивая информацию, представленную на рис. 2 и 3, можно видеть, что эффективность планирования зависит от рассматриваемого количества обработанных заданий.

Длительности заданий моделировались в условных единицах на основе датчика равномерно распределенной на интервале [10, 100] случайной величины, длительности задержек поступления заданий в интервале [0, 5] при допустимом количестве задействованных ВМ от 2 до 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования разработанного алгоритма показал, что отклонения в плане, составленном при помощи описанного алгоритма, от оптимального плана, составленного методом полного перебора, не превышает 0,5%.

Применение технологии функционально-распределенных вычислений, которая лежит в основе предлагаемого подхода к организации информационных процессов в перспективной ОГ МС, построенной по технологии распределенного КА, дает возможность организовать ресурсосберегающую обработку данных в кластере МС, позволяющую повысить производительность функционирования кластера МС в целом. Разработанный алгоритм планирования в дальнейшем может быть применен при организации энергоэффективной распределенной обработки данных в динамически изменяющихся автономных сетевых структурах.

Список используемых источников

1. *Карсаев О.В.* Обзор традиционных и инновационных систем планирования миссий КА // Труды СПИИРАН. – 2016. – №5(48). – С. 151–181.
2. *Басыров А.Г., Дудкин А.С., Ширококов В.В.* Организация распределенной обработки информации в динамически изменяющейся вычислительной среде // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 649. – С. 64–71.
3. *Городецкий В.И.* Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – №1(10). – С. 40–54.
4. *Ширококов В.В.* Алгоритм планирования рабочей нагрузки параллельной вычислительной системы при энергосберегающей обработке информации в централизованной информационно-вычислительной сети // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники. – 2016. – С. 255–259.
5. *Минаков Е.П., Басыров А.Г.* Бортовая вычислительная система микроспутника «СОЮЗ-САТ-О» и ее программное обеспечение // Информация и космос. – 2011. – №1. – С. 15–18.
6. *Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струсевиц В.А.* Теория расписаний. Многостадийные системы. – М.: Наука, 1989. – 328 с.
7. *Таненбаум Э.* Современные операционные системы. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2002. – 1040 с.
8. *Herz E.* Onboard Autonomous Planning System // Proceedings of the 14-th International Conference on Space Operations. SpaceOps AIAA. – 2014. – URL: arc.aiaa.org (дата обращения: 21.11.2020). – DOI: 10.2514/6.2014-1783.

В.С. Гончаревский,
доктор техн. наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМНЫМ МАНЕВРОМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Излагается решение вариационных задач по отысканию оптимальных программ управления относительным движением космических аппаратов в свободном пространстве. В результате решения задачи с фиксированными концами получена оптимальная программа управления относительным движением, найдены оптимальные законы изменения относительной скорости и относительного управляющего ускорения, а также соответствующий им показатель энергозатрат. Решение задач с подвижными концами позволило определить оптимальные значения таких параметров программы управления, как время и начальные условия выполнения взаимного маневра космических аппаратов.

Ключевые слова: взаимный маневр, программа управления, относительное движение, энергетические затраты.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование оптимальных программ управления относительным движением (ОД) космических аппаратов (КА) в свободном пространстве представляет интерес по двум основным причинам. Во-первых, эти программы имеют наиболее простую структуру для технической реализации. Поэтому при выполнении взаимных маневров КА, близким по условиям к управляемому движению в свободном пространстве (например, маневр причаливания при осуществлении встречи КА с мягким контактом, который характеризуется малым значением времени его выполнения и небольшим рассогласованием по относительной дальности), целесообразна непосредственная их реализация. Во-вторых, основные результаты, полученные при их исследовании (например, значения оптимальных краевых условий и времени выполнения взаимного маневра КА), могут служить первой приближенной оценкой соответствующих значений параметров оптимального управления ОД в реальном силовом пространстве. Отыскание таких программ управления приводит к соответствующим вариационным задачам с фиксированными и подвижными концами. Ниже приводятся основные результаты их решения.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧАХ С ФИКСИРОВАННЫМИ КОНЦАМИ

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику ОД КА, могут быть записаны в векторно-матричной форме [1]:

$$d\vec{R} / d\tau = \vec{V}, \quad d\vec{V} / d\tau = A\vec{R} + B\vec{V} + \vec{U}, \quad (1)$$

где \vec{U} — управляющее ускорение;
 \vec{R} — вектор относительного положения КА;
 \vec{V} — вектор относительной скорости КА;
 τ — текущее время;
 A, B — квадратные матрицы третьего порядка, вид которых определяется типом орбит КА.

В случае ОД в свободном пространстве матрицы A, B в динамической модели (1) являются нулевыми, и она принимает вид

$$d^2 \vec{R} / d\tau^2 = \vec{U}. \quad (2)$$

Так как уравнения ОД по всем трем компонентам вектора \vec{R} одинаковы, то в дальнейшем для упрощения записи опустим знаки векторов, а под скаляром r_i будем понимать любую из трех координат КА, т.е.

$$d^2 r_i / d\tau^2 = u_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Функционал, характеризующий энергетические затраты (ЭЗ) на выполнение маневра по этой координате,

$$I_i = \int_{\tau_0}^{\tau_k} \dot{r}_i^2 d\tau, \quad (4)$$

а уравнение Эйлера-Пуассона

$$d^2 \dot{r}_i / d\tau^2 = d^4 r_i / d\tau^4 = 0, \quad (5)$$

где τ_0, τ_k – моменты начала и окончания маневра.

Для реализации минимума функционала необходимо удовлетворить уравнению Эйлера-Пуассона и условиям Клебша-Лежандра [2–8]. Условия Клебша-Лежандра в рассматриваемом случае выполняются, так как

$$\frac{d^2 F}{d\dot{r}_i^2} = 2 > 0, \quad (6)$$

где $F = \dot{r}_i^2$.

Следовательно, экстремаль

$$r_i = C_{1i} + C_{2i}\tau + C_{3i}\tau^2 + C_{4i}\tau^3, \quad (7)$$

являющаяся общим решением уравнения (5), доставляет функционалу (4) минимум.

Произвольные постоянные, определенные из краевых условий

$$r_i(\tau_0) = r_{i0}, \quad r_i(\tau_k) = r_{ik}, \quad v_i(\tau_0) = v_{i0}, \quad v_i(\tau_k) = v_{ik}, \quad (8)$$

равны

$$\begin{aligned} C_{1i} &= r_{i0}, \quad C_{2i} = v_{i0}, \quad C_{3i} = -[3(r_{i0} - r_{ik}) + (2v_{i0} + v_{ik})T] / T^2, \\ C_{4i} &= [2(r_{i0} - r_{ik}) + (v_{i0} + v_{ik})T] / T^3, \end{aligned} \quad (9)$$

где $T = \tau_k - \tau_0$.

Законы изменения оптимальной скорости

$$v_i = C_{2i} + 2C_{3i}\tau + 3C_{4i}\tau^2, \quad (10)$$

а оптимального управляющего ускорения

$$\ddot{r}_i = 2C_{3i} + 6C_{4i}\tau. \quad (11)$$

Таким образом, оптимальная программа управления имеет вид

$$u_i = 2C_{3i} + 6C_{4i}\tau, \quad (12)$$

а оптимальное значение показателя ЭЗ

$$I_{i_9} = 12(r_{i0} - r_{ik})^2 / T^3 + 12(v_{i0} - v_{ik})(r_{i0} - r_{ik}) / T^2 + \\ + [(v_{i0} - v_{ik})^2 + 3(v_{i0} - v_{ik})] / T. \quad (13)$$

Суммарное значение ЭЗ на выполнение маневра по всем трем координатам

$$I_9 = \sum_{i=1}^3 I_{i_9}. \quad (14)$$

Условия трансверсальности для функционала (4)

$$(F_{v_i} - dF_{\dot{v}_i} / d\tau)\delta r_i + (F_i - v_i F_{v_i} - \dot{v}_i F_{\dot{v}_i})\delta\tau + F_{\dot{v}_i}\delta v_i \left| \begin{array}{l} \tau_k = T \\ = 0, \\ \tau_0 = 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

где $F_i = \dot{v}_i^2$, $F_{v_i} = dF_i / dv_i$, $F_{\dot{v}_i} = dF_i / d\dot{v}_i$.

Используя эти условия, можно поставить вариационные задачи с подвижными концами, в результате решения которых определяются оптимальные значения таких параметров программ управления как время маневра T , начальные и конечные скорости v_{i0} , v_{ik} и т.д.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧАХ С ПОДВИЖНЫМИ КОНЦАМИ

Оптимальное время маневра T_9 определяется в результате решения вариационной задачи с подвижным левым концом по времени. Правый и левый концы экстремалей закреплены по координатам и скоростям, т.е. постоянные интегрирования находятся из краевых условий (8) и равны значениям (9). Однако, так как левый конец свободен по времени, то на постоянные интегрирования (9) накладывается дополнительная связь, которую можно использовать для отыскания T_9 . Эта связь может быть получена из условий (15), если в них положить $\delta r_i = \delta v_i = \delta\tau_0 = 0$. В результате имеем

$$(F_i - v_i F_{v_i} - \dot{v}_i F_{\dot{v}_i}) \Big|_{\tau = T_i} = 0. \quad (16)$$

Из условия (16) следует:

$$\dot{v}_{ik}^2 = (2C_{3i} + 6C_{4i}T_{i_9})^2 = 0. \quad (17)$$

Решая уравнение (17) относительно T_{i_9} , получаем

$$T_{i_9} = 3(r_{ik} - r_{i0}) / (v_{i0} + 2v_{ik}). \quad (18)$$

Видно, что T_{i_9} возрастает с увеличением разницы между начальными и конечными значениями координат и с уменьшением модулей начальной и конечной скоростей. Экстремальное значение показателя ЭЗ при $T_i = T_{i_9}$

$$I_{i_9} = 4(v_{i0} + 2v_{ik})(v_{i0} - v_{ik})^2 / 9(r_{ik} - r_{i0}).$$

Оптимальная начальная скорость маневра v_{i0} , определяется в результате решения вариационной задачи с подвижным правым концом по скорости. Правый и левый концы экстремалей закреплены по координатам и времени, кроме того, левый конец закреплен по скорости. Постоянные интегрирования определяются из краевых условий:

$$r_i(\tau_0) = r_{i0}, \quad r_i(\tau_k) = r_{ik}, \quad v_i(\tau_k) = v_{ik}. \quad (19)$$

Четвертое краевое ограничение получаем из условий трансверсальности:

$$F_{\dot{v}_i} \Big|_{\tau_0} = 0 \quad \text{или} \quad \dot{v}_{i0} = 0. \quad (20)$$

Если подставить в условия (19) и (20) соотношение (7) и его производные, то получим систему линейных алгебраических уравнений четвертого порядка, в результате решения которых имеем следующие выражения для произвольных постоянных:

$$\begin{aligned} C_{1i} &= r_{i0}, & C_{2i} &= -[3(r_{i0} - r_{ik}) + v_{ik}T]/2T, \\ C_{3i} &= 0, & C_{4i} &= (r_{i0} - r_{ik} + v_{ik}T)/2T^3. \end{aligned} \quad (21)$$

Подставив эти значения в соотношения (7)–(14), получим искомые экстремали, оптимальные управляющие функции, экстремальный показатель ЭЗ, а также выражение для оптимальной начальной скорости:

$$v_{i0} = -0,5v_{ik} - 1,5(r_{i0} - r_{ik})/T, \quad (22)$$

$$u_{i0} = 3(r_{i0} - r_{ik} + v_{ik}T)\tau/T^3, \quad (23)$$

$$I_{i0} = 3(r_{i0} - r_{ik} + v_{ik}T)^2/T^3. \quad (24)$$

Для отыскания оптимальной конечной скорости v_{ik} , необходимо решить вариационную задачу с подвижным левым концом по скорости. Краевые условия для определения постоянных интегрирования имеют вид:

$$r_i(\tau_0) = r_{i0}, \quad v_i(\tau_0) = v_{i0}, \quad r_i(\tau_k) = r_{ik}. \quad (25)$$

Четвертое краевое ограничение получается из условия трансверсальности (15) и имеет вид

$$F_{\dot{v}_i} \Big|_{\tau = \tau_k = T} = 0 \quad \text{или} \quad \dot{v}_{ik} = 0. \quad (26)$$

С учетом условий (25), (26) получаем систему уравнений для определения постоянных, в результате решения которой имеем:

$$\begin{aligned} C_{1i} &= r_{i0}, & C_{2i} &= v_{i0}, & C_{3i} &= -3(r_{i0} - r_{ik} + v_{i0}T)/2T^2, \\ & & & & C_{4i} &= (r_{i0} - r_{ik} + v_{i0}T)/2T^3. \end{aligned} \quad (27)$$

Подставив эти значения в соотношения (7)–(14), получим искомые экстремали, оптимальные управляющие функции, экстремальный показатель ЭЗ, а также выражение для оптимальной конечной скорости:

$$v_{ik} = -0,5v_{i0} - 1,5(r_{i0} - r_{ik})/T,$$

$$u_{i0} = -3(r_{i0} - r_{ik} + v_{i0}T)(1 - \tau/T)/T^2, \quad (28)$$

$$I_{i0} = 3(r_{i0} - r_{ik} + v_{i0}T)^2/T^3.$$

Значения скоростей (22), (28) также могут служить первым приближением для расчета экстремальных начальных и конечных скоростей взаимного маневра КА в задачах с динамическими моделями ОД в силовом пространстве, учитывающими разностное гравитационное и кориолисово ускорения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены энергетически оптимальные программы управления КА в свободном пространстве. Они могут быть непосредственно реализованы при выполнении взаимного маневра КА в тех случаях, когда время маневра по сравнению с периодом обращения КА по орбите и начальное рассогласование по относительной дальности сравнительно невелики. Это, например, имеет место на этапе причаливания при осуществлении маневра сближения и стыковки КА. В других же случаях они могут служить приближенной оценкой соответствующих параметров энергетически оптимальных программ управления в силовом пространстве.

Главное достоинство программ, найденных в настоящей работе, – сравнительная простота их технической реализации при незначительных увеличении ЭЗ и снижении точности выполнения маневра по сравнению с оптимальными программами управления в силовом пространстве, полученными, например, в работе [9]. Необходимо отметить, что точность маневра в случае использования энергетически оптимальных программ управления в свободном пространстве при незначительном увеличении ЭЗ может быть еще повышена в результате подстановки экстремали вида (7) в уравнения дифференциальных связей, соответствующих динамической модели относительного движения КА в силовом пространстве.

Список используемых источников

1. Гончаревский В.С. Методы и алгоритмы управления относительным движением космических аппаратов. – Л.: МО РФ, 1998. – 87 с.
2. Буслаев В.С. Вариационное исчисление. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 288 с.
3. Гельфанд И.М. Фомин С.В. Вариационное исчисление. – М.: Физматгиз, 1961. – 228 с.
4. Гноенский Л. С. Каменский Г.А., Эльсгольц Л.С. Математические основы теории управляемых систем. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
5. Карташев А.П., Рождественский Б.Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления. – М.: Наука, 1976. – 256 с.
6. Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления. – Л.: Энергия, 1977. – 280 с.
7. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1969. – 424 с.
8. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения. – М.: Изд-во ЛКИ, 2014. – 312 с.
9. Гончаревский В. С. Оптимальное непрерывное управление взаимным маневром космических аппаратов без ограничений на вид траектории в орбитальной относительной системе координат // Информатика и космос. – 2016. – №1. – С. 143–147.

Д.И. Казанцев

МЕТОДИКА ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЦЕЛЕВЫХ ЗАДАЧ

Предложена методика виртуализации вычислительных ресурсов комплекса средств автоматизации. Рассмотрен процесс конфигурирования комплекса средств автоматизации на основе виртуализации вычислительных ресурсов, который может найти применение при создании (проектировании), эксплуатации и модернизации вычислительных систем, функционирующих с применением технологий виртуализации. Решение о конфигурировании принимается на основе разработанной системы правил нечеткого логического вывода, реализуемой в соответствии с алгоритмом Мандани. Методика может быть использована при оптимизации процессов функционирования комплекса средств автоматизации на основе виртуализации вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: конфигурирование, виртуализация, вычислительные ресурсы, комплекс средств автоматизации.

ВВЕДЕНИЕ

Использование технологий виртуализации, облачных технологий, контейнеризации становится неотъемлемой частью комплексов средств автоматизации (КСА). Виртуализация вычислительных ресурсов позволяет консолидировать рабочие нагрузки на физических ресурсах вычислительных систем, повысить эффективность использования вычислительных систем, сократить количество физических серверов, снизить эксплуатационные издержки, оперативно обслуживать поступающие заявки.

Проблемным вопросом организации виртуализации вычислительных ресурсов КСА является определение оптимального момента времени реконфигурации виртуальной машины для обеспечения максимальной производительности функционирования (интенсивности обслуживания заявок) при заданных ограничениях на ресурсоемкость и надежность при обслуживаниях неоднородного потока заявок.

В работах [1–4] рассмотрены особенности реализации и оптимизации виртуальной среды, миграции виртуальных машин. При этом не были учтены вопросы внесения изменений в конфигурацию, учета вероятности безотказной работы программного обеспечения и особенности поступающих на обработку заявок. Не уделено достаточного внимания проблеме формирования оптимальной конфигурации КСА, функционирующего на основе виртуализации вычислительных ресурсов, и определения оптимального момента реконфигурации виртуальных машин.

В общем виде организация виртуализации вычислительных ресурсов состоит из этапов:

- подготовка исходных данных для моделирования виртуальной среды КСА;
- начальное конфигурирование виртуальной среды КСА;
- реконфигурирование виртуальной среды КСА при существенных изменениях условий его функционирования;
- обоснование требований к программно-аппаратному обеспечению КСА.

В статье представлен один из наиболее сложных этапов – этап конфигурирования виртуальной среды, учитывающий параметры рабочей нагрузки (потока заявок). Этап заключается в формировании виртуальных машин и их периодической реконфигурации с учетом упомянутых выше особенностей.

ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ КСА

Принцип функционирования виртуальной вычислительной среды заключается в следующем. Разворачивается несколько виртуальных машин, каждая из которых содержит свой экземпляр операционной системы. На каждую виртуальную машину может устанавливаться различное программное обеспечение.

Своевременная обработка поступаемых на КСА данных возможна при наличии соответствующего технического и программного обеспечения, а также эффективного администрирования (настройки, обслуживания) этих средств.

Схема методики организации виртуализации вычислительных ресурсов представлена на рис. 1.

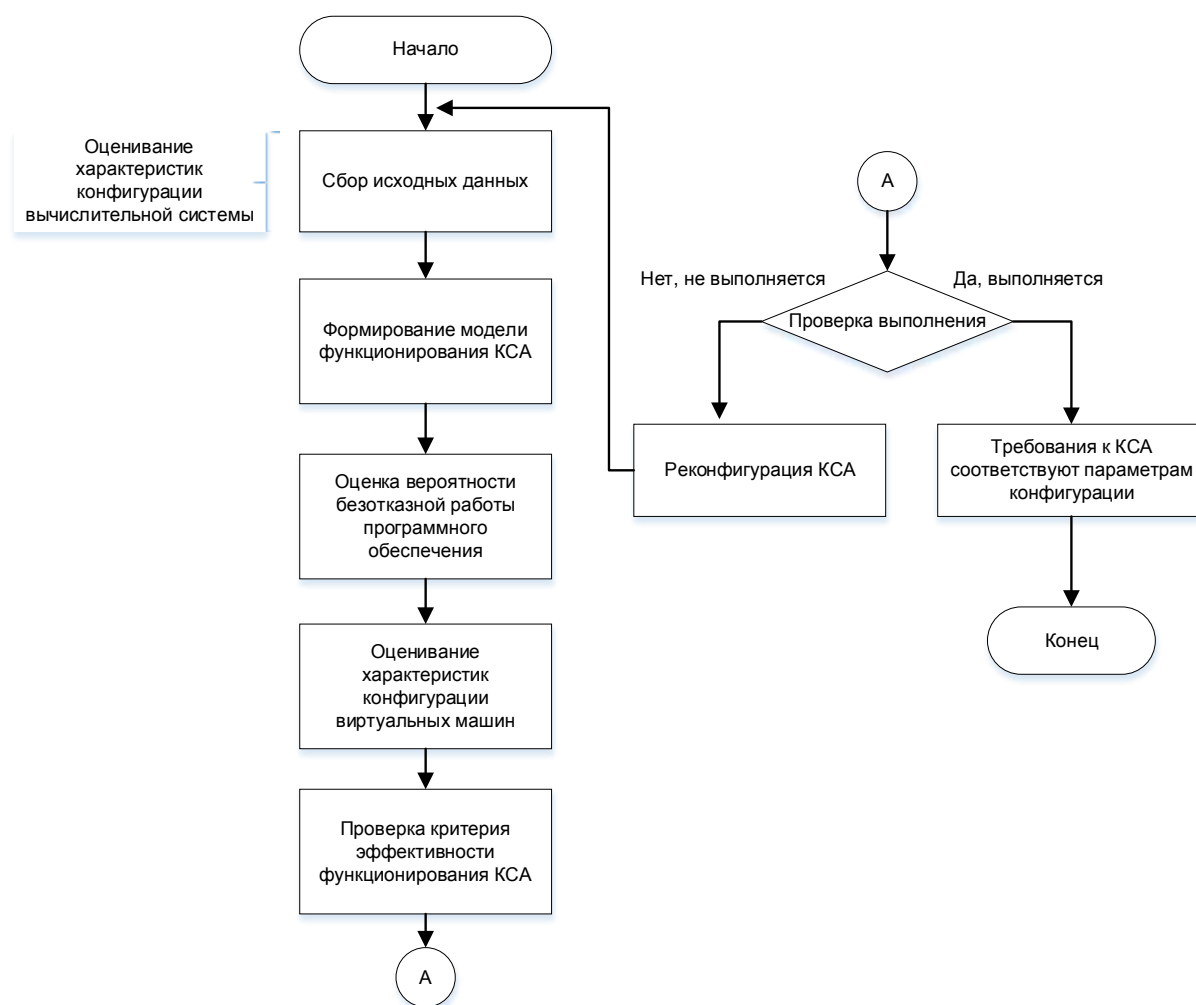


Рис. 1. Схема организации виртуализации вычислительных ресурсов

Каждый шаг, представленный на рис. 1, подразумевает под собой выполнение большого объема операций. Операции могут выполняться вручную, либо быть автоматизированы посредством использования специального программного обеспечения.

Для решения вопросов, указанных ранее, а именно определения момента выполнения реконфигурирования виртуальной среды, возможно применить один из подходов, аналогичных принятым в математическом аппарате фильтра Калмана, Альфа-Бета фильтре, нейронных сетях и др. Используемый подход прогнозирует возможный негативный эффект последнего конфигурирования, возникающий по причине изменения условий функционирования КСА, и основываясь на анализе текущих показателей среднего времени обслуживания заявки и роста длины очереди заявок, реализует упреждающее реконфигурирование виртуальной среды КСА.

АЛГОРИТМ КОНФИГУРИРОВАНИЯ КСА

Представленный алгоритм конфигурирования виртуальной среды КСА учитывает данные, полученные ранее при проведении экспериментов, изложенных в статье [5]. Каждый набор данных и их характеристики, полученные при исследованиях, влияет на эффективность функционирования КСА в целом.

Предлагаемый алгоритм конфигурирования включает следующие шаги.

Шаг 1. Выполняется определение вида и параметров функции распределения интенсивности Z суммарного потока заявок всех n типов, $Z = \sum_{i=1}^n z_i$, где z_i – интенсивность потока заявок за решение i -ой задачи (запуска i -го приложения).

Шаг 2. Каждый вид заявки суммарного потока классифицируются по приоритету обслуживания.

Шаг 3. Выполняется расчет требуемой производительности КСА, обеспечивающей допустимое время $t_i^{\text{доп}}$ выполнения заявки i -го типа.

Шаг 4. Выполняется классификация программного обеспечения, реализующего множество алгоритмов A обработки данных, по степени отказоустойчивости и типу необходимой операционной системы (Windows, Linux и т.д.).

Осуществляется выделение множества критического программного обеспечения $A^* \subseteq A$, требующего высоких показателей вероятности безотказной работы и реакции на обрабатываемые события в режиме, близком к режиму реального времени.

Шаг 5. Выполняется классификация программного обеспечения, реализующего множество алгоритмов A обработки данных, по следующим признакам: значению меры параллелизма в исходном коде программы (параллелизм уровня команд, потоков и процессов); по наличию параллелизма уровня данных и параллелизма уровня запросов.

Шаг 6. Создается система правил, регламентирующих допустимые варианты группировки элементов множества A , выполняющихся на одном хосте, с точки зрения обеспечения совместимости с управляющей операционной системой, требуемого уровня надежности и требуемых аппаратных ресурсов системы.

Различные варианты группировки программ на хосте обеспечивают отличия значения активной производительности КСА от значений, указанных в спецификации данных средств. Основными причинами возникающих отличий являются:

- интенсивная работа с данными приложения, требующая высокой пропускной способности системы памяти;
- наличие в приложениях больших объемов арифметических операций с плавающей запятой в режиме двойной точности;
- ограниченный объем кэш-памяти микропроцессоров;
- высокая временная и пространственная локальность данных, используемых приложениями в процессе выполнения алгоритмов;
- наличие в многопоточных приложениях атомарных секций программного кода.

Шаг 7. По результатам выполнения этапов 4–6 производится создание виртуальных машин для установки программного обеспечения (ПО), реализующего алгоритмы A^* . При этом используется аппаратное обеспечение $R^* \subseteq R$, обеспечивающее требуемое время обслуживания соответствующих заявок. Оставшиеся аппаратные ресурсы $R \cap \overline{R^*}$ распределяются между множеством ПО, реализующим алгоритмы $A \cap \overline{A^*}$. В целях минимизации потерь производительности КСА на виртуализацию аппаратных ресурсов и изоляцию процессов, принадлежащих к одному классу, целесообразно осуществлять с помощью более легковесных механизмов виртуализации (Ixc-контейнеров, cgroups и пространств имен).

Шаг 8. При увеличении числа компонентов распределенной вычислительной системы, синтезируемой с использованием технологий виртуализации, увеличивается и вероятность того, что некоторые из этих компонентов будут выходить из строя при реализации алгоритмов. В случае необходимости достижения высокой надежности эксплуатации ПО целесообразно применять алгоритмы обеспечения отказоустойчивости вычислительной системы [6].

Шаг 9. В случае невыполнения текущей конфигурацией системы требований к оперативности обслуживания заявок выполняется перераспределение (реконфигурирование) аппаратных ресурсов гипервизором. Принятие решения о целесообразности реконфигурации осуществляется на основе математического аппарата нечеткой логики и нечеткого логического вывода. В качестве меры, характеризующей необходимость выполнения реконфигурации, применяется функция принадлежности $\mu_l(\Delta R, t)$, где ΔR – дефицит аппаратных ресурсов на заданном хосте, t – продолжительность интервала времени, в течение которого наблюдается нехватка аппаратных ресурсов. Определение вида функции $\mu_l(\Delta R, t)$ осуществляется с использованием алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани.

Входной информацией алгоритма реконфигурации является множество параметров: $\Delta R, t$.

Выходной информацией алгоритма является значение меры необходимости выполнения реконфигурации: $I \in [0; 1]$.

Множество входных параметров алгоритма $\Delta R, t$ обозначим

$$V' = \{\alpha_1, \alpha_2\}, \quad (1)$$

где α_1 – численное значение ΔR ;

α_2 – численное значение t .

Множество соответствующих численным значениям (1) входных лингвистических переменных (ЛП) обозначим

$$V = \{\beta_1, \beta_2\}, \quad (2)$$

где β_1 – дефицит аппаратных ресурсов;

β_2 – продолжительность нестационарного режима работы хоста.

Выходная ЛП – «реконфигурация» характеризует меру необходимости выполнения реконфигурации в заданных условиях $\Delta R, t$ и обозначается I .

Для каждой ЛП определяются базовые терм-множества T с соответствующими функциями принадлежности каждого терма. Для рассматриваемых ЛП используется три терм-множества:

$$T_{\beta_i} = \{M, CP, B\},$$

где M – малое значение β_i ;

CP – среднее значение β_i ;

B – большое значение β_i .

Для выходной ЛП I используется три терм-множества:

$$T_I = \{HC, BC, C\},$$

где HC – реконфигурация не состоится;

BC – реконфигурация, возможно, состоится;

C – реконфигурация состоится.

Функции принадлежности $\mu(CP)$, $\mu(BC)$ характеризуются треугольными нечеткими числами вида $\langle a, \alpha, \beta \rangle$, где a – модальное число, α, β – левые и правые коэффициенты нечеткости.

Функции принадлежности термов $\mu(M)$, $\mu(B)$, $\mu(НС)$, $\mu(C)$ характеризуются трапециевидными нечеткими интервалами (ТНИ) вида $\langle a, b, \alpha, \beta \rangle$, где a, b – нижние и верхние модальные значения, α, β – левые и правые коэффициенты нечеткости.

Далее формулируется эвристическое правило следующего вида:

«Если дефицит аппаратных ресурсов большой I – интервал времени, на котором наблюдается дефицит протяженный, то реконфигурация состоится»

Формируется база правил $P = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, где $n = \overline{1; 9}$, представленная в табл. 1. В ней на пересечении значений терм-множества определяется:

- состоится реконфигурация;
- возможно состоится;
- не состоится.

Таблица 1
База правил нечетких продукций

| | | | | |
|------------|-----|----|----|---|
| | t | М | СР | Б |
| ΔR | | М | СР | Б |
| | М | НС | BC | С |
| | СР | BC | BC | С |
| | Б | BC | С | С |

Для каждого конкретного числового значения α_i всех входных параметров алгоритма V' определяются степени истинности $\mu(\alpha_i)$ для соответствующих термов T_{β_i} входной ЛП. Полученные значения $\mu(\alpha_i)$ формируют формализованную запись множества подусловий.

Далее производится агрегирование подусловий с использованием операции конъюнкции \wedge . Условие i -го правила примет вид:

$$U_i = \mu(\alpha_1) \wedge \mu(\alpha_2).$$

Правила, для которых $\mu(\alpha_i) \neq 0$, считаются активными и используются в дальнейшем для системы нечеткого вывода.

Производится аккумулярование подзаклучений активных правил с помощью операции дизъюнкции \vee . В результате формируется нечеткое множество с функцией принадлежности $\mu_{\Sigma}(I)$:

$$\mu_{\Sigma}(I) = \mu(I_1) \vee \mu(I_2).$$

Производится дефазификация выходной лингвистической переменной I методом центра тяжести для значения функции принадлежности $\mu_{\Sigma}(I)$ и приводит полученные данные к значению меры возможности проведения реконфигурации:

$$I^* = \frac{\int_0^1 I \mu_{\Sigma}(I) dI}{\int_0^1 \mu_{\Sigma}(I) dI}.$$

Величина I^* является результатом решения задачи нечеткого вывода для входных лингвистических переменных $V = \{\beta_1, \beta_2\}$ и обеспечивает поддержку принятия решения администратору о необходимости реконфигурирования вычислительной среды.

Примеры функций принадлежности параметров алгоритма ΔR , t и меры возможности реконфигурации представлены на рис. 1–3.

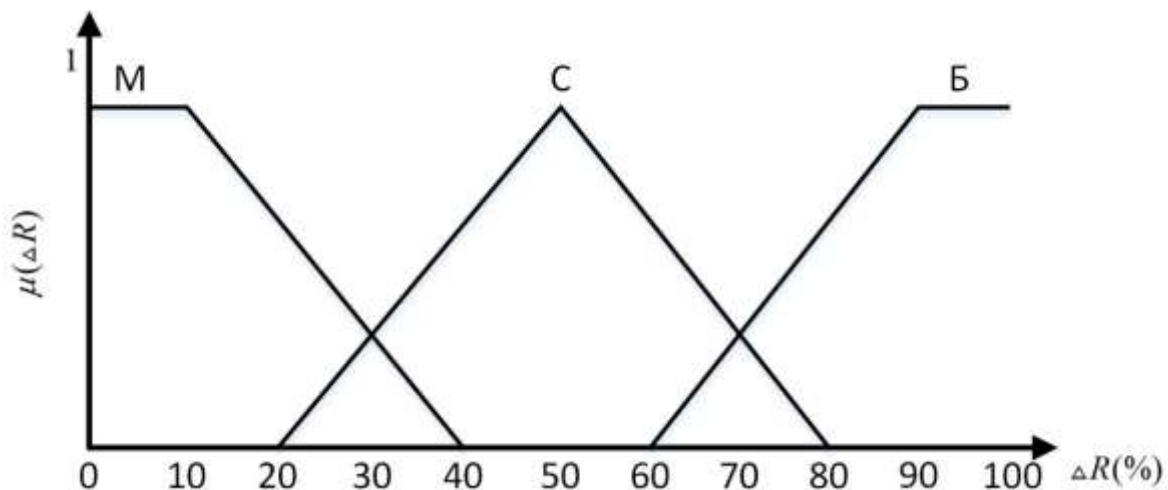


Рис. 1. Функция принадлежности ΔR

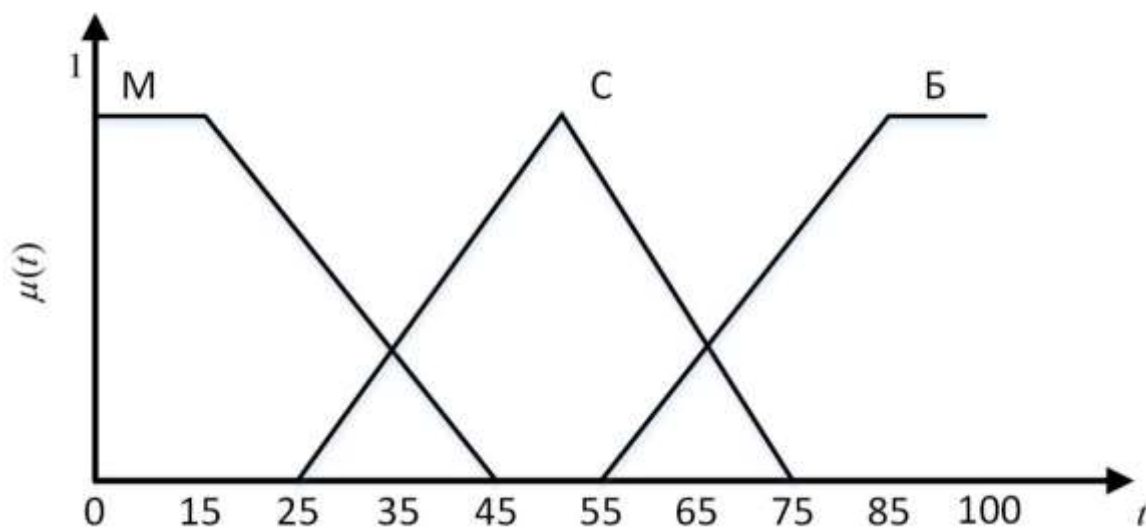


Рис. 2. Функция принадлежности t

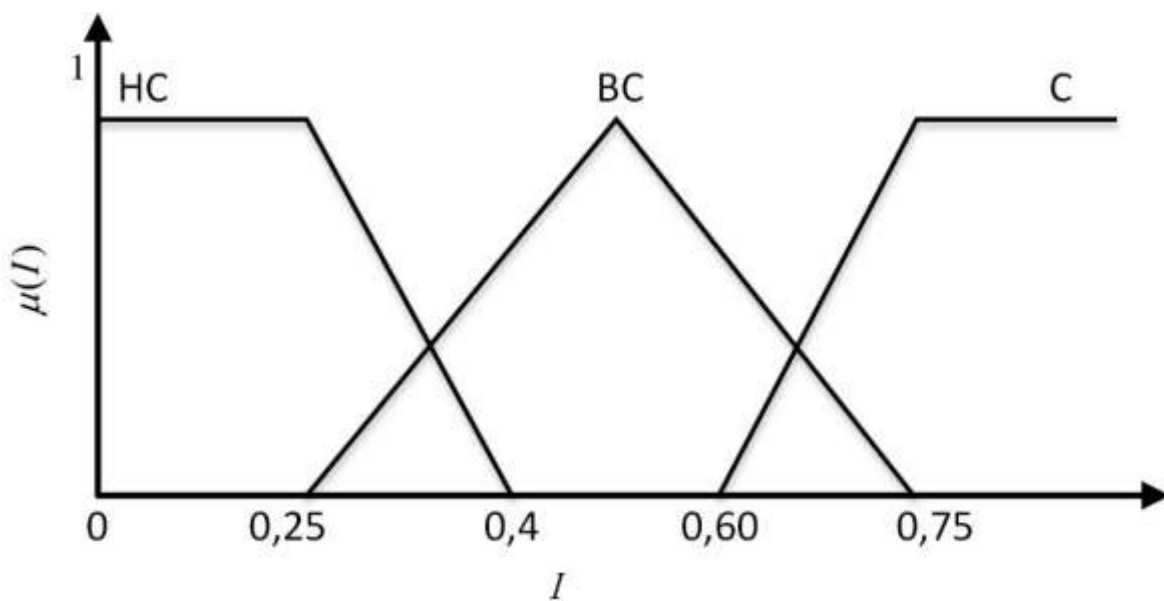


Рис. 3. Функция принадлежности I

Разработанная система правил нечеткого логического вывода обеспечила для указанных выше исходных данных формирование итоговой функции принадлежности показателя I , а также позволила получить его дефаззифицированное значение I^* (вертикальная пунктирная линия), представленное на рис. 4. В рассматриваемом примере рассчитанное значение $I = 0,44$.

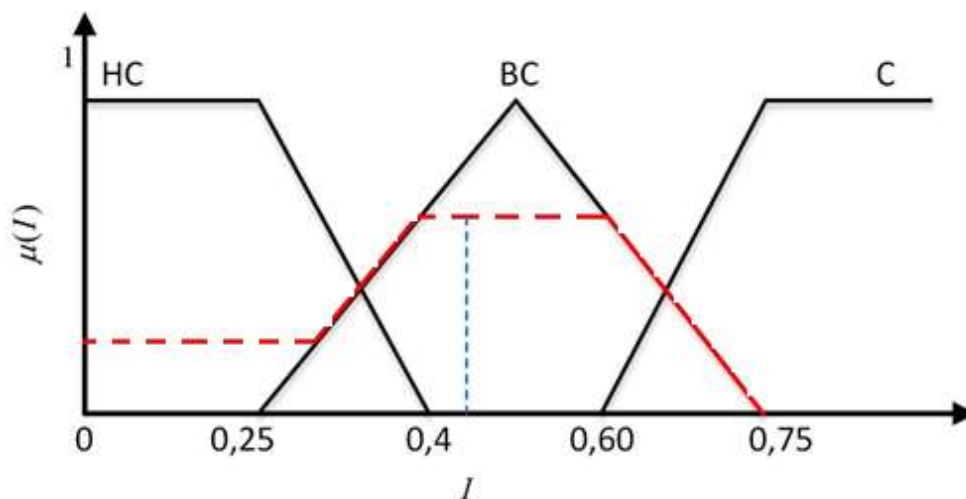


Рис. 4. Итоговая функция принадлежности меры I для условий реконфигурации, заданных параметрами $\Delta R = 25\%$, $t = 40$ с

Реконфигурация системы выполнится в случае выполнения критерия $I > PK$, где PK – порог реконфигурации.

ВЫВОД

Представленный алгоритм конфигурирования комплекса средств автоматизации вычислительных ресурсов виртуальной среды позволяет оптимизировать время реконфигурирования виртуальных машин, проводить анализ существующих КСА, обосновывать требования к их модернизации.

Список используемых источников

1. Первин А.Ю. Система управления специализированными виртуальными инструментами с механизмами оптимального распределения вычислительных ресурсов: дис. ... канд. техн. наук. – Переславль-Залесский, 2009. – 116 с.
2. Первин А.Ю. Система управления специализированными виртуальными инструментами с механизмами оптимального распределения вычислительных ресурсов: дис. ... канд. техн. наук. – Переславль-Залесский, 2009. – 116 с.
3. Борисов О.М. Алгоритм оптимального распределения вычислительных ресурсов виртуальных компонентов автоматизированной системы управления территориально распределенного предприятия (ВК АСУ ТРП) // Материалы 4-й Международной научно-практ. конф. «Современные материалы, техника и технология». – Курск, 2014. – С. 87–95.
4. Аверьянихин А.Е., Котельницкий А.В., Муравьев К.А. Методика расчета оптимального числа узлов кластера виртуализации частного облака виртуальных рабочих столов по критерию эффективности // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5 (47). – Ч. 3. – С. 6–13. – URL: <https://research-journal.org/technical/metodika-rascheta>

optimalnogo-chisla-uzlov-klastera-virtualizacii-chastnogo-oblaka-virtualnyh-rabochix-stolov-po-kriteriyu-effektivnosti/ (дата обращения: 21.05.2020). – DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.187

5. *Блошкин А.С., Князев В.Н.* Вопросы динамической миграции виртуальных машин // Материалы конф. «Научный диалог: молодой ученый», 22 января 2018 г. – СПб., 2018. – С.7–11.

6. Конфигурирование вычислительных систем на основе виртуализации ресурсов / А.Г. Басыров, Д.И. Казанцев, А.А. Карытко, Н.А. Шаменков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 12-2. – С. 331–345.

7. *Ведяков А.А., Тертычный-Даури В.Ю.* Робастные алгоритмы параметрического оценивания в некоторых задачах обеспечения устойчивости // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16, № 4. – С.620–626.

Б.Д. Казахов,
доктор военных наук, профессор;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Лагун,
кандидат техн. наук, доцент

ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Проведен анализ состояния защищенности ракетно-космического комплекса в современных условиях. Выявлены проблемы, которые мешают нормальному функционированию технологического процесса подготовки ракеты космического назначения к пуску в условиях внешнего деструктивного воздействия. Приведены методологические аспекты необходимости формирования систем защиты ракетно-космических комплексов. Представлен морфологический разбор понятий облика системы защиты комплекса, а также понятий защищенности и живучести комплекса в различных условиях эксплуатации. Разработаны показатели, характеризующие защищенность ракетно-космического комплекса в этих условиях. Сформированы предложения по расчету разработанных показателей.

Ключевые слова: ракетно-космический комплекс, технологическое оборудование, система защиты, показатели, позиционный район, процессы функционирования.

ВВЕДЕНИЕ

Наземная космическая инфраструктура ракетно-космического комплекса (РКК) включает большое количество площадных объектов, размещенных в его позиционном районе.

Технологическое оборудование РКК выполняет задачу подготовки ракеты космического назначения (РКН) к пуску с целью своевременного восполнения орбитальной группировки космических аппаратов. Перечень необходимого для этого оборудования широк и каждый его элемент выполняет в процессе подготовки РКН конкретную задачу.

Существующие системы защиты (СЗ) стартовых комплексов РКК должны выполнять следующие задачи предотвращения факторов внешних и внутренних деструктивных воздействий:

- защиту элементов технологического оборудования от возникающих пусковых нагрузок при запуске двигателей РКН (внутреннее деструктивное воздействие);
- защиту позиционного района стартового комплекса от возможных внешних деструктивных факторов имеющимися средствами РКК (внешнее деструктивное воздействие);
- защиту РКК от аварийных ситуаций при возникновении проливов компонентов ракетных топлив (КРТ) или аварии в местах их хранения (внутреннее деструктивное воздействие).

В настоящее время можно констатировать, что проблема защиты элементов технологического оборудования от возникающих пусковых нагрузок и защиты его от аварийных ситуаций, которые могут возникнуть при пуске РКН, как от внутреннего воздействия, успешно решается.

Задача же защиты позиционного района стартового комплекса (СК) от возможных внешних деструктивных факторов, как от внешнего воздействия, имеющимися средствами РКК практически в явном виде на эксплуатируемых нашим государством космодромах не решается. В общем виде эта задача перепоручена другим структурам, не входящим

в состав РКК. При этом наиболее проблемным в современных условиях является вопрос обеспечения защиты элементов РКК от авиационных средств нападения, как внешнего деструктивного воздействия. Используя уже имеющийся опыт по защите гражданских государственных объектов от различных дестабилизирующих факторов можно констатировать, что есть способы решения проблемы защиты групповых объектов от такого внешнего деструктивного воздействия.

Одним из перспективных способов решения проблемы защиты РКК от вероятного воздушного деструктивного воздействия является создание комплексной системы защиты РКК (СЗ РКК), препятствующей движению летательных аппаратов в позиционный район РКК, как вероятных авиационных средств нападения (АСН). В этом случае СЗ РКК будет также решаться проблема обеспечения живучести и защищенности РКК. Для поиска путей определения показателей живучести и защищенности РКК предпримем попытку использовать уже имеющийся научно-методический аппарат по иным свойствам РКК.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ РКК

Любое исследование, направленное на получение новых результатов, обычно связано с введением и определением основных понятий, на основе которых формулируются цель исследования и постановка задачи, обосновываются ограничения и условия, разрабатываются методы решения задачи и оценивается результат решения. Для определения показателей живучести и защищенности РКК сформулируем необходимые новые основные понятия на основе уже имеющихся. Поясним их трактовку для использования в дальнейших рассуждениях.

Определение: облик системы защиты РКК – словесная модель системы защиты РКК, отражающая ее назначение, функциональную структуру целевых подсистем, физические принципы реализации функций и совокупность показателей основных свойств [1].

Используя известные источники, проанализируем уже имеющиеся определения живучести.

Живучесть вооружения и военной техники предусматривается при их проектировании (придание изделиям повышенной прочности, обтекаемых и рикошетирующих форм, малых габаритов, использование маскирующей окраски, дублирование приборов управления и источников энергии, улучшение биологической защиты и др.) [1].

Живучесть военно-технической системы – свойство сохранять и/или быстро восстанавливать боеспособность (возможность выполнять задачи в соответствии с предназначением) в условиях воздействия поражающих факторов [2].

Понимая, что основным элементом РКК является РКН, учтем уже имеющиеся понятия, связанные с аналогичным представителем вооружения и военной техники.

Живучесть судна – способность противостоять воздействию сил ветра и волн, пожаров, оружия противника, а при повреждениях – сохранять и восстанавливать (полностью или частично) мореходность и боевые качества. Важнейшие элементы живучести – непотопляемость и устойчивость судна [2].

Учитывая специфику современной военно-политической и экономической обстановки, а также новизну СЗ РКК, для этого комплекса введем следующее понятие живучести.

Определение: живучесть РКК – способность комплекса противостоять воздействию внешним и внутренним целенаправленным воздействиям, случайным природным явлениям, а при повреждениях – сохранять и восстанавливать (полностью или частично) свой потенциал.

На основе определения потенциала (от лат. *potentia* – сила) как источника предоставляющего возможность иметь средства (запасы), которые могут быть использованы для решения определенного вида задачи или достижения назначенной цели [3].

Введем и используем следующее понятия защищенности РКК.

Определение: защищенность РКК – способность комплекса осуществить с заданными ограничениями по оперативности пуск РКН, которые находятся в различных степенях технической готовности.

Данные формулировки позволяют нам составить концептуальную модель средств необходимых для решения проблемы защищенности и живучести объектов РКК на различных этапах эксплуатации на космодроме. Исходя из имеющихся условий функционирования РКК, как комплекса в целом, необходимо обеспечить его защищенность от внешних деструктивных воздействий, используя имеющиеся у него производственные мощности.

Для этого, обеспечивая защищенность РКК при его функционировании в условиях внешнего целенаправленного воздействия, предусматриваются СЗ РКК, включающие средства экранирования позиционного района комплекса от возможных поражающих факторов АСН.

СЗ РКК представляют собой элементы обеспечивающего оборудования, находящиеся в рабочем состоянии и включающие ее функционирование в угрожаемый период автоматически или по сигналам автоматизированной системы контроля и управления РКК. Они не функционируют при эксплуатации РКК в штатном режиме и включаются при появлении угрозы воздушного деструктивного воздействия по сигналам специальных средств. Эти средства защиты РКК являются компонентами технологического оборудования РКК и включают в себя в общем случае (рис.1):

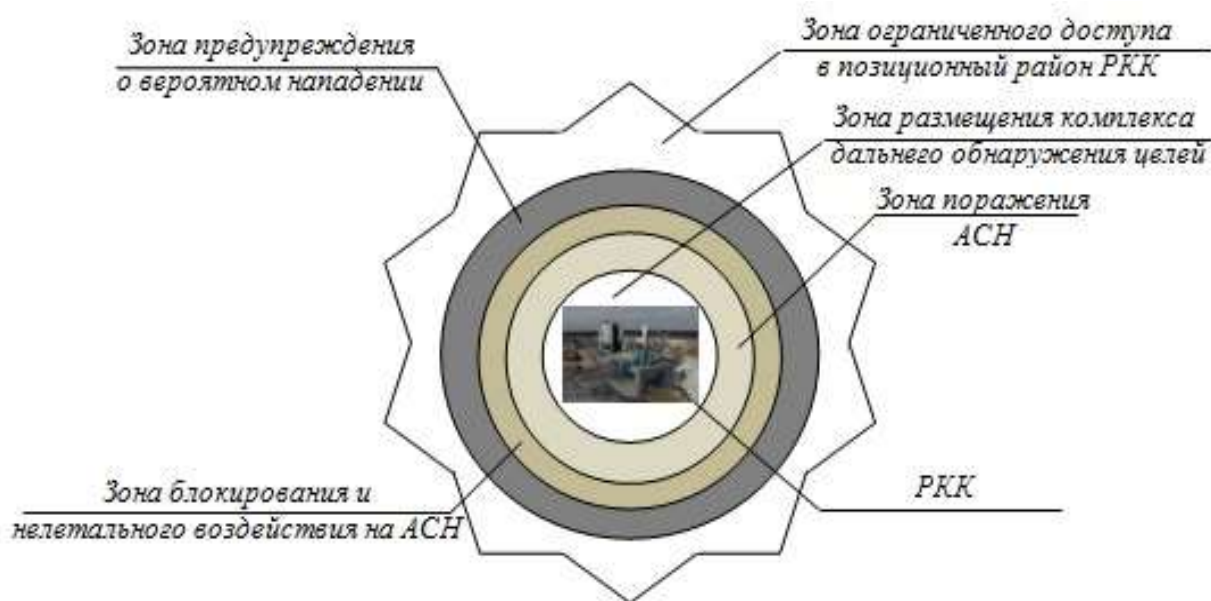


Рис.1. Зональная схема выполнения задачи защиты РКК от АСН

- технические средства (подсистемы) специального автоматического контроля получения сигнала о потенциальном внешнем целенаправленном воздействии с применением АСН, управления техническим состоянием СЗ, исполнительные элементы СЗ, системы пополнения ресурсами СЗ и приведения их в состояние готовности к применению;
- персонал (операторы специальных пультов контроля управления РКК в ситуациях потенциального внешнего целенаправленного воздействия, расчеты личного состава по приведению СЗ в готовность и режим постановки защитного экрана);
- средства, обеспечивающие работу исполнительных элементов (системы газоснабжения, управления, доставки расходных материалов и т.д.).

Рассмотрим практическое использование предлагаемого описания на примере взаимодействия опасных факторов авиационных средств нападения (ОФ АСН) и СЗ РКК в позиционном районе РКК.

Процесс деструктивного воздействия от АСН для РКК является следствием совместной реализации процессов функционирования средств поражения и процессов поглощения этих опасных факторов агрегатами и системами комплекса, включая СЗ РКК.

Процесс функционирования АСН характеризуется наличием опасных факторов, заключающихся в кинетическом, газодинамическом и акустическом, тепловом и химическом воздействиях продуктов деструктивного фактора на элементы РКК и его СЗ.

Для процессов функционирования СЗ РКК на этапе поражения объектов РКК наиболее характерным является постановка экрана между средством поражения и РКК [7].

В процессе функционирования СЗ РКК возможно возникновение различных деструктивных факторов, представляющих собой кинетическое воздействие элементов СЗ РКК на элементы АСН и РКК.

Таким образом, предметом исследования защищенности функционирования СЗ РКК на этапе воздействия АСН являются закономерности возникновения опасных ситуаций, связанных с воздействием опасного фактора на элементы СЗ РКК от АСН.

Целью данного исследования является поиск таких вариантов построения СЗ РКК, при которых взаимодействие СЗ и АСН заканчивалось бы ситуацией, когда факторы поражения АСН полностью поглощались друг другом и обнулялись в защитных свойствах СЗ РКК.

Указанной цели подчинены следующие задачи исследования:

1. Рассмотрение вопросов стойкости заградительных экранов и объектов РКК за их фронтом.

2. Рассмотрение вопросов стойкости и защищенности самих АСН.

При этом АСН и СЗ РКК имеют свою защищенность и подвержены воздействию факторов поражения, т.е. процесс их влияния друг на друга приводит к изменению свойств обоих объектов.

ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ РКК

Основной целью функционирования СЗ РКК является защита РКК от поражающих факторов АСН. При этом функционирование СЗ РКК [7] может быть условно разделено на два смежных по времени и логически связанных процесса:

- процесс применения СЗ по назначению (процесс функционирования СЗ РКК);
- процесс обеспечения защиты РКК.

При обеспечении защиты РКК выполняются задачи по управлению состоянием СЗ.

Результаты обеспечения защиты РКК проявляются в ходе применения СЗ по назначению и в существенной степени определяют качество выполнения целевых задач РКК. Результативность обеспечения защиты РКК определяется как характеристиками РКК, так и характеристиками СЗ. Степень защиты РКК определяет возможность осуществления процесса функционирования СЗ и проявляется только при ее работе, т.е. при взаимодействии СЗ и АСН.

Ключевой проблемой обеспечения защищенности РКК является корректная и обоснованная формулировка задач, стоящих перед СЗ, от которой зависит правильность выводов об эффективности ее функционирования.

Для этого необходимо определить существенные эффекты функционирования СЗ и требования к ним.

В ходе функционирования СЗ в качестве таких эффектов фигурируют:

- прямой положительный эффект – сохранение условий для успешной подготовки к пуску и пуску РКК;

– побочный отрицательный эффект – нанесение ущерба РКК в процессе функционирования СЗ.

Таким образом, в качестве целевых эффектов процесса функционирования СЗ с позиций обеспечения защиты РКК необходимо рассматривать работоспособность РКК и предотвращенный ущерб от воздействия на РКК факторов поражения АСН.

Цели, которые формируются вне СЗ, рассматриваются как несобственные цели, а соответствующие показатели, характеризующие эффект при достижении несобственных целей, называются несобственными показателями эффекта.

Несобственные показатели эффекта процесса функционирования СЗ представляют собой меру полезного эффекта, потребляемого системой более высокого уровня, т.е. РКК.

Показатели, характеризующие эффект при достижении собственных целей называются собственными показателями эффекта.

Деление целей процессов функционирования СЗ на несобственные и собственные можно трактовать как отражение внешних и внутренних связей систем комплекса и характеризовать как внешние и внутренние цели.

Таким образом, в качестве показателей эффектов обеспечения работоспособности РКК, учитывающих его несобственные и собственные цели, могут быть использованы:

\mathcal{E}^n – несобственный показатель, характеризующий сохранность работоспособности РКК;

\mathcal{E}^c – собственный показатель, характеризующий фактический уровень ущерба нанесенного РКК при воздействии АСН.

Введем в рассмотрение безразмерный нормированный показатель, характеризующий обеспечение защищенности РКК – $\bar{\Pi}_{\text{защ}}$, определяемый по следующему выражению:

$$\bar{\Pi}_{\text{защ}} = \frac{\mathcal{E}^c}{\mathcal{E}_{\text{max}}^c},$$

где $\mathcal{E}_{\text{max}}^c$ – собственный показатель, характеризующий уровень максимально возможного предотвращенного ущерба.

Необходимо отметить, что значения показателей \mathcal{E}^c , $\mathcal{E}_{\text{max}}^c$, $\bar{\Pi}_{\text{защ}}$ непосредственно связаны с показателями U , U_{max} , $\bar{\Pi}_{\text{пораж}}$, характеризующими уровни наносимого ущерба, максимально возможного ущерба и поражаемости РКК, соответственно, а также времени процесса функционирования СЗ РКК.

Качественный анализ взаимной зависимости данных показателей (рис. 3, 4) позволяет сделать следующие выводы:

$$\bar{\Pi}_{\text{защ}} \in [0, 1]; \bar{\Pi}_{\text{пораж}} \in [0, 1]; \bar{\Pi}_{\text{защ}} + \bar{\Pi}_{\text{пораж}} = 1;$$

$$U + \mathcal{E}^c = U_{\text{max}} = \mathcal{E}_{\text{max}}^c;$$

$$\bar{\Pi}_{\text{защ}}^{\text{доп}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{кр}}^c}{\mathcal{E}_{\text{max}}^c} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{кр}}}{U_{\text{max}}} = 1 - \frac{U_{\text{кр}}}{U_{\text{max}}}$$

где $\bar{\Pi}_{\text{пораж}}$ – безразмерный нормированный показатель поражаемости РКК;

$\bar{\Pi}_{\text{защ}}^{\text{доп}}$ – допустимое значение показателя защищенности РКК;

U , U_{max} , $U_{\text{кр}}$ – показатели, характеризующие уровни нанесенных фактического, максимально возможного и критического ущербов;

$t_{\text{к}}$ – время взаимодействия СЗ и АСН.

Эффект от функционирования СЗ РКК включен в этап эксплуатации РКК, с которым она находится в отношении подчиненности, и который формирует цели ее функционирования.

Несобственные показатели эффекта функционирования СЗ РКК представляют собой меру полезного эффекта, потребляемого системой более сложных в техническом отношении РКК.

Для получения указанного эффекта при своем функционировании СЗ РКК расходует ресурсы, представленные в ее распоряжение.

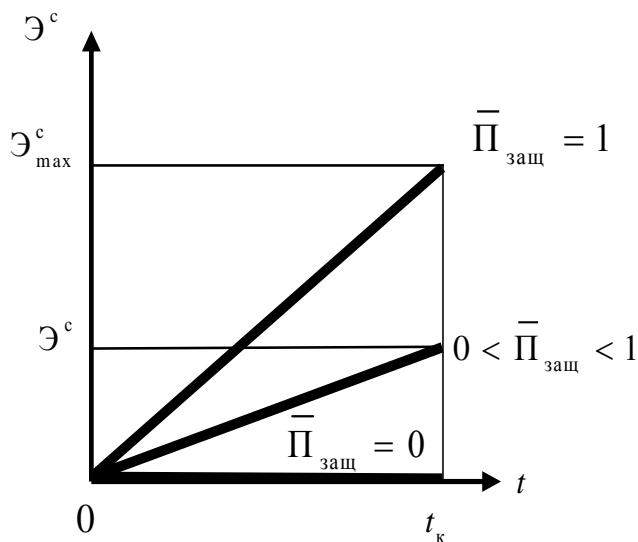


Рис. 3. Зависимость уровня предотвращенного ущерба от времени при функционировании СЗ РКК

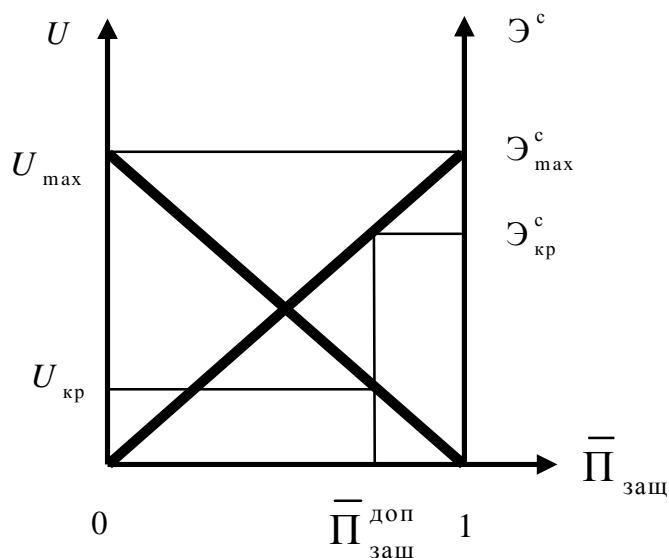


Рис. 4. Зависимость уровня предотвращенного ущерба и наносимого ущерба от нормированного показателя защищенности при функционировании СЗ РКК

При правильной организации функционирования СЗ РКК и ее взаимодействия с другими системами (агрегатами) РКК должен обеспечиваться расход рационального количества ресурсов, поэтому под собственной целью функционирования СЗ РКК будем понимать расходование доступного количества ресурсов всех видов.

Такая формулировка собственной цели является следствием общего принципа наименьшего действия, широко используемого в технике [8].

Принимаем, что существующий уровень защищенности эксплуатируемых РКК от целенаправленного воздействия средств поражения злоумышленников практически равен нулю.

В силу производственно-технологических процессов подготовки и пуска РКН уровень защищенности РКК не может быть увеличен.

Поэтому допустимое значение показателя защиты, которое придает РКК его СЗ, может быть определен через показатель способности АСН к поражению объектов РКК [9]

$$\bar{\Pi}_{\text{защ}}^{\text{доп}} = (1 - \bar{\Pi}_{\text{пораж}}^{\text{АСН}}) < \bar{\Pi}_{\text{защ}}^{\text{РКК}}.$$

Основная задача функционирования СЗ состоит в снижении значения потенциально заложенного в АСН показателя поражения.

Для оценки свойства защищенности РКК в полном объеме необходимо получить и проанализировать следующие показатели.

1. Показатель деструктивности для АСН [9] определяется по формуле

$$\bar{\Pi}_{\text{пораж}}^{\text{АСН}} = \bar{P}_1 \cdot \bar{I}_1 \frac{\bar{m}_{\text{зар}} \cdot \bar{L}^2}{\bar{t}^2 \cdot \bar{A}},$$

где в качестве определяющих параметров для показателя поражения РКК на этапе применения АСН используются характеристики назначения АСН и ресурсопотребления:

$\bar{m}_{\text{зар}}$ – величина тротилового эквивалента головной части;

\bar{t} – оперативность выполнения пуска;

\bar{L} – максимальная дальность полета;

\bar{I} – вероятность отсутствия нарушения потоков боевой информации;

\bar{P}_1 – вероятность успешного поражения цели;

\bar{A} – работа, необходимая для достижения поставленной цели.

2. Показатель степени защиты РКК [9] определяется по формуле

$$\bar{\Pi}_{\text{защ}}^{\text{РКК}} = \bar{P}_2 \cdot \bar{I}_2 \cdot \frac{\Delta \bar{P}_{\phi} \cdot \bar{V}_{\text{форт}} \cdot \bar{R}}{\bar{t} \cdot \bar{A}},$$

где для показателя защищенности комплекса выявлены следующие характеристики назначения РКК и ресурсопотребления:

\bar{I}_2 – объем информации (управляющей, оповещающей, предупреждающей);

\bar{P}_2 – вероятность безотказного функционирования оборудования;

$\Delta \bar{P}_{\phi}$ – уровень допустимого ударно-волнового воздействия;

$\bar{V}_{\text{форт}}$ – объем фортификационных сооружений для комплекса;

\bar{t} – периодичность выполнения регламентных работ;

\bar{R} – назначенные показатели ресурса;

\bar{A} – работа, необходимая для достижения поставленной перед комплексом цели.

Оба показателя $\bar{\Pi}_{\text{пораж}}^{\text{АСН}}$ и $\bar{\Pi}_{\text{защ}}^{\text{РКК}}$ получены в единой метрике и по единому алгоритму, основанному на морфологическом анализе и анализе размерностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценивания уровня защищенности и живучести, который может приобрести РКК, применив СЗ, следует использовать результаты данных исследований, согласно которым СЗ может обеспечить существенное снижение показателя поражения РКК.

Таким образом, СЗ может обеспечить повышение имеющегося в данный момент практически нулевого уровня защищенности эксплуатируемых РКК.

В тоже время необходимо решить оптимизационную задачу по выбору средств защиты объектов РКК. По результатам проведенных исследований можно предложить возможность использования защитных экранов с целью воздействия на АСН.

Для создания экономического эффекта выполнения задачи защиты РКК рекомендуется такое построение системы защиты, при котором предусмотрено использование собственных ресурсов комплекса, обеспечивающих повышение защищенности и живучести комплекса.

Выполнить это условие возможно ввиду того что каждый РКК в своей повседневной деятельности обладает мощными энергетическими, материальными и людскими ресурсами, которые могут в случае необходимости быть использованы в СЗ для парирования факторов деструктивных воздействий.

Список используемых источников

1. Советская военная энциклопедия: в 8 т. / пред. гл. ред. комиссии Н.В. Огарков. – М.: Воениздат, 1976. – 637 с.
2. *Ожегов С.И. и Шведова Н.Ю.* Толковый словарь русского языка. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: АЗЪ, 1994. – 928 с.
3. *Бирюков Г.П., Гранкин Б.К., Козлов В.В., Соловьев В.Н.* Основы проектирования ракетно-космических комплексов. – СПб.: Алфавит, 2002. – 395 с.
4. *Краснов О.В.* Методы и модели исследования безопасности эксплуатации стартовых комплексов. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2000. – 130 с.
5. *Смирнов В.И.* Методология обеспечения безопасности стартовых комплексов при их проектировании. – М.: Изд-во МАИ, 2003. – 140 с.
6. *Петухов Г.Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – МО СССР, 1989. – Ч.1: Методология, методы, модели. – 660 с.
7. Экспериментальные исследования процессов образования и функционирования защитных экранов / А.В. Лагун, В.В. Козлов, И.О. Кукушкин, С.В. Чирва; под общ. ред. Ю.В. Кулешова // Сб. материалов IV Всероссийской научно-практ. конф. «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 54–62.
8. *Козлов В.В., Лагун А.В.* Алгоритм создания защищенных космических ракетных комплексов // Труды всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – Т.2. – С. 117–125.
9. *Козлов В.В., Лагун В.А.* Концептуальные положения создания защищенных космических ракетных комплексов. – М.: ЦВНИ МО РФ, 2010. – Вып. №1 (106). – С. 78–87.

А.В. Калюжный;
А.Н. Шульгин,
кандидат техн. наук;
А.О. Шушаков,
кандидат техн. наук

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОЕМКОСТЬЮ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрены модель и алгоритм, реализующие метод оптимального управления энергоемкостью вычислительных элементов в высокопроизводительных вычислительных системах при неоднородной вычислительной нагрузке. В качестве инструментария снижения энергоемкости предложено использование множественности функциональных состояний процессоров в условиях высокой фрагментированности выполняемых задач, а также учет стохастического характера параллельных вычислительных процессов. Изложен принцип оптимального управления ресурсоемкостью параллельных вычислений. Представлены результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: высокопроизводительная вычислительная система, оптимальный, энергоемкость, параллельный вычислительный процесс.

ВВЕДЕНИЕ

Современные достижения микроэлектроники, создание микросхем с большой степенью интеграции и микропроцессорных комплектов широкого назначения, развитие концепции «система на кристалле» позволяют значительно улучшить эксплуатационно-технические показатели мобильных вычислительных средств и расширить спектр их применения. В то же время четко обозначившаяся тенденция развития мобильных беспилотных роботизированных технических систем различного назначения с интеллектуальными системами автономного управления определяет возрастающую потребность в высокопроизводительных средствах обработки информации с низкой ресурсоемкостью функционирования [1, 6].

Учитывая то, что современные высокопроизводительные вычислительные системы (ВПВС) представляют собой многопроцессорные вычислительные модули с реализованным принципом параллельных вычислений, а сами микропроцессоры как ключевые вычислительные элементы (ВЭ) являются основными потребителями *ограниченного энергоресурса* [11], в контексте данной работы под ресурсоемкостью понимается *энергоемкость*.

В прогнозе научно-технологического развития РФ на период до 2030 года [9] в числе наиболее приоритетных направлений обозначено развитие интеллектуальных бортовых систем и высокоавтономных автоматических «беспилотных» средств. Очевидно, что для реализации этих приоритетов задача снижения ресурсоемкости ВПВС при сохранении максимальной производительности является наиболее актуальной. В настоящей работе рассмотрен один из подходов к решению этой задачи.

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходя из актуальности рассматриваемой проблемы, формулировка задачи управления ресурсоемкостью выглядит следующим образом.

Дано:

1. Однородная вычислительная система $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}$, состоящая из l ВЭ.
2. Множество $C = \{C_1, C_2, \dots, C_g\}$ режимов пониженного энергопотребления каждым ВЭ.

3. T_D – директивное время завершения вычислительного процесса.
4. E_0 – потребляемая ВЭ мощность в активном режиме.
5. E_k – потребляемая ВЭ мощность в каждом состоянии, где $E_k \in \{E_1, E_2, \dots, E_g\}$.

Требуется:

Минимизировать энергоемкость функционирования ВЭ ВПВС при сохранении установленной оперативности вычислений.

По сути, данная задача является оптимизационной и заключается в выборе функционального режима ВЭ с *минимальным* энергопотреблением при условии соответствия длительности вычислительного процесса $T_{ВП}$ его директивному ограничению:

$$\begin{cases} C^* = \operatorname{argmin}_{k=1, \dots, g} \{W(C_k)\} \\ T_{ВП} \leq T_D \end{cases}$$

Очевидно, что *минимизируемым* показателем является энергоемкость простоя ВЭ, которая зависит от длительности простоя и выбранного энергосберегающего режима:

$$W(C_k) = (t_i - t_0 - \xi_k^0 - \xi_k^1) E_k,$$

где t_0 – момент времени начала вынужденного простоя ВЭ;

t_i – момент времени начала выполнения i -ой задачи (оно же завершение вынужденного простоя);

ξ_k^0 – длительность перехода ВЭ из активного режима в один из C_k -режимов;

ξ_k^1 – длительность перехода ВЭ из режима C_k в активный режим функционирования.

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СОСТОЯНИЙ

Проблема энергосбережения всегда находилась в фокусе внимания исследователей и разработчиков ВПВС и продолжает решаться как на уровне техпроцессов, так и на уровне аппаратно-программных технологий. В рамках данной работы интерес представляет аппаратно-программная технология, реализованная через совокупность энергосберегающих S -состояний ВЭ стандарта ACPI [13, 14].

В соответствии со стандартом ACPI S -состояния представляют собой режимы ограниченного функционирования ВЭ, обеспечивающие меньшую энергоемкость относительно активного состояния C_0 (табл. 1) [12].

Эта концепция целесообразна для мультипрограммных режимов в одномодульных вычислительных системах.

Однако, в условиях параллельных вычислений использование S -состояний позволяет получить дополнительный энергосберегающий эффект на уровне каждой задачи. Дело в том, что в распараллеленных программах, как правило, имеются участки в виде явно выраженных частных последовательностей, содержащие пустые интервалы [8]. Другими словами, при выполнении параллельных вычислений загрузка ВЭ в ВПВС в разные моменты времени носит неоднородный характер и отличается по длительности. При этом увеличение количества ВЭ в ВПВС потенциально влечет снижение процента их полезной работы. Это подтверждают результаты экспериментов по мониторингу загруженности процессоров ВПВС при решении задач разного уровня сложности [4].

Из табл. 1 видно, что с продвижением в наиболее глубокое состояние увеличивается время перехода ξ^1 в активный режим работы от 10 нс до ~ 300 мкс.

Если в процессе планирования вычислительного процесса учитывать это время, то S -состояния ВЭ можно оптимально использовать не только в перерывах между вычислительными задачами, но и во время вынужденных простоев в процессе выполнения самих задач без ущерба для оперативности вычислений.

Таблица 1

Содержание функциональных C-состояний современных микропроцессоров

| C-состояние | Содержание состояний | Время перехода в C ₀ |
|-------------|--|---------------------------------|
| C0 | Активный режим CPU | - |
| C1 | Программный останов тактирования для основных блоков CPU | ~ 10 нс |
| C1E | Программный останов тактирования для основных блоков CPU и снижение вольтажа ядра Vcore | ~ 60 нс |
| C2 | Аппаратная блокировка внутренних тактовых сигналов, отключение буферов ввода/вывода | ~ 100 нс |
| C2E | Аппаратный останов тактовых импульсов CPU и снижение вольтажа ядра Vcore | ~ 130 нс |
| C3 | Останов всех внутренних тактовых сигналов CPU, отключение питания кэш-памяти 2-го уровня | ~ 50 мкс |
| C4 | Дополнительное снижение питания CPU | ~ 150 мкс |
| C4E / C5 | Отключение кэш-памяти 1-го уровня | ~ 250 мкс |
| C6 | Максимальное снижение напряжение CPU (вплоть до полного отключения) | ~ 300 мкс |

В пользу рассматриваемого подхода к оптимальному управлению ресурсоемкостью параллельных вычислений выступает и возможность оперативного выбора соответствующего энергосберегающего режима, за счет заложенной в стандарте ACPI гибкости связей между C-состояниями [12].

На рис. 1 показана взаимосвязь энергосберегающих состояний.

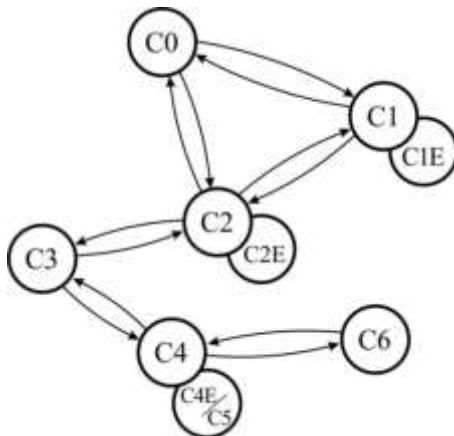


Рис. 1. Взаимосвязь C-состояний современных процессоров

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматриваемый в настоящей работе алгоритм реализует метод оптимального управления энергоемкостью ВЭ при неоднородной вычислительной нагрузке. Данный метод основан на анализе стохастической модели параллельного вычислительного процесса, т.е. процесса, в котором часть параметров априори не известны и задаются как случайные события и величины с известными вероятностными характеристиками. В качестве стохастического параметра в данном случае рассматривается момент времени t_i начала выполнения очередной вычислительной задачи или ее фрагмента.

Зная значения параметров распределения времени завершения задач-предшественников, а также директивную вероятность p , определяющую вероятностный допуск начала выполнения очередной вычислительной задачи t_i , можно определить значение этого момента времени t_i как квантиль порядка p [2, 3]:

$$t_i = F^{-1}(p), \quad (1)$$

где $F(t)$ – функция распределения времени завершения задач-предшественников.

В качестве функции $F(t)$ используем двухпараметрическое распределение Вейбулла, описывающее максимальное время завершения множества задач-предшественников. В этом случае формула (1) приобретает следующий вид [2]:

$$t_i = \lambda \cdot (-\ln(1 - p))^{1/l}, \quad (2)$$

где λ и l – параметры этого распределения, которые в данном случае характеризуют длительность процесса соответствующего максимума и скорость изменения мгновенной интенсивности завершения задач. Адекватность и применимость распределения Вейбулла к процессам, рассматриваемым в решаемой в данной работе задаче, раскрыты в [7].

На основании вышесказанного можно сформулировать исходные данные необходимые для работы алгоритма:

- множество состояний энергопотребления ВЭ $C = \{C_0, C_1, \dots, C_g\}$;
- множество значений длительности переходных процессов из активного режима в C -состояния и обратно $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_g\}$ (при этом элементы множества ξ находятся в соответствии с элементами множества C по индексам);
- λ и l – параметры распределения $F(t)$ (2);
- p – директивная вероятность величины t_i .

Алгоритм выбора оптимального C -состояния ВЭ представляет собой следующую последовательность действий.

На основе исходных данных осуществляется расчет значения t_i в соответствии с формулой (2) (шаг 1, 2).

Инициализация цикла с параметром $k = 1, \dots, g$, где g – количество элементов множества ξ (шаг 3). Модификация параметра k осуществляется на уменьшение (шаг 11), что обеспечивает перебор элементов множества ξ начиная с последнего и, соответственно, имеющего максимальное значение.

В теле цикла из множества ξ осуществляется выборка соответствующего элемента $\xi_k \in \xi$ (шаг 4) и проверка условия (шаг 5):

$$(t_i - t_0) - \xi_k > 0, \quad (3)$$

где t_i – время начала выполнения очередной вычислительной задачи или ее фрагмента;

t_0 – момент времени начала вынужденного простоя ВЭ;

ξ_k – суммарное время переходных процессов при переводе ВЭ из активного режима работы в пассивный ξ_k^0 и обратно ξ_k^1 , $\xi_k = \xi_k^0 + \xi_k^1$;

$k = 1, \dots, g$.

При невыполнении условия (3) осуществляется модификация переменной k (шаг 11) и запуск очередной итерации через проверку условия $k = 1$ (шаг 12). Цикл выполняется до тех пор, пока параметр k не примет минимальное значение $k = 1$. Это означает что в результате перебора элементов множества ξ не обнаружено элементов, адекватно соответствующих длительности простоя ВЭ. Другими словами, длительность простоя настолько мала, что перевод ВЭ в какой-либо энергосберегающий режим не целесообразен. При этом переменная времени перехода в состояние C_0 полагается $\delta = 0$ (шаг 13), работа алгоритма завершается, а ВЭ продолжает свое функционирование в активном режиме.

При выполнении условия (3) следует выход из цикла. При этом выполняется функция выбора элемента из множества C по правилу соответствия элементов множеств $\xi_k \rightarrow C_k$ (шаг 6).

Так как общая длительность переходных процессов ξ_k этого состояния находится в пределах длительности вынужденного простоя, а его энергоёмкость соответственно меньше, чем энергоёмкость в активном режиме (состоянии C_0), то следует полагать, что определенное таким образом состояние C_k и является оптимальным энергосберегающим функциональным состоянием ВЭ на период отсутствия вычислительной работы.

После нахождения оптимального энергосберегающего состояния C_k , рассчитывается момент времени δ заблаговременного начала перевода ВЭ из C_k -состояния в активный режим (шаг 7):

$$\delta = t_i - \xi_k^1,$$

где ξ_k^1 – время перехода ВЭ из состояния C_k в состояние C_0 .

На шаге 8 иницируется функция перевода ВЭ в состояние C_k .

После запуска функции перевода ВЭ в состояние C_k запускается выполнение функции тайминга по времени δ , по завершении которого начнется перевод ВМ в состояние C_0 (шаг 9).

По завершении тайминга иницируется возврат ВЭ в активный режим функционирования. После вывода ВЭ в состояние C_0 работа алгоритма завершается (шаг 10).

На рис. 2 показана схема алгоритма определения оптимального энергосберегающего C -состояния ВЭ для стохастического параллельного вычислительного процесса.

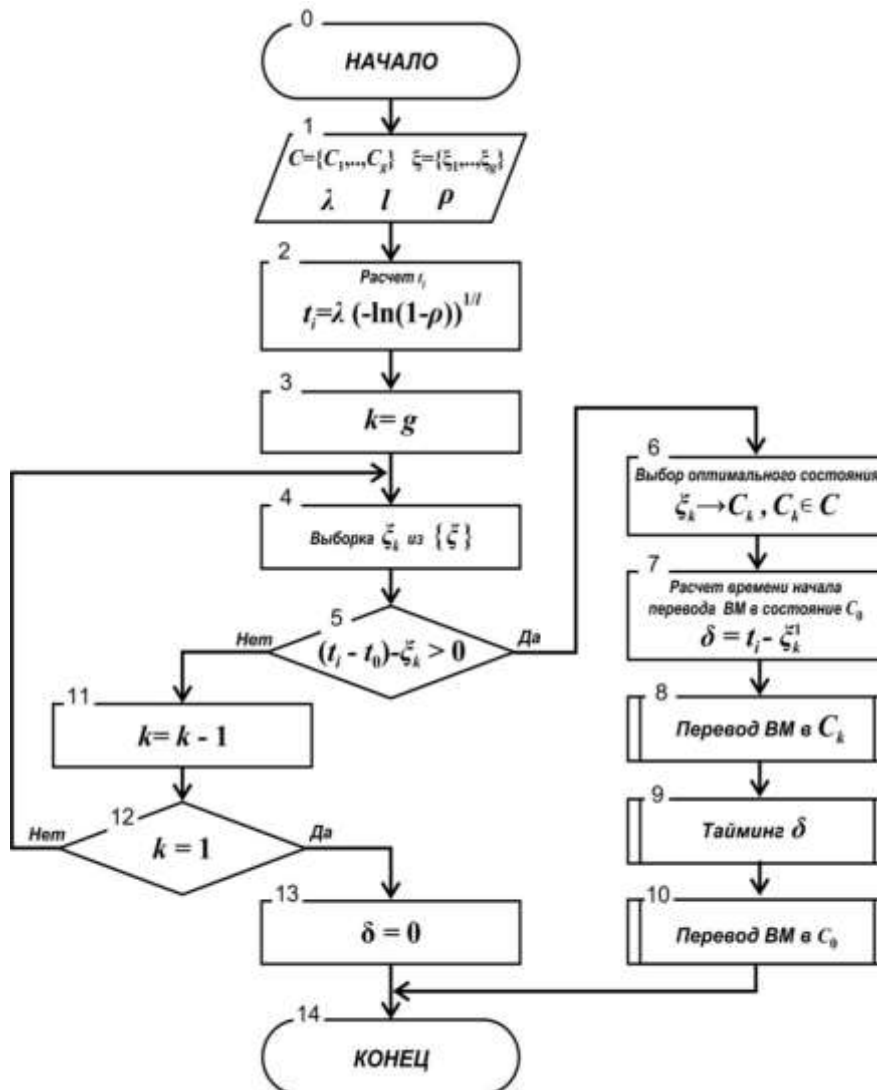


Рис. 2. Алгоритм определения оптимального энергосберегающего C -состояния ВЭ для стохастического параллельного вычислительного процесса

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОЕМКОСТЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для проверки состоятельности реализованного в алгоритме метода было проведено имитационное моделирование.

В качестве исходных расчетных данных были использованы основные характеристики C -состояний системы на кристалле МЦСТ R500S [10]: ток I_k , потребляемый ВЭ в каждом C_k -состоянии; электрическая мощность E_k каждого C_k -состояния; время переходных процессов ξ_k каждого C_k -состояния; показатель энергоэффективности ΔE_k для каждого C_k -состояния соответственно.

Показатель ΔE_k рассчитывался как процентное соотношение энергоемкости E_k относительно энергоемкости в активном режиме функционирования E_0 :

$$\Delta E = \left(1 - \frac{E_k}{E_0}\right) 100\%.$$

Характеристики функциональных C -состояний ВЭ на базе системы на кристалле R500S представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристики энергосберегающих состояний ВЭ
на базе системы на кристалле МЦСТ R500S**

| C_k | I_k, A | $E_k, Вт$ | $\xi_k, сек$ | $\Delta E_k, \%$ |
|-------|----------|-----------|-----------------|------------------|
| C_0 | 2,01 | 3,018 | – | – |
| C_1 | 1,85 | 2,784 | $60 * 10^{-9}$ | 7,75 |
| C_2 | 1,71 | 2,572 | $100 * 10^{-9}$ | 14,78 |
| C_3 | 1,41 | 2,418 | $50 * 10^{-6}$ | 19,88 |

В процессе моделирования имитировалась вычислительная нагрузка на одном ВЭ с произвольным количеством простоев различной длительности.

На рис. 3 показан фрагмент смоделированного вычислительного процесса с динамикой изменения энергоемкости ВЭ в соответствии с функциональными C -состояниями при выполнении фрагментированной задачи Z .

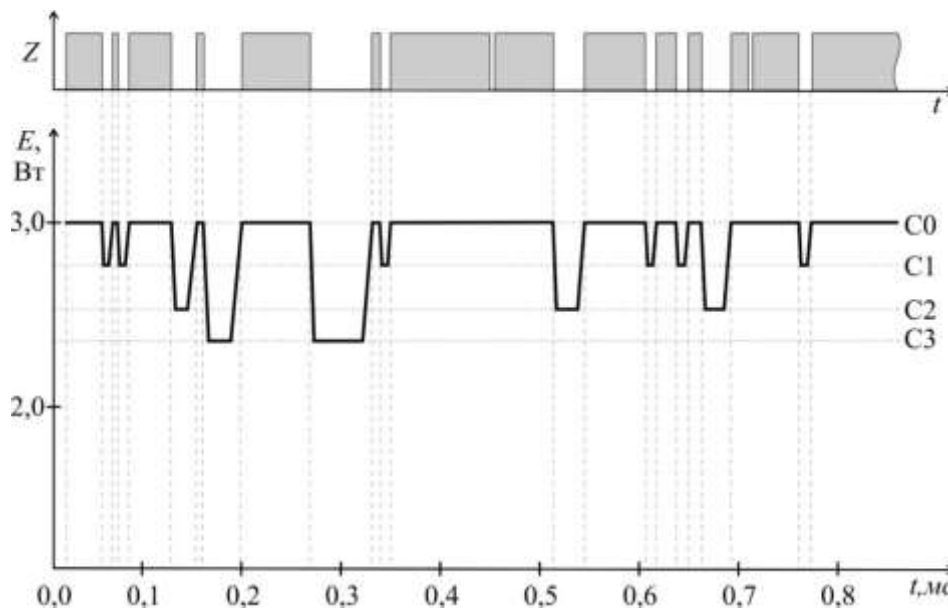


Рис. 3. Динамика изменения энергоемкости ВЭ при выполнении фрагментированной задачи Z

На временной диаграмме видно, как распределены значения энергоемкости пассивных режимов функционирования ВЭ в зависимости от длительностей вынужденных простоев.

Оценить энергосберегающий эффект в данном случае можно через обобщенный показатель энергоэффективности:

$$\Delta E_{\Sigma} = \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^g E_k T_k}{E_0 \sum_{k=1}^g T_k} \right) 100\%. \quad (4)$$

Здесь E_k – энергоемкость состояния C_k соответственно;

g – количество C -состояний;

T_k – общее время нахождения ВЭ в каждом C_k -состоянии:

$$T_k = \sum_{n=0}^m T_n,$$

где m – количество интервалов времени, соответствующих оптимальному C_k -состоянию.

В соответствии с соотношением (4) на интервале времени от 0,0 до 0,8 мс по совокупности вынужденных простоев одного ВЭ в результате работы алгоритма достигнут энергосберегающий эффект $\Delta E_{\Sigma} = 15,24\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что возможности существующих аппаратно-программных энергосберегающих технологий в современных ВПВС могут быть существенно расширены. Данный тезис подтверждается следующими выводами:

– особенностями рассмотренного подхода являются возможность использования множественности функциональных состояний ВЭ в условиях высокой фрагментированности выполняемых задач, а также учет стохастического характера параллельных вычислительных процессов;

– учет длительности переходных процессов позволяет переводить ВЭ в энергосберегающие состояния без потерь в оперативности вычислений, тем самым обеспечивая выбор оптимальных режимов пониженного энергопотребления;

– разработанный алгоритм оптимального управления ресурсоемкостью стохастических параллельных вычислительных процессов позволяет получить энергосберегающий эффект в ВПВС не менее 15%.

Список используемых источников

1. Артеменко М.Н., Корчагин П.А., Тетерина И.А. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Опыт отечественных и зарубежных производителей // Вестник СибАДИ. – 2019. – №4(68). – С.416–430.

2. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 158 с.

3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа. – 2004. – 478 с.

4. Мерьков С. Эффективность многоядерного процессора в популярных видеоредакторах. – URL: <http://www.ixbt.com/divideo/cores.shtml> (дата обращения: 05.05.2020).

5. Пахомов С. Технологии энергосбережения в мобильных ПК // КомпьютерПресс. – 2003. – №7. – С.30–33.

6. *Рубцов И.В.* Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 14–21. – URL: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=2610> (дата обращения: 09.04.2019).
7. *Рыжиков Ю.И.* Машинные методы расчета систем массового обслуживания. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979. – 136 с.
8. *Шульгин А.Н.* Диспетчирование параллельных вычислительных процессов как способ энергосбережения в мобильных вычислительных системах // Научный обозреватель. – Уфа.: ООО «Инфинити», 2011. – № 9. – С. 48–51.
9. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение правительства РФ от 03.01.2014 г. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380/> (дата обращения: 29.04.2020).
10. Система на кристалле «МЦСТ R-500S». – URL: <http://www.mcst.ru/r500s> (дата обращения: 09.04.2019).
11. Способы снижения энергопотребления процессора. – URL: <https://cyberpedia.su/15xb18c.html> (дата обращения: 29.04.2020).
12. Экономия энергии и производительность: не мешает ли одно другому? – URL: http://www.thg.ru/mainboard/energy_saving_performance/print.html (дата обращения: 09.04.2020).
13. Advanced Configuration and Power Interface Specification, Version 6.2. – URL: https://uefi.org/sites/default/files/resources/ACPI_6_2.pdf (дата обращения: 09.04.2020).
14. Power Management States: P-States, C-States, and Package C-States. – URL: <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/articles/power-management-states-p-states-c-states-and-package-c-states.html> (дата обращения: 02.04.2020).

А.В. Колесник,
кандидат военных наук;
М.Ю. Ортиков,
кандидат техн. наук;
А.В. Чарушников,
доктор военных наук, профессор

ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА ИНСТРУМЕНТАРИЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье представлены сведения о достигнутых результатах в развитии и применении единого инструментария разработки программного обеспечения моделирования космических систем. На основе анализа результатов проведенных исследований и их всесторонней апробации приведены рекомендации по организации работ в области унификации компьютерных моделей космических систем. В статью включены основные тезисы решения круглого стола «Современное состояние и перспективы развития методов и технологий моделирования применения космических сил, систем и средств в автоматизированных системах управления войсками и оружием», проведенного в рамках научно-деловой программы Международного военно-технического форума «Армия-2019».

Ключевые слова: инструментарий, компьютерная модель, космическая система, программный комплекс, унификация, метод, алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Военно-системный анализ результатов теоретических и прикладных научно-исследовательских работ показывает, что для формирования и реализации требований к перспективным образцам вооружения и военной техники необходимо разрабатывать не только комплексы математических программно-реализованных моделей, но и совершенствовать сами технологии моделирования. Совершенно очевидно, что в указанных целях в Вооруженных Силах Российской Федерации необходимо внедрять единые научно-методические подходы и унифицированные программно-технические средства [1, 2].

В условиях интенсивного развития космических систем (КС), объективной необходимостью их согласованного применения в составе более сложных организационно-технических систем (группировок войск, информационно-ударных систем и др.) актуальность разработки и совершенствования средств моделирования КС, как при их непосредственном создании, так и в составе автоматизированных систем управления военного назначения (АСУ ВН) не вызывает сомнений.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СРЕДСТВ

В настоящее время для решения задач моделирования КС применяются программно-алгоритмическое обеспечение системы контроля космического пространства, специальное программное обеспечение центров управления полетом космических аппаратов, средства стендов главных конструкторов – разработчиков космических систем, а также программное обеспечение организаций, осуществляющих военно-научное сопровождение. Среди ведущих организаций в данной области следует выделить ФГУП ЦНИИмаш, ПАО «МАК «Вымпел», АО «РКС», АО «НИИ ТП», АО «ИСС», АО «РКЦ «Прогресс» и др.

В соответствии с ведущимися научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами (НИОКР) основными задачами моделирования КС являются [2]:

- оценка космической обстановки, прогноз ее развития и выдача потребителям информации о ней;
- обеспечение запуска космических аппаратов и применения орбитальной группировки Российской Федерации по назначению;
- оценка уязвимости отечественной орбитальной группировки;
- подготовка предложений по мерам противодействия потенциальным боевым космическим аппаратам иностранных государств;
- обеспечение потребителей информацией о применении иностранных космических систем в обеспечении (ведении) боевых действий в других средах;
- формирование перечня опасных космических систем и космических аппаратов иностранных государств для ведения особого контроля за ними;
- детализация обстановки и выдача потребителям информации о космических аппаратах иностранных государств, имеющих возможность уничтожения наземных и морских объектов из космоса.

В Вооруженных Силах Российской Федерации основными организациями, осуществляющими военно-научное сопровождение технических решений в области моделирования космических систем и средств, являются научно-исследовательские центры Центрального научно-исследовательского института Воздушно-космических сил, а также Военно-космическая академия (ВКА) имени А.Ф. Можайского.

Ведущие зарубежные компании не менее активно внедряют технологии моделирования космических средств, обладающие свойством кроссплатформенности, т. е. предназначенные для работы на нескольких аппаратных платформах и/или операционных системах.

К подобным программным средствам относятся STK (Systems Tool Kit), GMAT (General Mission Analysis Tool), ORSA, FreeFlyer и др.

Первоначально созданный для решения проблем, связанных с использованием искусственных спутников Земли, комплекс STK используется в космонавтике, баллистике, навигации и в оборонных ведомствах. Компания AGI (производитель STK) сотрудничает с такими организациями, как NASA, ESA, Боинг, JAXA, Lockheed Martin, Northrop Grumman и EADS. На основе инструментария и библиотек классов STK для вооруженных сил США разработано прикладное программное обеспечение в области оценки космической обстановки, определения возможностей системы противоракетной обороны, расчета возможностей орбитальных средств и других задач.

Открытый программный комплекс GMAT предназначен для моделирования, анализа и оптимизации траекторий космических аппаратов, разработанный группой космических корпораций при участии NASA. Большое количество встраиваемых аналитических инструментов GMAT, ресурсов и библиотек помогает оперативно решать широкий спектр задач. Данный программный комплекс является альтернативой коммерческой программе STK.

В области применяемых инструментариев разработки программных средств моделирования КС необходимо выделить Google Earth API, STK Components, GMAT, CesiumJS, на основе которых построено множество программных решений, в том числе отечественных.

NASA стало первым в мире федеральным агентством, которое регулярно публикует свое программное обеспечение и делится наработками с общественностью. По состоянию на февраль 2020 года всего в каталоге 976 доступных для скачивания продуктов. В опубликованном программном обеспечении есть различные решения для обработки специфических наборов данных, организации систем связи и наблюдения, а также готовая платформа виртуальной реальности для создания обучающих сред.

В практике применения КС военного назначения многократное усложнение моделей целевой обстановки, заключающееся в создании глобальных автоматизированных систем военного назначения с разновариантными информационно-управляющими контурами, принятии на во-

оружение новейших специализированных космических комплексов и средств, а также необходимости их согласованного применения в составе стратегических организационно-технических систем, требует развития соответствующей моделирующей базы проведения исследований.

Результаты проведенных научно-исследовательских работ и опыт выполнения ряда оперативных заданий органов военного управления в 2015–2020 годах показали, что в настоящее время отсутствует межведомственная унификация показателей эффективности применения космических систем (средств), а также методик их определения [2].

Указанное обстоятельство определено следующими факторами [3]:

- интенсивное развитие космических средств и систем (сверхпроизводительность, мультизадачность, межсистемные связи), новые способы их комплексного применения;
- неустоявшаяся классификация космических систем и средств, их характеристик и показателей эффективности применения;
- различные «наборы» показателей, используемые для оценки эффективности отечественных и зарубежных космических систем;
- зависимость показателей от состава исходных данных (по отечественной и зарубежной орбитальным группировкам), допущений и ограничений;
- несогласованное специальное математическое обеспечение (алгоритмы, модели) для расчета показателей эффективности.

В целом также можно отметить, что и современные действующие нормативно-методические документы в области создания и применения космических средств не позволяют сформировать согласованные подходы к оценке возможностей орбитальной группировки, а также единую систему показателей и критериев эффективности космических средств.

Комплексный анализ состояния рассматриваемой предметной области показал проблемные вопросы моделирования КС с учетом влияния на них факторов развития технологий и средств моделирования в целом (рис. 1).



Рис. 1. Взаимосвязь проблемных вопросов моделирования КС с факторами развития технологий и средств моделирования

По результатам анализа нормативной и методической базы в области применения КС, в том числе и Положения о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ра-

кетных и космических комплексов (Положение РК-11-КТ), определена необходимость разработки и внедрения единых подходов математического моделирования и оценки эффективности КС. Указанное обстоятельство подтверждается решениями профильных секций и рабочих групп научно-технического совета Военно-промышленной комиссии Российской Федерации.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Общими направлениями решения проблемных вопросов моделирования КС будут являться унификация математического обеспечения, повышение оперативности проектирования и разработки программных средств, а также разработка единого инструментария моделирования КС [4]. Перейдем к их рассмотрению.

1. Унификация специального программного обеспечения. Унификация специального математического и программного обеспечения (СМПО) в области моделирования КС предполагает проведение работ по классификации, симплификации, типизации и оптимизации компонентов данных видов обеспечения, направленных на достижение максимальной эффективности в производственных процессах разработки, изготовления и эксплуатации КС и АСУ ВН.

В основу стандартизации СМПО должны быть положены требования специализированных ГОСТов Минобороны и ракетно-космической отрасли, а также зарубежный и отечественный опыт стандартизации требований к программному обеспечению в других отраслях. В настоящее время приняты отраслевые стандарты в атомной промышленности (ИЕС 60880), авиационной технике (DO-178C), железнодорожном транспорте (EN 50128) и здравоохранении (ИЕС62304).

Необходимо отметить, что в области моделирования КС требуется разработать единый межотраслевой стандарт, определяющий требования к СМПО, в том числе методам и алгоритмам космической баллистики, искусственных возмущений, функционирования типовых бортовых комплексов и др.

2. Повышение оперативности проектирования и разработки программных средств. В связи с необходимостью оперативной разработки (менее одной недели) и представления программно-реализованных информационно-расчетных задач (демонстрационных приложений) органам военного управления и системным предприятиям ракетно-космической отрасли предлагается использовать термин «компьютерная модель», означающий математическую модель объекта (процесса) предметной области, выполненную в компьютерной (вычислительной) среде [1–3].

Компьютерные модели КС создаются с целью обоснования проектно-технического облика проектируемых космических систем, подтверждения правильности выбранных конструкторских решений по их проектированию, оценки информационных возможностей КС, определения вклада в применение группировки войск (сил) и систем вооружения. Примеры графического интерфейса разработанных компьютерных моделей приведены на рис. 2.

Компьютерная модель является приближенным представлением, сохраняющим существенные черты КС, и описывает основные свойства, параметры, внутренние и внешние связи КМ с заданной разработчиком точностью [1].

3. Разработка единого инструментария моделирования КС. В области разработки специального программного обеспечения АСУ ВН необходимо ввести термин «инструментарий», представляющий собой программное обеспечение, предназначенное для использования в ходе проектирования, разработки и сопровождения программ [3, 4].

В состав инструментария включается общее и специальное технологическое программное обеспечение.

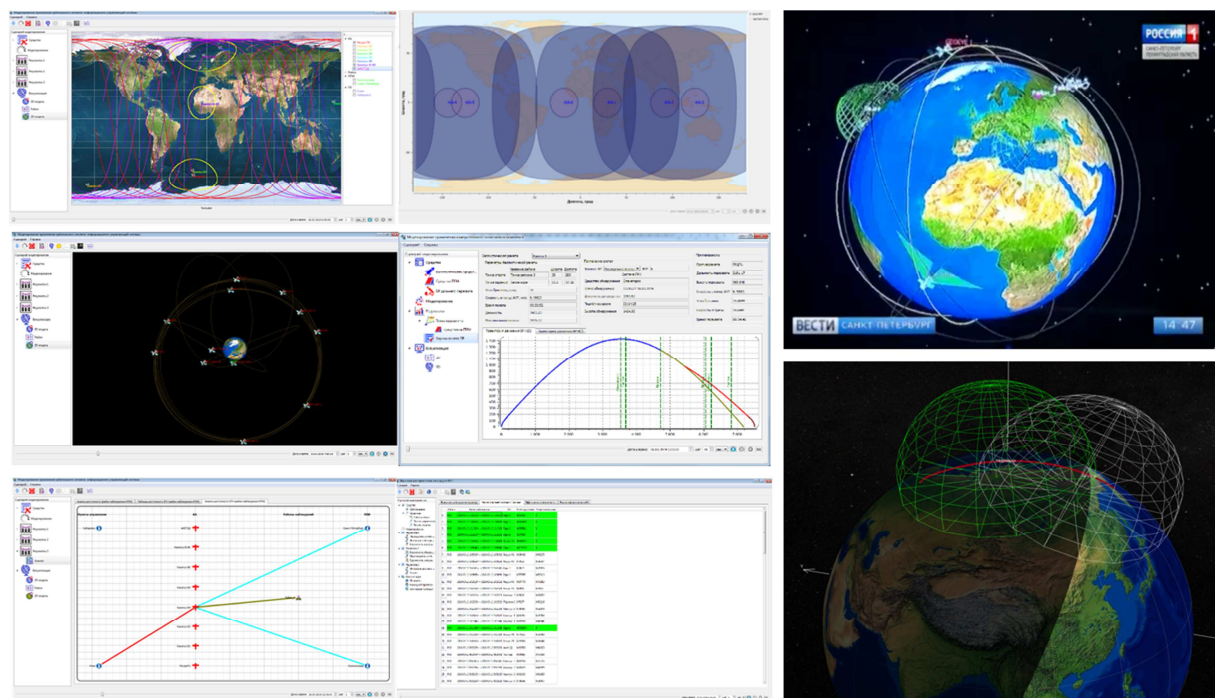


Рис. 2. Примеры графических интерфейсов компьютерных моделей

Общее технологическое программное обеспечение состоит из компиляторов, отладчиков, линковщиков, редакторов графического интерфейса, профилировщиков и средств тестирования.

Специальное технологическое программное обеспечение включает документацию по классам и методам с примерами кода, библиотеку классов, инструменты и утилиты, а также примеры приложений.

В тактико-технических требованиях к геоинформационной платформе военного назначения, утвержденных начальником Генерального штаба ВС РФ в 2018 году, впервые в практике создания компонент АСУ ВН введен термин «средства разработки приложений», означающий инструментальные программные средства разработчика (software development kit, SDK), обеспечивающие с использованием разрешенных к применению в Минобороны России интегрированных сред разработки приложений, написание исходного текста, компиляцию, отладку ядра геоинформационной системы, сервера баз пространственных данных, их расширений, в настольной и мобильной модификации, в том числе – с использованием web-технологий.

Средства разработчика приложений могут включать:

- интерфейс прикладного программирования, содержащий готовые классы, процедуры и функции для разработки настольных, мобильных и web-приложений;
- средства автоматизированного создания и выполнения «макросов»;
- справочную систему по средствам разработчика.

На сегодняшний день в практике отечественной и зарубежных технологий разработки программного обеспечения установилась определенная классификация инструментариев. В табл. 1 приведены примеры наименований компонент инструментария [5].

Также известны унифицированные проблемно-ориентированные инструментальные программные средства, реализующие современные информационно-вычислительные и логико-аналитические технологии. К ним прежде всего относят:

- средства разработки программных решений в области искусственного интеллекта – TensorFlow, OpenAI Gym, Microsoft Azure;
- платформы программной реализации мультиагентных систем – JADE, COGUAAR, Aglobe;
- военно-прикладные аналитические экспертные системы – DART, HANNIBAL, I&W;

– программное обеспечение для принятия решений – Criterium DecisionPlus, D-Sight, Intelligent Decision System, MindDecider.

Таблица 1

Примеры наименований компонент инструментария разработки программных средств

| Наименование компонента инструментария | Наименование зарубежного аналога | Сокращение | Тип инструментария |
|---|------------------------------------|------------|----------------------------------|
| Общее технологическое программное обеспечение | Integrated Development Environment | IDE | Интегрированная среда разработки |
| Специальное технологическое программное обеспечение | Software Development Platform | SDP | Инструментарий разработчика |
| | Software Development Kit | SDK | |
| Библиотека классов | Standard Template Library | STL | |

При реализации выбранного методического подхода к решению проблемных вопросов моделирования КС одной из главных задач будет научно-техническое сопровождение проводимых научно-исследовательских работ в области создания системы общих требований, унификации СМПО и разработки единого инструментария. В указанном направлении предстоит обобщить накопленный опыт научно-исследовательских организаций Минобороны и промышленности.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ УНИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В качестве примера реализации подхода к разработке компьютерных моделей КС можно привести инструментарий моделирования, разработанный в Военно-космической академии (ВКА) имени А.Ф. Можайского и применяемый при выполнении НИОКР в области создания и применения космических систем военного и двойного назначения.

Состав инструментария представлен на рис. 3.

Основным направлением применения инструментария является предоставление разработчику программно-реализованного функционала, позволяющего оперативно и качественно формировать проблемно ориентированное приложение для моделирования применения наземных и орбитальных группировок космических сил и средств, решающих различные военно-прикладные задачи, в соответствии с заданным исследовательским сценарием [5].

Ядром инструментария является созданная по принципу «обобщенного программирования» библиотека классов, включающая шаблоны классов и функций (математических методов и алгоритмов).

Целью создания библиотеки является разработка систематики алгоритмов, структур данных, механизмов распределения аппаратных средств таким образом, чтобы обеспечить максимальный уровень повторного использования, модульности и удобства. Библиотека классов распространяется среди разработчиков по принципу свободного программного обеспечения с открытым кодом.

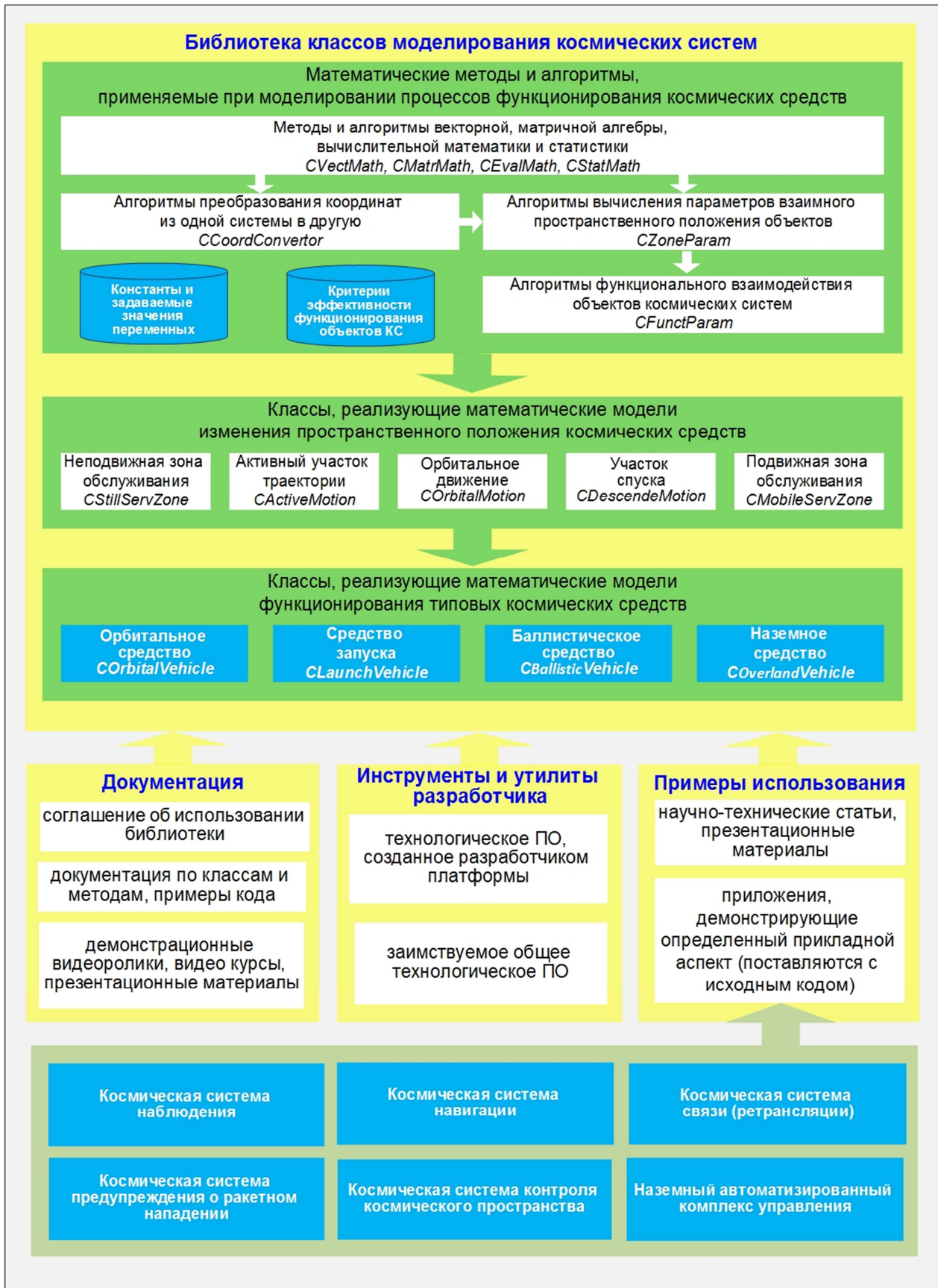


Рис. 3. Инструментарий проектирования и разработки программных средств моделирования КС

С использованием инструментария разработан комплекс программ моделирования космических систем наблюдения, предупреждения о ракетном нападении, контроля космического пространства, связи и ретрансляции, а также наземной инфраструктуры управления орбитальной группировкой.

В интересах оперативного представления органам военного управления замысла применения перспективных многоспутниковых группировок разработан ряд демонстрационных приложений, позволяющих оценить возможность построения космических систем, их облик, состав и общую структуру.

Кроме того, необходимо отметить положительный опыт тестирования инструментария и программных комплексов на различных аппаратно-программных платформах. В 2017–2019 гг. специалистами 2-го управления военного института (научно-исследовательского) ВКА имени А.Ф. Можайского проведены работы по адаптации программных средств к выполнению на ВК «Эльбрус». Доработка приложений была связана с оптимизацией кода, распараллеливанием вычислений и обеспечением корректного отображения 3D-графики. По результатам выполненных работ подготовлены и отправлены научно-технические отчеты в органы военного управления и профильные организации промышленности. ВК «Эльбрус» с установленными на них программными средствами приняли участие в Международных военно-технических форумах «Армия-2017» и «Армия-2019» в составе экспозиции академии.

Основываясь на опыте создания и применения единого инструментария разработки компьютерных моделей космических систем и комплексов сформулированы следующие предложения по организации научно-исследовательских работ [2, 3, 5]:

1. Уточнить понятийный аппарат (компьютерная модель, инструментарий, демонстрационное приложение, кроссплатформенность и т.д.) и нормативно-методические средства в области моделирования КС;

2. Провести анализ научно-технологического задела научно-исследовательских организаций в области разработки и использования собственных средств (инструментариев) моделирования КС;

3. Определить языки программирования и общее технологическое программное обеспечение, включив его в список разрешенного в Минобороны программного обеспечения;

4. Приступить к формированию единой библиотеки классов моделирования КС с открытым и закрытым сегментами;

5. Организовать разработку межведомственного инструментария моделирования КС;

6. Разработать общие технические требования к СМПО моделирования КС;

7. Создать технологии оперативной разработки демонстрационных приложений и мультимедиа материалов в целях информационной поддержки принятия решений Заказчиком о возможности разработки программных средств моделирования и выборе конкретных аппаратно-программных платформ в рамках задаваемых НИОКР;

8. Обеспечить обоснование, предъявление и проверку требований в рамках создания СМПО, включающего компьютерные модели КС, на всех этапах выполнения НИОКР по развитию автоматизированных информационно-аналитических систем в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации.

Также в целях обеспечения обработки реальной и условно-реальной информации в автоматизированных информационно-аналитических системах Вооруженных Сил Российской Федерации и программных комплексах научно-исследовательских организаций Минобороны необходима разработка положений и протоколов информационно-технического взаимодействия, обеспечивающих взаимный обмен исходными данными, сценариями применения космических средств и результатами моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, задача разработки единого инструментария моделирования КС является актуальной и осуществимой при активном взаимодействии заказчиков, потребителей и научно-исследовательских организаций, ответственных за создание и развитие автоматизированных информационно-аналитических систем.

В современных условиях развития КС и АСУ ВН решение обозначенных задач имеет приоритетное значение при повышении уровня автоматизации функций должностных лиц. В свою очередь, наиболее важными направлениями внедрения технологий моделирования КС будут являться унификация технологического и специального программного обеспечения, а также оперативная разработка проблемно-ориентированных приложений, востребованных для автоматизированной поддержки информационно-расчетной и логико-аналитической деятельности должностных лиц подразделений, являющихся заказчиками АСУ ВН.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 10 с.
2. Направления внедрения технологий моделирования космических систем и средств в комплексах средств автоматизации центров управления Вооруженных Сил Российской Федерации / А.П. Вышинский, А.В. Колесник, А.В. Чарушников, Э.М. Халиков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – Вып. 667. – С.80–86.
3. Колесник А.В. Кроссплатформенный инструментарий проектирования и разработки компьютерных моделей космических систем и комплексов // Международный военно-технический форум «Армия-2019». – М.: МО РФ, 2019. – 12 с.
4. ГОСТ РВ 1210-003-2007. Автоматизированные системы управления войсками. Требования к математическому и программному обеспечению. – М.: Стандартинформ, 2008. – 23 с.
5. Колесник А.В., Прокопенко Е.А., Янов С.В. Результаты разработки прикладного программного обеспечения во 2-ом управлении военного института (научно-исследовательского) // Новатор. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 34. – С. 56–61.

Е.В. Благодыренко,
кандидат техн. наук;
И.П. Коробченко

НАБЛЮДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНЫМИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ С РЕГИСТРАЦИЕЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены принципы наблюдения космических объектов наземными оптико-электронными системами с регистрацией спектрофотометрической информации и возможности ее использования для распознавания наблюдаемых космических аппаратов. Представлена обобщенная структурная схема наземной оптико-электронной системы наблюдения космических объектов с регистрацией спектрофотометрической информации. Проведен сравнительный анализ двух основных методов получения спектрофотометрической информации – многоспектральной фотометрии и спектрофотометрии. Показана возможность технической реализации введения канала спектрофотометрических измерений в существующие наземные оптико-электронные системы траекторных измерений параметров движения космических аппаратов в процессе их модернизации.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, наблюдение космических объектов, спектрофотометрическая информация, распознавание космических аппаратов.

ВВЕДЕНИЕ

Наземные оптико-электронные системы (ОЭС) в настоящее время являются основным типом информационных средств, используемых для наблюдения космических объектов (КО) в интересах их наблюдательных исследований, мониторинга околоземного космического пространства, каталогизации «космического мусора», контроля проведения космических экспериментов и предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве [1–3]. Они позволяют получать следующие виды информации о наблюдаемых космических аппаратах (КА) и других КО: траекторные измерения параметров движения, интегральные фотометрические измерения, видеоизображения, многоспектральные и спектрофотометрические измерения.

Наибольшее развитие к настоящему времени получили наземные ОЭС наблюдения КО, позволяющие проводить измерение параметров их движения и интегральные фотометрические измерения [4, 5]. Однако, для решения комплекса задач наблюдения и распознавания КА недостаточно использовать лишь эти виды координатной (измерения параметров движения) и некоординатной (интегральные фотометрические измерения) информации. В настоящей статье анализируются возможности технической реализации в наземных ОЭС наблюдения КО при сохранении их общего конструктивного облика регистрации еще одного вида некоординатной информации – спектрофотометрической информации.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Спектрофотометрические измерения блеска КО можно считать реализацией фотометрических измерений в нескольких спектральных диапазонах. При этом в отличие от технической реализации получения видеоизображений КО повышение информационных возможностей наземных ОЭС может быть обеспечено без существенного изменения их общего конструк-

тивного облика, прежде всего, без увеличения размера оптического телескопа, являющегося наиболее критичным элементом, определяющим уровень сложности и стоимость ОЭС.

Интегральная фотометрическая информация представляет собой измерение меняющейся во времени яркости наблюдаемого КО при изменении ракурса наблюдения – фотометрические реализации. Получение фотометрических реализаций является относительно простой технической задачей, так как измерение блеска наблюдаемого КО осуществляется в процессе фотодетектирования принимаемого оптического излучения и не связано с необходимостью использования дополнительной специальной аппаратуры. Поэтому фотометрические каналы для измерения в интегральном свете блеска наблюдаемых КА, как правило, дополняют астрометрические измерительные каналы наземных ОЭС траекторных измерений параметров движения КА [4, 5]. Реализация в таких ОЭС двух информационных каналов: астрометрического для определения угловых координат КА и фотометрического для получения фотометрической кривой блеска (ФКБ) КА, позволяет синхронно получать координатную и некоординатную информацию о наблюдаемых КА и других КО.

Характер отражения солнечного света поверхностью любого объекта зависит от его формы и отражательных характеристик освещенных поверхностей, поэтому каждый КО при наблюдении под разными ракурсами проявляет свою индивидуальность специфической формой ФКБ. Это характерно, прежде всего, при наблюдении КА, являющихся техногенными объектами, которые представляют собой сложные конструкции, состоящие из различных материалов (компонентов), и имеют различный характер движения относительно своего центра масс. Так, для КА, стабилизированных по трем осям, изменение ракурса наблюдения наземными ОЭС происходит достаточно плавно только за счет перемещения КА в зоне обзора, и блеск наблюдаемого КА изменяется лишь по фазе. А для КА, стабилизированных вращением, направление его вектора кинетического момента сохраняется в пространстве и во времени, и имеет место заметное изменение блеска вращающегося КА во время наблюдений, которое имеет ярко выраженный периодический характер. Техногенное происхождение имеют и большинство элементов «космического мусора».

Блеск КА является весьма характерной величиной, зависящей от его формы и ракурса, и при решении ряда задач распознавания КА с точностью до класса их ФКБ при наличии соответствующей базы данных позволяет уверенно отождествлять КА. Для получения ФКБ при изменении блеска наблюдаемого КА в широком диапазоне частот требуется использование высокоскоростных (с кадровой частотой до 100 Гц) и высокочувствительных (с усилителями света на входе) телевизионных камер. Поэтому в современных ОЭС наблюдения КО используются телевизионные камеры с матрицами на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). ПЗС-матрицы, формирующие видеосигнал высокого качества, имеют высокую квантовую эффективность и широкий интервал спектральной чувствительности, охватывающий области спектра оптического излучения от ближней ультрафиолетовой до ближней инфракрасной.

Однако при решении ряда задач распознавания и оценки состояния наблюдаемых КА по фотометрической информации их ФКБ, полученных в интегральном свете, оказывается недостаточно. Это обусловлено тем, что при фотометрировании КО регистрируется только один энергетический параметр – блеск, характеризующий отраженное от наблюдаемого КА оптическое излучение, обычно в видимой области спектра. Это позволяет распознавать КА с точностью до класса и уверенно различать КА простой формы, когда отражательные свойства их поверхности однородны и поддаются статистическому описанию. В то же время для распознавания КА в пределах одного класса и различения КА сложной формы необходимо использование дополнительной некоординатной информации, учет которой позволяет существенно расширить информационные возможности ОЭС наблюдения КА. Такая информация содержится в спектре (по длинам волн) отраженного от КА солнечного излучения.

Таким образом, информативность фотометрических измерений существенно возрастает при регистрации спектрофотометрической информации – фотометрических реализаций в нескольких спектральных диапазонах. ФКБ, зарегистрированные не в интегральном свете, а на различных длинах волн оптического излучения, характеризуют спектральные признаки блеска КА – спектральное распределение отраженного от КА солнечного излучения, зависящие от значений спектральных коэффициентов отражения материалов его внешних покрытий. Сравнение амплитудных параметров кривых блеска КА при их регистрации в различных участках спектра позволяют классифицировать КА по элементам конструкции и материалам поверхности. При сложной конструкции КА и использовании различных материалов (компонентов) его внешних элементов спектральное распределение отраженного от КА солнечного излучения и его характерные участки позволяют выявить различия КА по их физическим характеристикам отражающих поверхностей, которые являются важными признаками при распознавании и отождествлении наблюдаемых КА [2, 6].

Достоинством спектрофотометрических измерений является то, что они могут быть реализованы введением в оптический тракт ОЭС элементов, выделяющих спектральные составляющие принимаемого оптического излучения, и их проведение не требует увеличения разрешающей способности ОЭС наблюдения КО. Благодаря этому не предъявляются дополнительные требования к оптическому телескопу ОЭС, и спектрофотометрический канал так же, как и фотометрический, может быть введен в структуру ОЭС траекторных измерений параметров движения КА. Основным ограничением при реализации спектрофотометрических измерений является требование достаточного уровня мощности принимаемого оптического излучения в каждом спектральном диапазоне.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ В НАЗЕМНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Получение спектральных признаков блеска КА в ОЭС осуществляется двумя методами: многоспектральной фотометрии и спектрофотометрии. Различие между этими двумя методами определяется принципами их технической реализации. В многоспектральной (многоцветной) фотометрии измерение блеска КА в различных диапазонах длин волн происходит с помощью выделения их светофильтрами. В спектрофотометрии измерение блеска КА в различных диапазонах длин волн происходит в результате разложения светового потока в спектр с помощью диспергирующего элемента – призмы или дифракционной решетки. В обоих случаях в оптический тракт ОЭС между оптическим телескопом и телевизионной камерой вводится элемент, выделяющий спектральные составляющие принимаемого оптического излучения, и необходимо обеспечить их параллельную или последовательную регистрацию для получения ФКБ в различных спектральных диапазонах.

На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема наземной ОЭС наблюдения КО с регистрацией спектрофотометрической информации, реализующей принцип многоспектральной фотометрии. Для этого перед телевизионной (ТВ) камерой устанавливается блок переключаемых спектральных светофильтров O, B, V, R . Нейтральный светофильтр O обеспечивает регистрацию интегральных фотометрических измерений в диапазоне длин волн 360-800 нм. Светофильтры B, V, R обеспечивают регистрацию спектральных составляющих принимаемого оптического излучения, их центральные частоты и полосы пропускания соответствуют фотометрической системе Джонсона и приведены в табл. 1. При необходимости измерения могут проводиться с использованием других светофильтров в других фотометрических системах [7] и спектральных диапазонах.

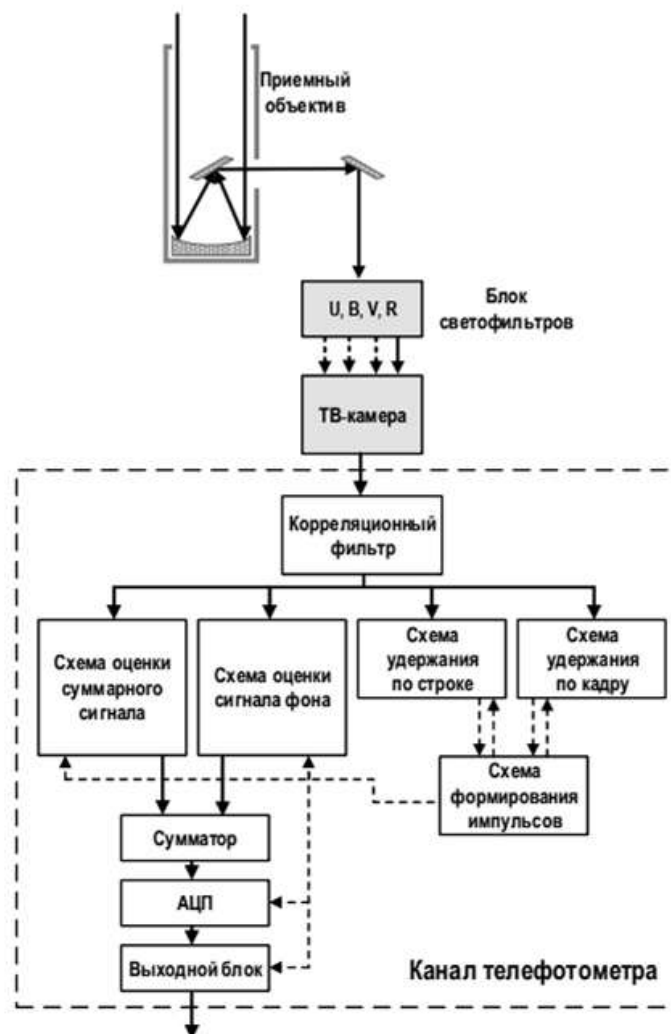


Рис. 1. Обобщенная структурная схема наземной ОЭС наблюдения КО с регистрацией спектрофотометрической информации

Таблица 1

Параметры фотометрической системы Джонсона

| Фильтр | Центральная длина волны, нм | Полоса пропускания, нм |
|----------|-----------------------------|------------------------|
| <i>B</i> | 441 | 100 |
| <i>V</i> | 556 | 80 |
| <i>R</i> | 700 | 210 |

Световой поток от наблюдаемого КО собирается телескопическим объективом оптического телескопа и направляется на ТВ-камеру через блок переключаемых спектрально-зональных светофильтров. С выхода ТВ-камеры зарегистрированный телевизионный сигнал поступает в канал телефотометра. С помощью корреляционного фильтра на входе канала телефотометра выполняется корреляционная обработка принимаемых сигналов, что позволяет повысить отношение сигнал/шум в 3–4 раза по сравнению с сигнал/шум на выходе ТВ-камеры, после чего широкополосный видеосигнал подается на две группы схем:

- схемы удержания наблюдаемого объекта по строке и по кадру;
- схемы опроса видеосигнала, которые осуществляют оценку суммарного входного излучения, включающего как сигнальную и фоновую составляющие, так и только фоновую составляющую.

Схемы удержания наблюдаемого объекта по строке и по кадру предназначены для фиксации импульсов опроса видеосигнала в области максимума сигнала от объекта. Эта процедура необходима для того, чтобы исключить влияние погрешности сопровождения наблюдаемого объекта телескопом и турбулентности воздушной массы над телескопом, приводящих к изменению пространственного положения изображения от наблюдаемого объекта в плоскости ПЗС-матрицы ТВ-камеры.

В схемах опроса видеосигнала при оценке суммарного входного излучения и его фоновой составляющей осуществляется временное накопление выходного видеосигнала ТВ-камеры, при этом постоянная времени накопления выбирается в зависимости от типа объекта и характера решаемой задачи. Управление схемами опроса и схемами удержания объекта осуществляется схемой формирования импульсов опроса, работа которой синхронизируется строчными и кадровыми синхроимпульсами, снимаемыми с ТВ-камеры.

Функция изменения блеска наблюдаемого объекта в спектральном диапазоне, задаваемом спектральным фильтром на входе ТВ-камеры, регистрируется в сумматоре, с выхода которого снимается узкополосный аналоговый сигнал, характеризующий изменение яркости наблюдаемого объекта во времени в относительных единицах измерения. Далее этот сигнал в блоке аналого-цифрового преобразователя (АЦП) оцифровывается и через выходной блок передается на выход канала телефотометра.

Измерения ФКБ методом многоспектральной фотометрии реализованы в существующих ОЭС траекторных измерений параметров движения КА [5]. Фотометрические измерения по большинству КА проводятся поочередно в интегральном диапазоне 0 и в диапазонах B , V , R в начале и конце сеанса наблюдения, а в основное время – с использованием одного из B , V , R фильтров, как правило, фильтра диапазона V . Чувствительность современных ПЗС-камер позволяет проводить спектрофотометрические измерения при переключении светофильтров с частотой до 100 Гц. КА со слабым блеском измеряется только в интегральном диапазоне 0, поскольку при работе с фильтрами B , V , R проникающая способность фотометрического канала уменьшается. Это обусловлено основным ограничением при реализации регистрации спектрофотометрической информации – требованием достаточного уровня мощности принимаемого оптического излучения в каждом спектральном диапазоне.

Все фотометрические измерения обрабатываются после окончания сеанса наблюдения в режиме постобработки. При проведении наблюдательных исследований КА возможно интерактивное управление режимами наблюдения и регистрации спектрофотометрических измерений в различных спектральных каналах. Управление переключением спектральных фильтров происходит после выявления характерной периодичности в формируемой ФКБ, либо по специальным командам оператора, ведущим наблюдение за регистрируемыми результатами измерений.

До и после сеанса наблюдения КО проводится калибровка результатов спектрофотометрических измерений по каталожным звездам. Калибровка необходима для пересчета измеренного блеска КА в значения внеатмосферных звездных величин. При использовании фотометрической системы Джонсона измерениям в интегральном спектральном диапазоне 0 обычно ставятся в соответствие звездные величины диапазона V системы Джонсона, поскольку спектральная характеристика большинства используемых ПЗС-камер охватывает в основном B и V диапазоны системы Джонсона, а в диапазоне V поглощение и влияние атмосферы значительно меньше, чем в B диапазоне.

При реализации принципа спектрофотометрии в обобщенной структурной схеме наземной ОЭС наблюдения КО с регистрацией спектрофотометрической информации, представленной на рис. 1, вместо блока переключаемых светофильтров используется диспергирующий элемент – призма или дифракционная решетка. В данном случае необходимо пространственное согласование ТВ-приемника с соответствующей спектральной полосой, выделяемой из принимаемого излучения, а число и полоса используемых спектральных каналов ограничивают-

ся спектральным разрешением диспергирующего устройства и уровнем мощности принимаемого оптического излучения в каждом спектральном диапазоне.

Многоцветная фотометрическая система, реализуемая с использованием светофильтров, может включать до нескольких десятков спектральных каналов. Спектрофотометрическая система, реализуемая с использованием диспергирующих элементов, может включать до сотен спектральных каналов. Независимо от методов выделения принимаемого излучения различных спектральных диапазонов получение фотометрических реализаций обычно осуществляется в стандартных фотометрических системах. При этом системы с шириной полос анализируемых спектральных диапазонов, полуширина которых превышает 300 А, относятся к широкополосным, системы с полушириной полос анализируемых спектральных диапазонов 100–300 А – к среднеполосным, а системы с полушириной полос анализируемых спектральных диапазонов менее 100 А – к узкополосным [7].

На практике выбор количества анализируемых спектральных диапазонов имеет важное значение. С одной стороны, стремление к увеличению информационных возможностей ОЭС наблюдения КО требует увеличения количества анализируемых спектральных диапазонов, что позволит повысить эффективность распознавания КО. С другой стороны, разбиение принимаемого оптического излучения на очень узкие участки спектра будет приводить к уменьшению светового потока в каждом спектральном диапазоне, уменьшению отношения сигнал-шум в каждом спектральном канале и затруднять выделение по зашумленным ФКБ информации о наблюдаемых КО. В результате обнаружительная способность ОЭС наблюдения КО в интегральном и многоспектральном режимах будет существенно различаться, что необходимо учитывать при планировании сеансов наблюдения КА и других КО. Поэтому при решении задач наблюдения КА в общем случае имеет место оптимальное число анализируемых спектральных диапазонов, обеспечивающее получение наибольшего количества информации о наблюдаемых КА.

Также необходимо отметить, что в зависимости от характера изменения блеска наблюдаемого КА фотометрические и спектрофотометрические измерения осуществляются с различным временным разрешением. Частота регистрации принимаемого оптического излучения ПЗС-камерой может составлять от 0,1 Гц до 100 Гц. При работе по высокочастотным низкоорбитальным КА и геостационарным КА, стабилизированным вращением, как правило, используются измерения с высоким временным разрешением. Дискретность отсчетов блеска КА в этом случае постоянна и составляет от сотых долей секунды до единиц секунд. Интервалы наблюдения при этом относительно невелики и составляют от единиц до десятков минут. При работе по КА с трехосной стабилизацией, блеск которых изменяется сравнительно медленно, данные фотометрических наблюдений могут представлять собой отсчеты значений блеска, осредненные на интервале от единиц секунд до единиц минут. Продолжительность сеанса наблюдений в этом случае составляет от десятков минут до нескольких часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход от интегральных фотометрических измерений к спектрофотометрическим измерениям является естественным направлением развития наземных ОЭС наблюдения КО при решении прикладных задач распознавания КА. Различия в спектральных коэффициентах отражения материалов внешних конструктивных элементов КА различных типов и соотношений между размерами этих элементов приводят к различию в спектрах отраженного от них солнечного излучения. Эти индивидуальные особенности изменения блеска наблюдаемых КА в различных спектральных диапазонах позволяют с высокой степенью достоверности распознавать наблюдаемые КА с точностью до класса и внутри классов. Состав спектрофотометрических признаков, их выделение и обработка зависят от спектральной

разрешающей способности ОЭС наблюдения, а также от количества анализируемых спектральных диапазонов.

Рассмотренные возможности технической реализации регистрации спектрофотометрической информации показывают возможность введения спектрофотометрического канала в состав существующих ОЭС наблюдения КО в процессе их модернизации. Для последующего решения задач распознавания и отождествления КА по результатам спектрофотометрических изображений необходимо создание и ведение баз данных с ФКБ различных КА в различных спектральных диапазонах.

Список используемых источников

1. *Свиридов К.Н.* Оптическая локация космического мусора. – М.: Знание, 2006. – 488 с.
2. *Муртазов А.К.* Мониторинг загрязнений околоземного космического пространства оптическими средствами. – Рязань: РГУ, 2010. – 248 с.
3. *Вениаминов С.С.* Космический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 207 с.
4. Новый подход к разработкам оптико-электронных средств мониторинга околоземного космического пространства / А.Б. Бельский С.Е. Здор, В.И. Колинко, Н.Г. Яцкевич // Оптический журнал. – 2009. – № 8. – С. 22–28.
5. *Васильев В.П., Шаргородский В.Д.* Современное состояние высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии в России // Фотоника. – 2017. – № 6. – С. 74–85.
6. *Жуков А.О., Логунов С.В.* Способ определения конструктивных особенностей космических объектов по спектральным характеристикам // Нелинейный мир. – 2013. – № 8. – С. 554–558.
7. *Страйжис В.* Многоцветная фотометрия звезд. – Вильнюс: Мокслас, 1977. – 310 с.

Д.И. Бучинский;
В.В. Вознюк,
кандидат техн. наук, доцент

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КОГЕРЕНТНОГО ДЕМОДУЛЯТОРА ДВОИЧНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С РАСШИРЕННЫМ СПЕКТРОМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАУССОВСКОЙ ПОМЕХИ С ОГРАНИЧЕННЫМ ПО ПОЛОСЕ РАВНОМЕРНЫМ СПЕКТРОМ

Представлены результаты аналитического и численного исследования помехоустойчивости когерентного демодулятора двоичных фазоманипулированных сигналов с расширением спектра при воздействии гауссовых помех с равномерным ограниченным по полосе спектром. В ходе аналитического исследования получена математическая модель воздействия таких помех на когерентный демодулятор двоичных фазоманипулированных сигналов с расширением спектра. На основе численного исследования полученной аналитической модели были определены параметры помех с равномерным ограниченным по полосе спектром, воздействие которых максимально снижает качество приема.

Ключевые слова: помехоустойчивость, сигнал с расширением спектра, помеха с равномерным спектром, шумоподобный сигнал.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире повсеместное применение находят системы радиосвязи, использующие сигналы с расширением спектра. Прием таких сигналов, как правило, осуществляется с помощью когерентной демодуляции. Поэтому вопрос изучения помехоустойчивости когерентных демодуляторов фазоманипулированных сигналов с расширением спектра актуален. Как правило, при моделировании в качестве модели помехи используются гауссовы случайные процессы с ограниченным по полосе равномерным спектром, ширина полосы которых равна, либо больше ширины спектра полезного сигнала [1–5]. Такие модели хорошо описывают воздействие индустриальных шумов и тепловых помех на приемную аппаратуру. Однако, в настоящее время в связи с широким распространением различных связных радиоэлектронных систем, часто наблюдается ситуация возникновения взаимных помех, когда на системы радиосвязи, использующие сигналы с расширением спектра, воздействуют сигналы узкополосных систем передачи данных. В ряде случаев, такие воздействия в первом приближении могут быть описаны случайным процессом с равномерным спектром, ширина полосы которого значительно меньше, чем ширина полосы сигнала средства радиосвязи, использующих сигналы с расширением спектра.

Целью работы является исследование зависимости влияния узкополосных гауссовых помех с ограниченным равномерным спектром на когерентный демодулятор двоичных фазоманипулированных сигналов с расширением спектра (ширина спектра помехи, расстройка центральной частоты помехи и сигнала), для случая когда ширина полосы непреднамеренной помехи меньше, чем ширина полосы полезного сигнала.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХИ НА КОГЕРЕНТНЫЙ ДЕМОДУЛЯТОР ДВОИЧНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА

В ходе аналитического исследования влияния гауссовых помех с ограниченным равномерным спектром на когерентный демодулятор двоичных фазоманипулированных сигналов с расширением спектра была использована модель помехи в виде узкополосного процесса с частотой ω_j :

$$J(t) = A(t) \cos(\omega_j t + \varphi(t)), \quad (1)$$

где $A(t)$ – амплитуда помехового сигнала;

ω_j – центральная круговая частота непреднамеренной помехи, находящаяся в полосе пропускания приемника;

$\varphi(t)$ – фаза колебания.

Амплитуда в данной модели меняется по формуле

$$A(t) = \sqrt{2P_J} g(t), \quad (2)$$

где P_J – мгновенная мощность стационарного случайного процесса;

$g(t)$ – случайный процесс.

Закон изменения амплитуды для помехи данного вида представляет собой случайный процесс с рэлеевской плотностью распределения $W(g) = (g/\sigma_g^2) e^{-g^2/2\sigma_g^2}$, с математическим ожиданием $m_g = \sqrt{\pi/2}\sigma_g$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_g = (2 - \pi/2)\sigma_g^2$. Фаза так же представляет собой случайный процесс, но уже с равномерным распределением в интервале $\varphi(t) \in (0, 2\pi)$, математическим ожиданием $m_\varphi = \pi$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_\varphi = \pi/\sqrt{3}$.

Оценим воздействие приведенной выше гауссовой помехи с ограниченным спектром на когерентный демодулятор двоичных фазоманипулированных (ФМ) широкополосных шумоподобных сигналов (ШПС). Используя результаты [6], выведем общее выражение для средней вероятности битовой ошибки для рассматриваемого класса помех и когерентных приемных устройств, структурная схема которых приведена на рис. 1.

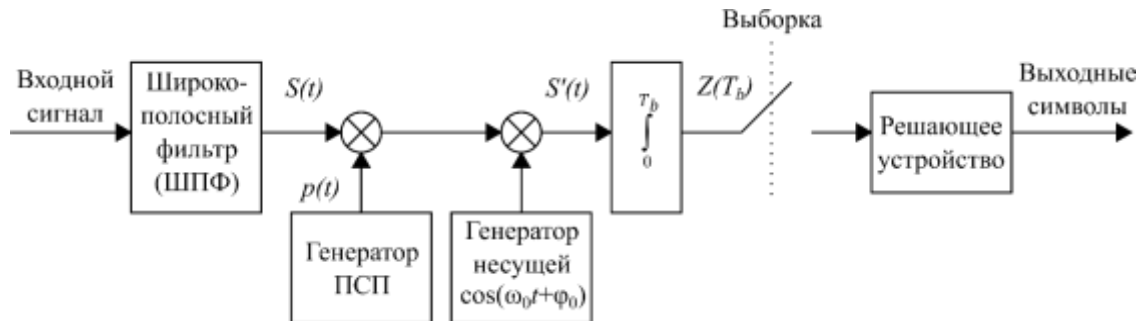


Рис. 1. Структурная схема приемного когерентного демодулятора двоичных фазоманипулированных сигналов с расширением спектра

Суммарный сигнал на выходе широкополосного фильтра приемника в условиях воздействия помехи $J(t)$ можно представить в виде:

$$S(t) = \sqrt{2P_s} \cdot d(t) \cdot p_s(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + n(t) + J(t), \quad (3)$$

где P_s – мощность сигнала;

$d(t)$ – информационная импульсная последовательность, принимающая значения 1 и -1;

$p_s(t)$ – расширяющая спектр псевдослучайная импульсная последовательность, принимающая значения 1 и -1;

$n(t)$ – тепловые шумы приемника.

Собственные шумы приемника в ограниченной полосе пропускания хорошо описываются гауссовским случайным процессом:

$$n(t) = n_1(t) \cos(\omega_0 t) + n_2(t) \sin(\omega_0 t), \quad (4)$$

где $n_I(t)$ и $n_Q(t)$ – статистически независимые гауссовские случайные процессы с нулевым средним значением и дисперсией $\sigma_I = \sigma_Q = \sigma_0$.

При условии наличия кодовой синхронизации, т. е. когда выполняется равенство $p_s(t) \cdot p(t) = 1$, где $p(t)$ – псевдослучайная последовательность опорного генератора, принимаемое колебание после умножения на заданную псевдослучайную последовательность будет представлять собой сумму сжатого по спектру информационного сигнала и слагаемых, образованных непреднамеренной помехой и собственными шумами приемника:

$$S'(t) = \sqrt{2P_s} \cdot d(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + n(t) \cdot p(t) + J(t) \cdot p(t). \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что при умножении на $p(t)$ помимо сжатия спектра полезного сигнала происходит расширение спектра помехи $J(t)$ и некоррелированного шума $n(t)$. Расширение спектра помехи и шума приводит к уменьшению их спектральной плотности. При условии идеальной синхронизации на вход решающего устройства будет поступать статистика $Z(T_b)$, которая может быть описана формулой

$$Z(T_b) = \pm \sqrt{2P_s T_b} + 2 \int_0^{T_b} n(t) p(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_1) dt + 2 \int_0^{T_b} J(t) p(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_1) dt, \quad (6)$$

где T_b – длительность одного информационного символа.

В зависимости от того, какой знак принимает статистика $Z(T_b)$, на выходе интегратора принимается решение о том, какой информационный сигнал содержался в принимаемой реализации. Так при положительном значении статистики считается, что смесь сигнал-шум содержит значение информационного сигнала $d(t) = +1$, а при отрицательном значении – $d(t) = -1$. Поэтому ошибка представляет собой несовпадение знака статистики $Z(T_b)$ на входе решающего устройства и знака передаваемого символа $d(t)$.

Для оценки помехозащищенности рассматриваемых средств радиосвязи найдем отношение сигнал-шум на выходе интегратора, которое будет иметь вид

$$q = \frac{E\{Z(T_b)\}^2}{D\{Z(T_b)\}}, \quad (7)$$

где $E\{Z(T_b)\}$ – математическое ожидание решающей статистики;

$D\{Z(T_b)\}$ – дисперсия решающей статистики.

Средняя вероятность битовой ошибки при воздействии аддитивных гауссовских помех определяется выражением [6]

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{q}{\sqrt{2}}\right), \quad (8)$$

где $\operatorname{erfc}(x)$ – дополнительный интеграл ошибок;

q – отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума.

Примем далее, что $n(t)$ и $J(t)$ – стационарные статистически независимые случайные процессы с нулевым средним значением. В этом случае математическое ожидание статистики решения $Z(T_b)$:

$$\{Z(T_b)\} = \pm \sqrt{2P_s T_b}. \quad (9)$$

Дисперсия статистики решения $Z(T_b)$ из условия статистической независимости $n(t)$, $J(t)$, $p(t)$ равна сумме двух составляющих z_1 и z_2 :

$$D\{Z(T_b)\} = D\{z_1\} + D\{z_2\}, \quad (10)$$

$$z_1 = 2 \int_0^{T_b} n(t) p(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_1) dt, \quad (11)$$

$$z_2 = 2 \int_0^{T_b} J(t) p(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_1) dt. \quad (12)$$

Определим дисперсию данных величин. Для описания собственных шумов приемника $n(t)$ будем использовать модель белого гауссовского шума, т. е. дельта коррелированный нормальный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием. Автокорреляционную функцию такого процесса $R_n(t, s) = E\{n(t)n(t')\} = N_0\delta(t-t')/2$ выражают через N_0 – спектральную плотность мощности шума $n(t)$, где t' – смещенная ось времени t . С учетом принятых допущений (11) примет вид:

$$D\{z_1\} = 4 \int_0^{T_b} \int_0^{T_b} E\{n(t)n(t')\} E\{p(t)p(t')\} \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \cos(\omega_0 t' + \varphi_1) dt dt'. \quad (13)$$

В качестве модулирующей псевдослучайной последовательности используется псевдослучайная последовательность с заданными автокорреляционными свойствами [7]. Для больших коэффициентов расширения спектра (периодов псевдослучайной последовательности) $B \gg 1$ можно считать, что $p(t)$ независимо и равновероятно принимает значения ± 1 на каждом интервале времени $t \in [n\tau_u, (n+1)\tau_u]$, где n – номер символа расширяющей последовательности, а τ_u – длительность импульса расширяющей последовательности. Поэтому автокорреляционную функцию псевдослучайной последовательности можно описать выражением

$$R_p(t-t') = E\{p(t)p(t')\} = \begin{cases} 1 - \frac{|t-t'|}{B\tau_u}, & |t-t'| < \tau_u \\ -\frac{1}{B}, & |t-t'| \geq \tau_u \end{cases}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (13) получим выражение для дисперсии решающей статистики в условиях отсутствия помехового воздействия:

$$\begin{aligned} D\{z_1\} &= 2N_0 \int_0^{T_b} \int_0^{T_b} \delta(t-t') R_p(t-t') \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \cos(\omega_0 t' + \varphi_1) dt dt' = \\ &= N_0 \int_0^{T_b} \int_0^{T_b} \delta(t-t') R_p(t-t') \left[\cos(\omega_0 [t-t']) + \cos(\omega_0 [t+t'] + 2\varphi_1) \right] dt dt' = \\ &= N_0 R_p(0) \int_0^{T_b} [1 + \cos(2\omega_0 t' + 2\varphi_1)] dt' \approx N_0 T_b. \end{aligned} \quad (15)$$

При вычислении $D\{z_2\}$ учтем тот факт, что $J(t)$ – является полосовым гауссовским шумом, частотные параметры которого частично согласованы с аналогичными параметрами полезного сигнала, дисперсия данного полосового гауссовского шума задана величиной P_J . По аналогии с (13) запишем:

$$\begin{aligned} D\{z_2\} &= 4 \int_0^{T_b} \int_0^{T_b} E\{J(t)J(t')\} E\{p(t)p(t')\} \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \cos(\omega_0 t' + \varphi_1) dt dt' = \\ &= 4 \int_0^{T_b} \int_0^{T_b} R_J(t-t') R_p(t-t') \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \cos(\omega_0 t' + \varphi_1) dt dt'. \end{aligned} \quad (16)$$

Так как рассматриваемая непреднамеренная помеха $J(t)$ представляет собой стационарный случайный процесс с равномерным ограниченным спектром, центральная частота которого лежит в полосе пропускания приемника, то ее спектральная плотность мощности может быть записана:

$$S_J(\omega) = \begin{cases} \frac{2\pi P_J}{W_1}, & |\omega \pm \omega_J| \leq \frac{W_1}{2} \\ 0, & |\omega \pm \omega_J| > \frac{W_1}{2} \end{cases}. \quad (17)$$

Учитывая стационарность процесса, автокорреляционная функция непреднамеренной помехи $J(t)$ может быть найдена по Теореме Винера-Хинчина, т. е. преобразованием Фурье от спектральной плотности мощности (17) [8]:

$$R_J(t-s) = E \{ J(t) J(t') \} = P_J \frac{\sin \left[\frac{W_1}{2} (t-t') \right]}{\left[\frac{W_1}{2} (t-t') \right]} \cos(\omega_J(t-t')). \quad (18)$$

Подставив (18) в (16), применив правило произведения косинусов и введя замену переменных $\tau = t - t'$, получим:

$$D \{ z_2 \} = 2 \int_{-T_b}^{T_b} R_J(\tau) R_p(\tau) [T_b - |\tau|] \cos(\omega_0 \tau) d\tau. \quad (19)$$

С учетом полученного выражение (19) отношение сигнала к сумме шума и помехи на выходе согласованного фильтра приемника, как функция от параметров помехи и сигнала, может быть записано в следующем виде:

$$q^2(\{P_s, \omega_0, B\}, \{P_J, \omega_J, W_1\}) = \frac{2P_s T_b^2}{N_0 T_b + 2P_J \int_{-T_b}^{T_b} \frac{\sin \left[\frac{W_1}{2} \tau \right]}{\left[\frac{W_1}{2} \tau \right]} \cos(\omega_J \tau) R_p(\tau) [T_b - |\tau|] \cos(\omega_0 \tau) d\tau}. \quad (20)$$

Аналитическое исследование выражения (20) возможно только для предельных случаев, когда $W_1 \rightarrow \infty$ и $W_1 \rightarrow 0$. Для первого случая выражение принимает вид

$$q^2(\{P_s, \omega_0, B\}, \{P_J, \omega_J, W_1\}) = \frac{2P_s T_b}{N_0} = \frac{2E_s}{N_0}, \quad (21)$$

где E_s – энергия символа.

Теперь отношение сигнал-шум не зависит от мощности помехи и принимает вид известного выражения для отношения сигнал-шум на выходе коррелятора. Это связано с тем, что при бесконечном увеличении полосы частот помехи при ее конечной мощности спектральная плотность мощности помехи будет стремиться к нулю, т.е. случай сводится к воздействию белого гауссовского шума.

Во втором случае помеха вырождается в гармоническую и выражение для отношения сигнал-помеха принимает вид [6]

$$q^2(\{P_s, \omega_0, B\}, \{P_J, \omega_J, W_1\}) = \frac{2P_s T_b}{N_0 + P_J \tau_u \operatorname{sinc}^2((\omega_J - \omega_0) \tau_u)}. \quad (22)$$

Дальнейшее аналитическое исследование зависимостей представленных выражением (20) затруднено, поэтому целесообразно численное исследование.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ НА ВЫХОДЕ КОГЕРЕНТНОГО ДЕМОДУЛЯТОРА СИГНАЛОВ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ ДВОИЧНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИИ

Проведем анализ выражения (20) используя методы численного интегрирования. Результаты вычисления выражения (20) приведены на рис.2 и 3. Так на рис.2 показаны зависимости отношения мощностей сигнала к мощности помехи при фиксированном отношении сигнал-шум на выходе узкополосного фильтра приемника, реализованного перемножителем смеси сигнала, шума и помехи. При этом, на данном рисунке по оси ординат отложены величины нормированного относительно базы сигнала B отношения мощностей сигнала к мощности помехи при фиксированном отношении сигнал-шум на выходе узкополосного фильтра приемника, по оси абсцисс – нормированные, относительно ширины спектра расширенного сигнала $W_s = 1/\tau_u$, значения ширины спектра помехи.

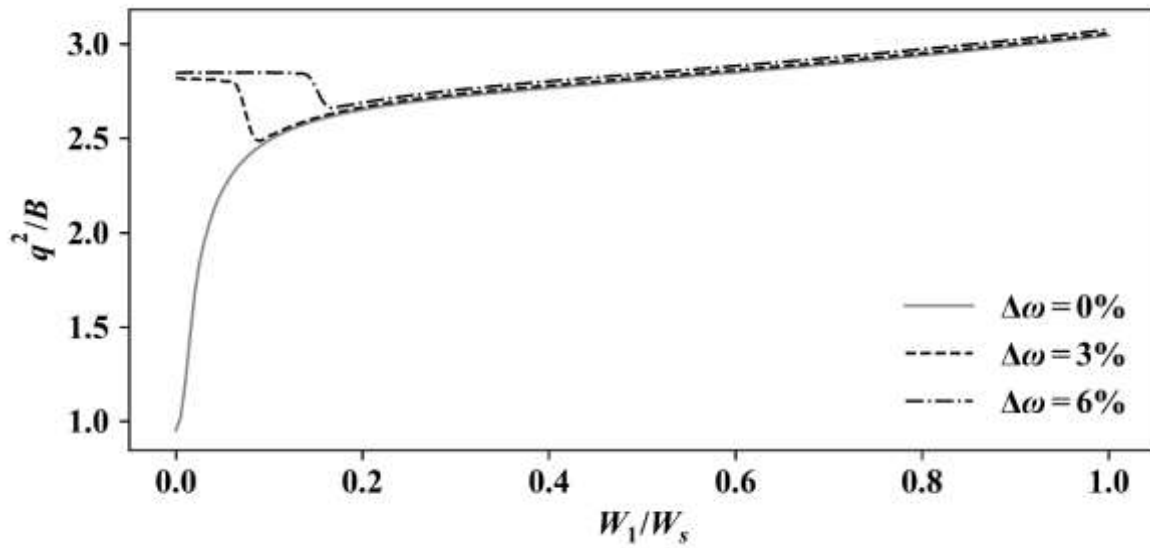


Рис. 2. Нормированные зависимости отношения мощности сигнала к мощности помехи при фиксированном отношении сигнал-шум (10 дБ) узкополосного фильтра приемника от нормированного значения ширины спектра помехи W_1 для фиксированных значений частотной расстройки $\Delta\omega$ несущих помехи и сигнала

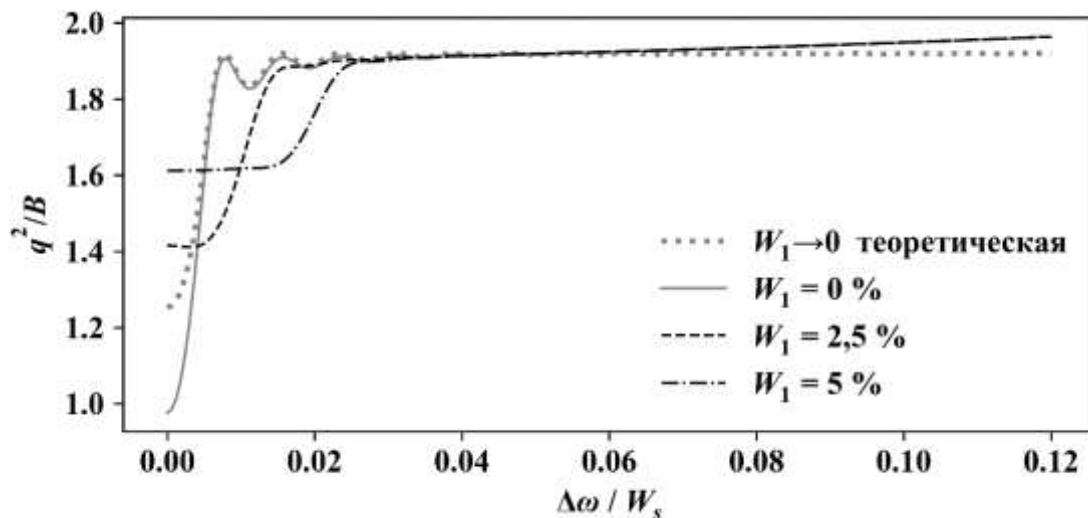


Рис. 3. Нормированные зависимости отношения мощности сигнала к мощности помехи при фиксированном отношении сигнал-шум (10 дБ) на выходе узкополосного фильтра приемника от нормированного значения частотной расстройки $\Delta\omega$ несущих помехи и сигнала для фиксированных значений нормированной ширины спектра помехи W_1

На рис. 4 и 5 показаны зависимости вероятности битовой ошибки от нормированного, относительно ширины спектра расширенного сигнала W_s , значения ширины спектра помехи W_1 и величины промаха несущей частоты помехи относительно несущей частоты сигнала для фиксированных значений отношения сигнал-помеха на входе в приемник и известной базы сигнала.

Приведенные зависимости получены при условии расстройки центральной частоты непреднамеренной помехи $\Delta\omega=0\%$, 3%, 6% относительно несущей сигнала, выраженной в процентах относительно величины ширины спектра полезного сигнала W_s .

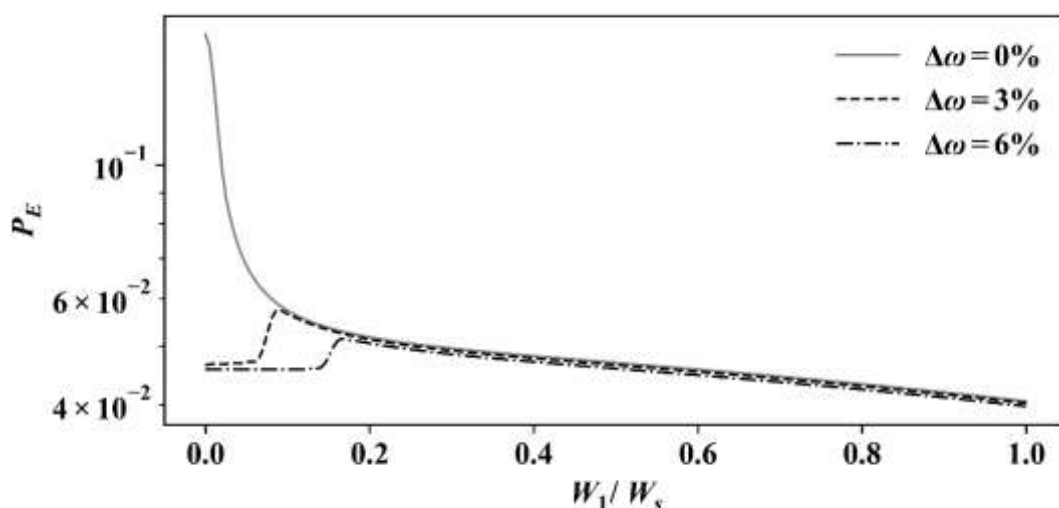


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от нормированного значения ширины спектра помехи W_1 для фиксированных значений частотной расстройки $\Delta\omega$ несущих помехи и сигнала и отношения сигнал-помеха (-10дБ) на входе приемника ФМ ШПС

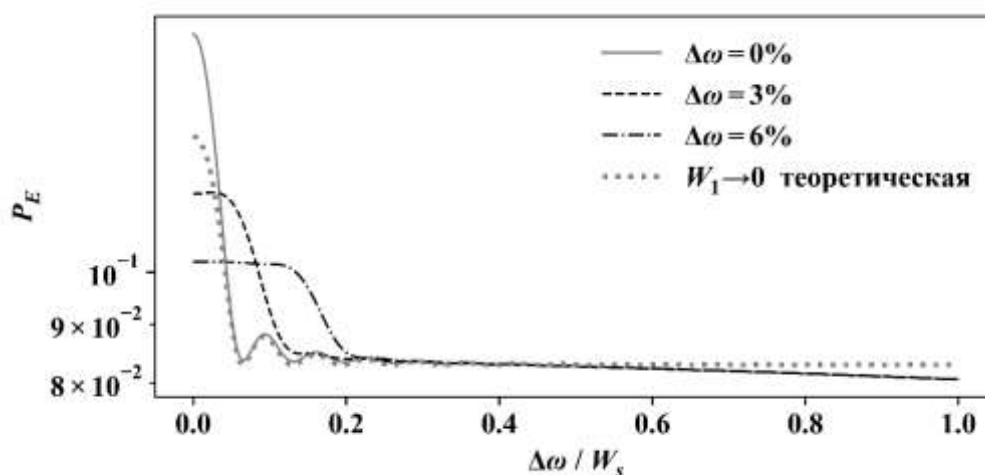


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки от нормированных значений частотной расстройки $\Delta\omega$ несущих помехи и сигнала для фиксированных значений ширины спектра помехи W_1 и отношения сигнал-помеха (-10дБ) на входе приемника ФМ ШПС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие важные выводы.

1. Наиболее уязвимы средства радиосвязи, использующие когерентный демодулятор сигналов ФМ ШПС в случае, когда непреднамеренная помеха представляет собой узкополосный случайный процесс с ограниченным по полосе равномерным спектром, эффективная ширина полосы которого составляет $W_1 \leq (1 \dots 2) \cdot W_s/B$, а средняя частота совмещена с несущей частотой полезного сигнала с ошибкой $\Delta\omega \leq (0,1 \dots 0,2) \cdot W_s/B$. В идеальном случае (для минимальных значений ширины спектра и расстройки несущих частот) такая помеха вырождается в гармоническое колебание на несущей частоте сигнала со случайной начальной фазой. Данная помеха приводит к максимальному повышению

вероятности ошибки при условии фиксированной мощности по сравнению с другими видами непреднамеренных помех.

2. По мере расширения спектра $2 \cdot W_s/B < W_I$ и увеличения расстройки несущих частот $(0,1 \dots 0,2) \cdot W_s/B < \Delta\omega$ шумовой помехи и сигнала опасность для СРС такой помехи скачкообразно снижается, проигрывая наиболее опасной в 2 раза с последующим монотонным падением до 2,5...3 раз в условиях сохранения свойств прицельности помехи по несущей частоте $(0,1 \dots 0,2) \cdot W_s/B < \Delta\omega \leq (0,1 \dots 0,2) \cdot W_s$ и ширине спектра $2 \cdot W_s/B < W_I \leq W_s$.

3. Для случая, когда шумовая помеха становится настолько широкополосной, что $W_s < W_I$, т.е. ширина спектра помехи становится существенно больше ширины спектра сигнала, расстройка по несущим частотам помехи и сигнала перестает вносить какое-либо влияние.

Список используемых источников

1. Мальцев Г.Н., Травкин В.С. Оптимальный прием сложных фазоманипулированных сигналов в спутниковых радиоканалах в условиях внутрисистемных помех // Информационно-управляющие системы. – 2006. – № 5. – С. 32–42.

2. Мальцев Г.Н., Евтеев А.В. Исследование помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок синхронизации по задержке // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 3. – С. 105–113.

3. Маслаков П.А., Паршуткин А.В., Фомин А.В. Модель функционирования канала спутниковой связи при воздействии нестационарных помех // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 651. – С. 78–83.

4. Вознюк В.В., Куценко Е.В. Помехоустойчивость систем радиосвязи с двоичными фазоманипулированными широкополосными сигналами при воздействии ретранслированных компенсационных помех типа прямой инверсии сигнала // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. № 660. – С. 44–56.

5. Агиевич С.Н., Луценко С.А. Оценка помехоустойчивости спутниковых систем радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические вопросы противодействия терроризму. – 2018. – № 9–10 (123–124). – С. 132–137.

6. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, В.И. Шестоपालов. – М.: Радиософт, 2011. – 548 с.

7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

8. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Примеры и задачи по статистической радиотехнике. – М.: Советское радио, 1970. – 600 с.

С.Х. Зиннуров,
кандидат техн. наук;
Е.А. Новиков,
доктор техн. наук, доцент;
Е.А. Степанова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ЛОГИКО-СОБЫТИЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW

В статье изложены подходы к аналитическому и имитационному моделированию процесса генерации, а также обслуживания трафика сложной структуры в устройстве коммутации. Для исследования предлагаются взаимозаменяемые модели источников прерываемого пуассоновского и гиперэкспоненциального потоков. В работе показывается взаимодозначное соответствие значений характеристик систем массового обслуживания прерываемого пуассоновского и гиперэкспоненциального потоков, параметры которых связаны известными отношениями пересчета. Предложено в качестве инструмента имитационного моделирования использовать программный комплекс Stateflow из состава Matlab/Simulink. Раскрыта логика функционирования ключевых элементов имитационной модели, проведено исследование и показана сходимость результатов аналитического и имитационного моделирования процесса обслуживания трафика сложной структуры, описываемого гиперэкспоненциальным и прерываемым пуассоновским процессами.

Ключевые слова: трафик сложной структуры, Stateflow, прерываемый пуассоновский процесс, гиперэкспоненциальное распределение.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие телекоммуникационных систем, рост потребностей в передаче разнородных потоков данных, а также изменение структуры потоков данных актуализируют вопросы обеспечения качества обслуживания передаваемого трафика. Вместе с тем, ограниченность ресурсов систем связи и передачи данных определяет необходимость постоянного совершенствования подходов к решению задачи эффективного использования имеющихся ресурсов при условии безусловного обеспечения качества обслуживания информационных потоков. Совершенствование таких подходов связано, в первую очередь, с развитием представлений о природе и структуре передаваемых потоков, а также закономерностях, определяющих их генерацию и обслуживание. При этом если представления исследователей о природе, структуре и процессах генерации различных видов потоков в настоящее время достаточно развиты и оформлены в виде большого числа аналитических [1] и имитационных моделей [2], то разработка аналитических моделей процесса обслуживания таких потоков наталкивается на трудности установления формальной связи между характеристиками системы обслуживания, например, скоростью передачи данных в канале связи, и параметрами передаваемых информационных потоков, поддающихся измерению и оценке.

Данная статья открывает цикл работ, посвященных разработке и исследованию аналитических и имитационных моделей процесса обслуживания трафика сложной структуры на основе сведения плотности произвольного распределения к суперпозиции плотностей экспоненциальных распределений.

В статье рассмотрены вопросы взаимного преобразования одной из разновидностей ON-OFF моделей – модели прерываемого пуассоновского процесса, и аналогичной ей модели гиперэкспоненциального процесса, а также особенности использования комплекса логи-

ко-событийного моделирования Matlab/Simulink/Stateflow для моделирования процессов генерации и обслуживания трафика сложной структуры.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ МОДЕЛЕЙ ИСТОЧНИКА ТРАФИКА НА ОСНОВЕ ПРЕРЫВАЕМОГО ПУАССОНОВСКОГО ПРОЦЕССА И ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Классический подход к решению задачи синтеза систем управления связью основан на представлении трафика моделью простейшего потока [3, 4]. Применение классического подхода для построения систем обслуживания современного мультисервисного трафика позволяет получить очень грубые оценки необходимой скорости передачи в каналах связи и зачастую либо не обеспечивает требуемое качество обслуживания трафика, либо приводит к существенно не эффективному использованию имеющегося ресурса. Под термином «мультисервисный трафик» в статье понимается нагрузка, формируемая совокупностью источников информации, передаваемых через элемент системы связи и передачи данных, каждый из которых имеет свои особенности генерации и систему требований, предъявляемых к качеству обслуживания. Количественно отличие современного мультисервисного трафика от простейшего потока принято оценивать с использованием коэффициента вариации интервала времени между соседними пакетами. Коэффициент вариации позволяет учесть пульсирующий характер мультисервисного трафика, выражающийся в скачкообразном заполнении буферов коммутационного оборудования, которое, в свою очередь, создает предпосылки к снижению своевременности обслуживания и увеличению вероятности отказа в обслуживании пакетов мультисервисного трафика.

Для моделирования трафика сложной структуры успешно используются такие модели как модели фрактального броуновского движения [2], модели фрактального гауссовского шума [2], регрессионные модели AR-, ARMA-, ARIMA- и FARIMA-процессов [2], вейвлет-модели [2], ON-OFF модели [2, 5–8]. Использование перечисленных моделей позволяет получать выборки трафика, достаточно хорошо приближенные к реальным. Однако, данные подходы основаны на использовании сложного математического аппарата, применение которого не позволяет связать параметры модели трафика сложной структуры с параметрами системы обслуживания такого трафика для определения минимально необходимой скорости передачи данных, обеспечивающей заданный уровень качества обслуживания.

Удобным и перспективным с точки зрения аналитического синтеза систем обслуживания трафика сложной структуры является подход, основанный на использовании так называемых ON-OFF моделей, представляющих процесс генерации трафика как последовательную смену периодов активности (ON), характеризующихся генерацией случайного потока пакетов, периодов неактивности (OFF), когда пакеты не генерируются. В работе [2] показано, что достаточно точной аппроксимацией реального сложного трафика являются ON-OFF модели, использующие Парето-распределение для описания процессов смены периодов ON и OFF, а также процесса генерации потока пакетов в периоды ON. Однако и такую достаточно простую для имитации реального сложного трафика модель затруднительно использовать для решения задачи синтеза системы обслуживания. Поэтому следующим шагом в направлении развития ON-OFF моделей может быть сведение плотностей Парето-распределения к суперпозиции плотностей экспоненциальных распределений на основе использования наработок научной школы В.А. Смагина [9].

Вместе с тем, оценивание качества полученного решения задачи синтеза систем обслуживания должно проводиться с использованием имитационных моделей. Средством моделирования, предоставляющим по-настоящему широкие возможности моделирования систем связи на физическом, канальном и сетевом уровнях, является программный комплекс логико-событийного моделирования Matlab/Simulink/Stateflow.

Естественной формой описания процессов генерации трафика в современных сетях связи является представление такого процесса чередованием интервалов пассивности (интервалы времени типа «OFF»), в течение которых источник генерирует так называемый фоновый трафик (его свойствами чаще всего можно пренебречь), и интервалов активности (интервалы времени типа «ON»), в течение которых то или иное сетевое приложение создает трафик, обладающий различными свойствами [5–8]. При этом как длительности интервалов времени между пакетами, так и длительности интервалов времени «ON» и «OFF» могут описываться различными вероятностными распределениями. Частным случаем ON-OFF моделей являются модели марковских процессов, модулируемых пуассоновскими процессами типа MMPP (Markov Modulated Poisson Processes). В статье рассматривается модель прерываемого пуассоновского процесса (IPP – Interrupted Poisson Process), являющаяся частным случаем модели MMPP, в которой используется экспоненциальное распределение для описания длительностей перечисленных выше интервалов (рис. 1).

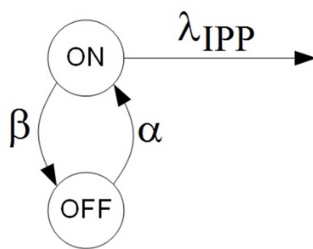
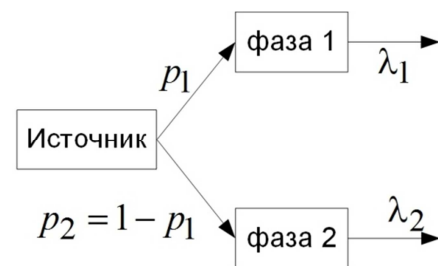


Рис. 1. Концептуальная модель IPP-потока

Рис. 2. Концептуальная модель H₂-потока

Известно [1], что модель IPP-потока связана с моделью гиперэкспоненциального потока второго порядка $H_2(\lambda_1, \lambda_2, p_1)$, которая образуется двумя экспоненциальными фазами (рис. 2), следующими соотношениями:

$$H_2 \rightarrow IPP: \begin{cases} \lambda_{IPP} = p_1 \lambda_1 + p_2 \lambda_2; \\ \alpha = p_1 p_2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2 / \lambda_{IPP}; \\ \beta = \lambda_1 \lambda_2 / \lambda_{IPP}, \end{cases} \quad (1)$$

$$IPP \rightarrow H_2: \begin{cases} \lambda_1 = \left(\lambda_{IPP} + \alpha + \beta + \sqrt{(\lambda_{IPP} + \alpha + \beta)^2 - 4\lambda_{IPP}\beta} \right) / 2; \\ \lambda_2 = \left(\lambda_{IPP} + \alpha + \beta - \sqrt{(\lambda_{IPP} + \alpha + \beta)^2 - 4\lambda_{IPP}\beta} \right) / 2; \\ p_1 = (\lambda_{IPP} - \lambda_2) / (\lambda_1 - \lambda_2); \\ p_2 = 1 - p_1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь λ_{IPP} – параметр потока в ON-состоянии источника;

β – интенсивность перехода источника в OFF-состояние:

$$\beta = 1 / \bar{t}_{on},$$

где \bar{t}_{on} – математическое ожидание длительности интервала времени пребывания источника в ON-состоянии;

α – интенсивность перехода источника в ON-состояние:

$$\alpha = 1 / \bar{t}_{off},$$

где \bar{t}_{off} – математическое ожидание длительности интервала времени пребывания источника в OFF-состоянии;

μ – параметр экспоненциального распределения времени обслуживания;

- λ_1 – параметр простейшего потока в 1-ой фазе гиперэкспоненциального источника;
- λ_2 – параметр простейшего потока во 2-ой фазе гиперэкспоненциального источника;
- p_1 – вероятности активации 1-ой фазы гиперэкспоненциального источника;
- p_2 – вероятности активации 2-ой фазы гиперэкспоненциального источника.

Под трафиком со сложной структурой обычно понимают такой трафик, для которого коэффициент вариации интервала времени между очередными пакетами имеет значение $c_\tau = \sigma_\tau / m_\tau > 1$ [4, 10], где m_τ и σ_τ – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение. Выражения для математического ожидания, дисперсии и коэффициента вариации гиперэкспоненциального и прерываемого пуассоновского потоков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики гиперэкспоненциального и прерываемого пуассоновского потоков

| Статистические характеристики | Распределение | |
|-------------------------------|---|---|
| | H ₂ -поток | IPP-поток |
| Математическое ожидание | $m_{H_2} = \frac{p_1}{\lambda_1} + \frac{p_2}{\lambda_2}$ | $m_{IPP} = \frac{\alpha + \beta}{\lambda \beta}$ |
| Дисперсия | $D_{H_2} = 2 \left(\frac{p_1}{\lambda_1^2} + \frac{p_2}{\lambda_2^2} \right) - \left(\frac{p_1}{\lambda_1} + \frac{p_2}{\lambda_2} \right)^2$ | $D_{IPP} = \frac{(\alpha + \beta)^2 + 2\lambda\alpha}{\lambda^2\beta^2}$ |
| Коэффициент вариации | $c_{H_2} = \frac{\sqrt{2(p_1\lambda_2^2 + p_2\lambda_1^2) + (p_1\lambda_2 + p_2\lambda_1)^2}}{p_1\lambda_2 + p_2\lambda_1}$ | $c_{IPP} = \frac{\sqrt{(\alpha + \beta)^2 + 2\lambda\alpha}}{\alpha + \beta}$ |

Соответствующие модели одноканального экспоненциального обслуживания IPP- и H₂-потоков с конечным буфером в виде графа марковской цепи показаны на рис. 3 и 4.

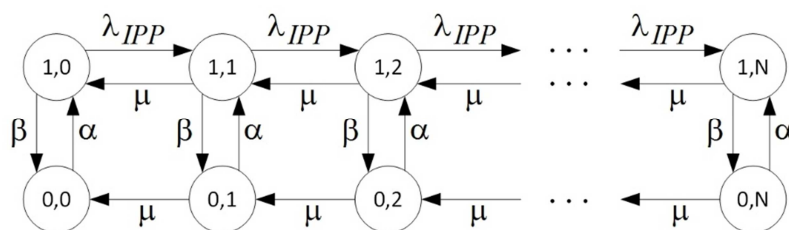
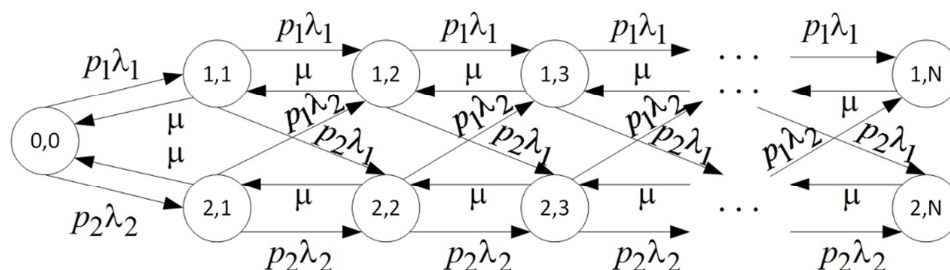


Рис. 3. Граф марковской цепи процесса обслуживания IPP-потока (модель IPP/M/1/N)

Рис. 4. Граф марковской цепи процесса обслуживания H₂-потока (модель H₂/M/1/N)

Графовым моделям, представленным на рис. 3 и 4, соответствуют аналитические модели, полученные на основе уравнений баланса:

$$A_{IPP}P_{IPP} = B_{IPP} \text{ и } A_{H_2}P_{H_2} = B_{H_2}, \quad (3)$$

где P_{IPP} – $2R$ -мерный вектор вероятностей графа состояний, представленный на рис. 3, $P_{IPP} = [p_{00} \ p_{10} \ p_{01} \ p_{11} \ \dots \ p_{1N}]^T$;

P_{H_2} – $(2N + 1)$ -мерный вектор вероятностей графа состояний, представленный на рис. 4, $P_{H_2} = [p_{00} \ p_{11} \ p_{21} \ p_{12} \ p_{22} \ \dots \ p_{2N}]^T$;

B_{IPP} – вектор-столбец правой части уравнения, $B_{IPP} = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T$;

B_{H_2} – вектор-столбец правой части уравнения, $B_{H_2} = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T$.

$$A_{IPP} = \begin{bmatrix} \alpha & -\beta & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha & \beta + \lambda_{IPP} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu + \alpha & -\beta & -\mu & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_{IPP} & -\alpha & \mu + \beta + \lambda_{IPP} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu + \alpha & -\beta & -\mu & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_{IPP} & -\alpha & \mu + \beta + \lambda_{IPP} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \mu + \alpha & -\beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\lambda_{IPP} & -\alpha & \mu + \beta \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{H_2} = \begin{bmatrix} p_1\lambda_1 + p_2\lambda_2 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -p_1\lambda_1 & \mu + \lambda_1 & 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -p_2\lambda_2 & 0 & \mu + \lambda_2 & 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p_1\lambda_1 & -p_1\lambda_2 & \mu + \lambda_1 & 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p_2\lambda_1 & -p_2\lambda_2 & 0 & \mu + \lambda_2 & 0 & -\mu & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p_1\lambda_1 & -p_1\lambda_2 & \mu + \lambda_1 & 0 & -\mu & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p_2\lambda_1 & -p_2\lambda_2 & 0 & \mu + \lambda_2 & 0 & -\mu & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -p_1\lambda_1 & -p_1\lambda_2 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -p_2\lambda_1 & -p_2\lambda_2 & 0 & \mu \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Получить значения стационарных вероятностей графовых моделей (рис. 3 и 4) можно путем приближенного в среднеквадратическом смысле решения систем уравнений:

$$P_{IPP} = [A_{IPP}^T A_{IPP}]^{-1} A_{IPP}^T B_{IPP} \text{ и } P_{H_2} = [A_{H_2}^T A_{H_2}]^{-1} A_{H_2}^T B_{H_2}. \quad (4)$$

Одна из задач, характерных для систем связи, заключается в определении минимального значения интенсивности обслуживания μ в канале, обеспечивающего заданный уровень вероятности потерь, которая в терминах задачи (4) определяется суммой вероятностей состоя-

ний (1, N) и (0, N) для графа на рис. 3 и суммой вероятностей состояний (1, N) и (2, N) для графа на рис. 4.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРАФИКА СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

Для построения имитационной модели трафика сложной структуры на основе сети массового обслуживания был использован программный продукт Matlab/Simulink/Stateflow [11]. Выбор программного продукта MATLAB для моделирования систем связи обусловлен его универсальностью, которая заключается в возможности использования большого количества открытых для модификации пользовательских библиотек, реализующих различные процессы на всех уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (физического, канального, сетевого и т.п.). Интерактивный инструмент Stateflow позволяет проектировать и исследовать логико-событийные системы, к которым относятся протоколы связи, процессы управления отказами, планирования задач, а также пользовательские интерфейсы. Stateflow используется для создания управляющей логики на основе конечных автоматов, блок-схем, таблиц истинности, диаграмм переходов состояний. Модели, создаваемые на основе пакета Stateflow, называются SF-моделями. В статье авторами рассматривается логическая модель сетевого уровня, созданная на основе SF-модели в виде графических SF-диаграмм [12].

Модель генерации и обслуживания трафика сложной структуры содержит управляющий m-файл, содержащий параметры, сценарий проведения эксперимента и процедуру вызова графической SF-модели, которая хранится в mdl-файле. Общий вид SF-модели представлен на рис. 5. Все исходные коды модели размещены в сети Интернет [12]. Модель состоит из трех диаграмм состояний (Chart): «Источник», «Буфер» и «Канал», каждая из которых подсвечивается при активации.

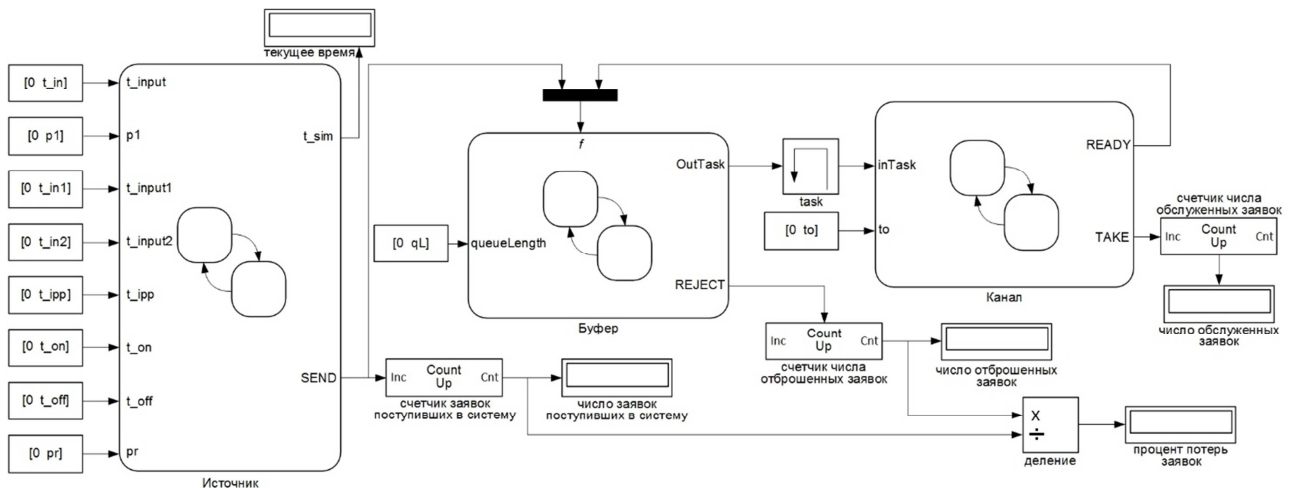


Рис. 5. Модель генерации и обслуживания трафика сложной структуры

Диаграмма «Источник» состоит из трех несвязанных между собой диаграмм состояний, соответствующих источникам экспоненциального, гиперэкспоненциального и прерываемого пуассоновского потоков. Выбор источника генерации трафика сложной структуры происходит на этапе ввода исходных данных с использованием параметра pr ($pr = 1$ определяет выбор экспоненциального потока, $pr = 2$ определяет выбор, $pr = 3$ определяет выбор прерываемого пуассоновского потока). SF-модель источника гиперэкспоненциального потока, представленная на рис. 6, содержит два состояния: «Send1» и «Send2». Попадание в то или иное состояние определяется значением случайной величины p . Если $p \leq p_1$, то «Ис-

точник» переводится в состояние «Send1», а если $p > p_1$, то в состояние «Send2». В состояниях «Send1» и «Send2» происходит генерация значения случайной величины p , распределенной по равномерному закону (функция `ml.rand()`), а также случайного значения момента времени, в который должен произойти выход из состояния. В состоянии «Send1» значение текущего системного времени складывается со значением случайной длительности интервала времени, распределенным по экспоненциальному закону (функция `ml.exprnd(t_input1)`) с математическим ожиданием $t_input1 = 1/\lambda_1$. Аналогичное действие происходит в состоянии «Send2», где генерируется значение случайной величины (функция `ml.exprnd(t_input2)`), распределенной по экспоненциальному закону с математическим ожиданием $t_input2 = 1/\lambda_2$. Выход из состояний «Send1» и «Send2» происходит при выполнении условий переходов `[getSimulationTime() > t1]` и `[getSimulationTime() > t2]`. В момент срабатывания условия перехода происходит выход из состояния и генерация выходного состояния «SEND». В этот момент считается, что пакет трафика сгенерирован и покинул источник. Логика SF-модели источника IPP-потока показана на рис. 7.

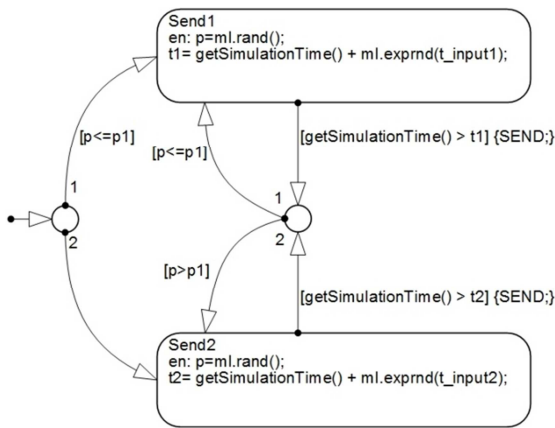


Рис. 6. SF-модель источника гиперэкспоненциального потока

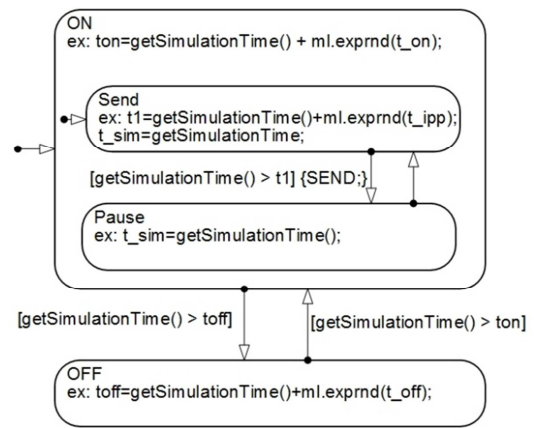


Рис. 7. SF-модель источника прерываемого пуассоновского потока

Входными событиями для диаграммы «Буфер» являются события «SEND» и «READY», которые возникают в момент освобождения «Канала» от очередного пакета. В «Буфере» поступление события «SEND» вызывает событие «ENQUEUE» (пополнение очереди), а событие «READY» вызывает событие «DEQUEUE» (команда на освобождение очереди). Объем «Буфера» определяется величиной параметра `queueLength`. Логика функционирования «Буфера» реализуется с использованием двух диаграмм и четырех функций как показано на рис. 8.

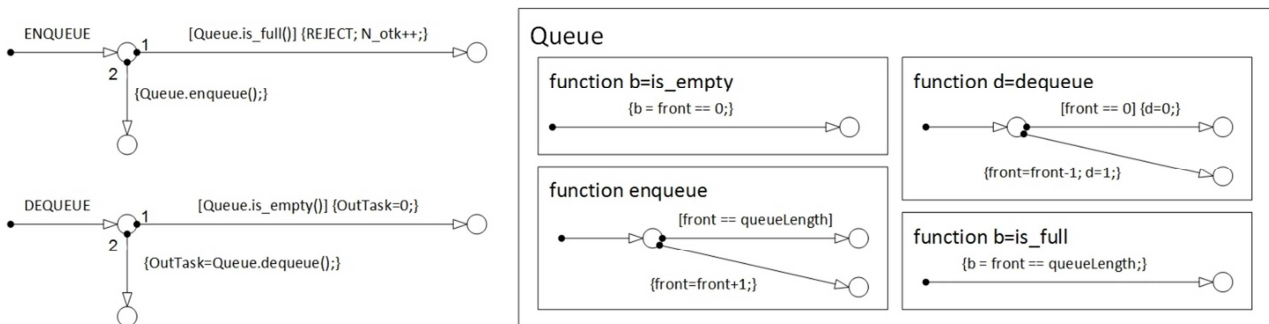


Рис. 8. Реализация диаграммы «Буфер»

Одна диаграмма обрабатывает логику проверки состояния буфера при поступлении пакета (событие «ENQUEUE»), которая заключается в проверке наполненности буфера, добавлении пакета в очередь, если буфер не заполнен, и генерации события «REJECT», свидетельствующего о переполнении буфера и сбросе поступившего пакета. Вторая диаграмма обрабатывает логику освобождения буфера при поступлении сигнала «DEQUEUE», которая заключается в проверке состояния буфера и удалении пакета из очереди, если она не пуста. После удаления пакета из очереди с задержкой в один такт интегрирования в диаграмму «Канал» поступает переменная $OutTask=1$. Переменная $OutTask$ принимает значение «1» только в случае удаления пакета из очереди и перемещения в канал, в остальных случаях на вход диаграммы «Канал» поступает значение «0».

Логика функционирования диаграммы «Канал» показана на рис. 9. Диаграмма имеет два состояния – состояние «Idle» (канал «Свободен») и состояние «Busy» (канал «Занят»). В момент занятия канала генерируется событие «TAKE». Момент времени освобождения канала вычисляется как сумма текущего момента времени, в который пакет поступил в канал и случайной величины задержки обслуживания, генерируемой по экспоненциальному закону с использованием функции $ml.exprnd(to)$. После окончания времени обслуживания пакета канал переходит в состояние «Idle», в котором немедленно генерируется событие «READY».

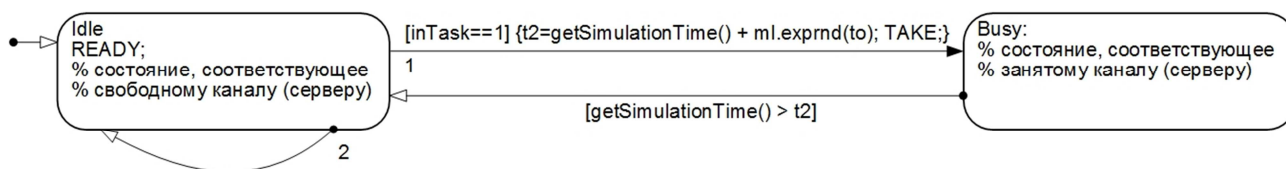


Рис. 9. Реализация диаграммы «Канал»

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ И ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

Экспериментальные исследования аналитических и имитационных моделей системы обслуживания ИРР- и H_2 -потокaх включали сравнение статистических характеристик (математического ожидания, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации, вероятности отказа) взаимосвязанных потоков на аналитической и имитационной моделях. В качестве параметра распределения среднего времени обслуживания выбиралось минимальное значение интенсивности, обеспечивающее ограничение потерь пакетов на уровне 1%. При моделировании использовались следующие допущения:

- минимальное количество пакетов, поступивших в систему $N = 3 \times 10^5$;
- объем речевого пакета $V_p = 200$ бит, средняя длительность передачи $T_p = 20$ мс;
- объем видео пакета $V_g = 300$ бит, средняя длительность передачи $T_g = 10$ мс;
- объем пакета группового источника $V_{gp} = 250$ бит, средняя длительность передачи $T_{gp} = 12,5$ мс;
- емкость буфера $r = 50$ пакетов.

Соотношения для параметров распределения представлены в табл. 1, а результаты моделирования представлены в табл. 2, где использованы следующие обозначения: верхний индекс «ан» означает результаты, полученные с использованием аналитической модели, верхний индекс «им» означает результаты, полученные с использованием имитационной модели.

Анализ данных, представленных в табл. 2, говорит о сходимости результатов аналитического и имитационного моделирования процессов обслуживания ИРР- и H_2 -потокaх, а

также целесообразности использования инструментария имитационного моделирования MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW для решения задач моделирования систем массового обслуживания.

Таблица 2

Результаты моделирования источников трафика сложной структуры

| Тип источника трафика | Параметры IPP-потока, ($c^{-1}, c^{-1}, \text{пак/с}$) | Параметры H_2 -потока, (c^{-1}, c^{-1}) | Интенсивность обслуживания, $\mu_{\text{орт}}$ (c^{-1}) | Статистические характеристики трафика | | | Процент потерь пакетов, (%) |
|-----------------------|---|--|---|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | | | | мат. ожид. | СКО | коэф. вариации | |
| 1 речевой абонент | $\alpha=0.83,$ $\beta=0.56,$ $\lambda_{IPP}=50$ | $\lambda_1=50.84,$ $\lambda_2=0.55,$ $p_1=0.98$ | 66 | $m_{\tau}^{aH}(IPP)=0.053$ | $\sigma_{\tau}^{aH}(IPP)=0.11$ | $c_{\tau}^{aH}(IPP)=2.08$ | $P_{\text{отк}}^{aH}(IPP)=0.99$ |
| | | | | $m_{\tau}^{aH}(H_2)=0.053$ | $\sigma_{\tau}^{aH}(H_2)=0.11$ | $c_{\tau}^{aH}(H_2)=2.08$ | $P_{\text{отк}}^{aH}(H_2)=0.99$ |
| | | | | $m_{\tau}^{\mu M}(IPP)=0.051$ | $\sigma_{\tau}^{\mu M}(IPP)=0.12$ | $c_{\tau}^{\mu M}(IPP)=2.35$ | $P_{\text{отк}}^{\mu M}(IPP)=1.21$ |
| | | | | $m_{\tau}^{\mu M}(H_2)=0.052$ | $\sigma_{\tau}^{\mu M}(H_2)=0.115$ | $c_{\tau}^{\mu M}(H_2)=2.21$ | $P_{\text{отк}}^{\mu M}(H_2)=1.18$ |
| 1 видео абонент | $\alpha=2,$ $\beta=0.66,$ $\lambda_{IPP}=100$ | $\lambda_1=102.01,$ $\lambda_2=0.65,$ $p_1=0.98$ | 89.5 | $m_{\tau}^{aH}(IPP)=0.041$ | $\sigma_{\tau}^{aH}(IPP)=0.93$ | $c_{\tau}^{aH}(IPP)=22.7$ | $P_{\text{отк}}^{aH}(IPP)=0.99$ |
| | | | | $m_{\tau}^{aH}(H_2)=0.041$ | $\sigma_{\tau}^{aH}(H_2)=0.93$ | $c_{\tau}^{aH}(H_2)=22.7$ | $P_{\text{отк}}^{aH}(H_2)=1.03$ |
| | | | | $m_{\tau}^{\mu M}(IPP)=0.043$ | $\sigma_{\tau}^{\mu M}(IPP)=0.94$ | $c_{\tau}^{\mu M}(IPP)=21.9$ | $P_{\text{отк}}^{\mu M}(IPP)=0.91$ |
| | | | | $m_{\tau}^{\mu M}(H_2)=0.042$ | $\sigma_{\tau}^{\mu M}(H_2)=0.92$ | $c_{\tau}^{\mu M}(H_2)=21.9$ | $P_{\text{отк}}^{\mu M}(H_2)=0.95$ |
| 1 групповой источник | $\alpha=1.5,$ $\beta=0.36,$ $\lambda_{IPP}=80$ | $\lambda_1=81.51,$ $\lambda_2=0.54,$ $p_1=0.98$ | 78.5 | $m_{\tau}^{aH}(IPP)=0.046$ | $\sigma_{\tau}^{aH}(IPP)=0.96$ | $c_{\tau}^{aH}(IPP)=20.9$ | $P_{\text{отк}}^{aH}(IPP)=0.99$ |
| | | | | $m_{\tau}^{aH}(H_2)=0.046$ | $\sigma_{\tau}^{aH}(H_2)=0.96$ | $c_{\tau}^{aH}(H_2)=20.9$ | $P_{\text{отк}}^{aH}(H_2)=0.99$ |
| | | | | $m_{\tau}^{\mu M}(IPP)=0.042$ | $\sigma_{\tau}^{\mu M}(IPP)=0.98$ | $c_{\tau}^{\mu M}(IPP)=23.3$ | $P_{\text{отк}}^{\mu M}(IPP)=0.91$ |
| | | | | $m_{\tau}^{\mu M}(H_2)=0.043$ | $\sigma_{\tau}^{\mu M}(H_2)=0.97$ | $c_{\tau}^{\mu M}(H_2)=22.6$ | $P_{\text{отк}}^{\mu M}(H_2)=0.93$ |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты аналитического и имитационного моделирования системы обслуживания трафика сложной структуры, описываемого взаимосвязанными моделями IPP- и H_2 -потока. Имитационное моделирование было проведено с использованием программного комплекса логико-событийного моделирования Stateflow и показало сходимость результатов на уровне 1–2%. Высокая достоверность полученных результатов позволяет судить о применимости Stateflow для имитационного моделирования более сложных случаев, в том числе, с использованием комплексно-сопряженных параметров.

Список используемых источников

1. *Akimaru H., Kawashima K.* Teletraffic: theory and applications // Springer Science & Business Media. – 2012. – P. 137–140.
2. *Шелухин О.И.* Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 576 с.
3. *Клейнрок Л.* Вычислительные системы с очередями: пер. с англ. / под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
4. *Алиев Т.И.* Основы моделирования дискретных систем: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
5. *Anjum B.* MMPP-2 approximation of aggregate IPPs with application to expedited forwarding class in ipbased networks // Communication Technology, 13th IEEE International Conference on Communication Technologies (ICCT), 2011. – P. 494–498.
6. *Новиков Е.А.* Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 2(69). – С. 79–86.
7. *Новиков Е.А.* Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 3 (15). – С. 62–69.
8. *Rajabi A., Wong J. W.* MMPP characterization of web application traffic // Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS). – 2012. – P. 107–114.
9. *Смагин В.А.* Немарковские задачи теории надежности: учебник. – Министерство обороны СССР, 1982. – 269 с.
10. *Ушанев К.В.* Имитационные модели системы массового обслуживания типа Ра/М/1, Н2/М/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 4. – С. 217–251.
11. *Сирота А.А.* Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. – М.: Техносфера, 2006. – 280 с.
12. Исходные коды имитационной модели системы обслуживания трафика со сложной структурой. – URL: <https://yadi.sk/d/5i7wx50saKWbow> (дата обращения: 03.07.2020).

Ю.В. Козлов,
кандидат военных наук;
М.А. Кукушкин,
кандидат военных наук;
О.Ю. Михеев,
кандидат военных наук, доцент

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫМИ ГРУППИРОВКАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

По результатам анализа возможных вариантов деструктивного воздействия на средства и тракты информационного обмена в контуре управления орбитальными группировками космических аппаратов предложен подход, позволяющий оценить качество информационного обмена при своевременном обнаружении воздействия. Обоснован математический аппарат, базирующийся на полумарковских процессах, описывающий различные состояния информационного обмена при различных вариантах воздействия. Приведены рассчитанные зависимости устойчивости информационного обмена от своевременности обнаружения воздействия.

Ключевые слова: наземный комплекс управления орбитальными группировками космических аппаратов, устойчивость информационного обмена, полумарковские процессы.

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость функционирования военно-технических систем определяется как свойство выполнять целевые задачи с заданным качеством в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Одной из таких систем является система управления орбитальными группировками космических аппаратов (ОГ КА), рассматриваемая при анализе вопросов устойчивости, как правило, в виде контура управления ОГ КА [1].

В контуре управления каждой ОГ КА основное место занимает наземный комплекс управления космическими аппаратами (НКУ КА), включающий в себя технические средства и сооружения, предназначенные для управления функционированием КА с момента их выведения на орбиту, между которыми должен осуществляться своевременный и полный информационный обмен [2]. Разнообразие и сила возможных деструктивных воздействий в настоящее время не позволяют рассчитывать на своевременное парирование данных угроз, которые способны значительно снизить качество информационного обмена в контуре управления КА. Варианты возможного воздействия [3] можно представить как:

– преднамеренное силовое воздействие различной физической природы на элементы НКУ КА, а также линии связи, соединяющие их;

– преднамеренное силовое электромагнитное воздействие: по сети электропитания – на порты электропитания постоянного и переменного тока; по проводным линиям связи – на порты ввода-вывода сигналов и порты связи; по металлоконструкциям – на порты заземления и порты корпуса, порты ввода-вывода сигналов и порты связи;

– использование программных или программно-аппаратных средств при осуществлении компьютерной атаки (сетевой атаки);

– воздействие программными средствами в комплексе с преднамеренным силовым и/или не силовым электромагнитным воздействием.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Формализация подхода к разработке математического аппарата, описывающего устойчивость системы, осуществляется следующим образом.

Исходные условия:

- через заданные промежутки времени в контуре НКУ КА идет обмен информацией для подготовки и проведения сеанса управления с КА;
- если в момент передачи информации произошло воздействие на систему, то передача информации прекращается, немедленно происходит перевод на резервные комплекты (линии связи) и проводятся восстановительные работы, после чего, передача информации продолжается;
- если длительность нахождения системы в работоспособном состоянии больше времени передачи информации, то считается, что задача выполнена и система устойчива;
- если, в результате деструктивного воздействия на систему, не хватило времени для передачи информации в контуре НКУ КА, то считается, что основная задача не выполнена и система неустойчива.

Требуется: рассчитать вероятность своевременной передачи информации между объектами НКУ за заданное время t .

Следовательно, для планирования и осуществления резервирования и других мероприятий требуется усовершенствование средств оценивания качества информационного обмена с учетом изменяющихся условий обстановки. Для оценивания последствий такого рода воздействий на функционирование всей системы управления КА необходимо разработать соответствующий математический аппарат, позволяющий в динамике оценивать качество информационного обмена в контуре управления КА, а именно – вероятность своевременной передачи информации между объектами НКУ за заданное время t . Для этого целесообразно использовать математический аппарат, базирующийся на полумарковских процессах (ПМП) [4, 5], позволяющий задавать функции распределения времени при переходе системы из одного состояния в другое, что особенно актуально при моделировании контура управления ОГ КА (рис. 1).

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПМП-МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫМИ ГРУППИРОВКАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

При построении моделей ПМП можно использовать для описания распределений случайного времени наступления событий – прохождения информации в контуре НКУ КА, воздействия на информационный обмен, различные функции распределения – экспоненциальное, вырожденное, эрланговское, гамма-распределение, нормальное, равномерное и т. д. Это в значительной степени повышает адекватность разрабатываемой с помощью математического аппарата ПМП модели реальному процессу.

При построении математического аппарата, описывающего устойчивость информационного обмена в контуре НКУ КА (далее – системы), необходимо учитывать следующие допущения:

- для характеристики устойчивости системы используем вероятность передачи информации между объектами НКУ КА за заданный промежуток времени;
- воздействия на систему могут носить как случайный характер, так и преднамеренный;
- воздействия на систему могут осуществляться как в период прохождения информации в контуре НКУ КА, так и при отсутствии информационного обмена;

– если на интервале времени, когда происходило воздействие на систему, проводились мероприятия по ее восстановлению, а информационный обмен не осуществлялся, то систему будем считать устойчивой.

Таким образом, ПМП, описывающий процесс обнаружения и восстановления работоспособности системы, будет иметь четыре состояния:

e_1 – в системе не происходит передача информации;

e_2 – в системе происходит передача информации;

e_3 – происходит воздействие на систему при передаче информации;

e_4 – информация в системе за заданное время t передана (работоспособность системы восстановлена за допустимое время), что позволило провести подготовку и проведение операций управления КА в полном объеме (задача выполнена).

Обозначим:

$G_{\beta}(t)$ – функцию распределения времени (ФРВ) между передачами информации в системе (информация не передается) – t_{β} ;

$G_h(t)$ – ФРВ передачи информации в системе (информация передается) – t_h ;

$G_v(t)$ – ФРВ работоспособного состояния системы – t_v ;

$G_{\mu}(t)$ – ФРВ неработоспособного состояния системы (идет воздействие на систему или последствия воздействия не устранены) – t_{μ} ;

$G_g(t)$ – ФРВ состоявшегося обмена информацией в системе за заданный интервал времени – t_g ;

ρ – вероятность обнаружения воздействия на систему (визуального в случае маскировки мест воздействия, и программно-аппаратными средствами на фоне сбоя в работе средств автоматизации и помех при работе программ).

Именно коэффициент ρ , введенный авторами, предлагается использовать для оценки влияния организации процесса на вероятность своевременной передачи информации. Схематично динамика состояний ПМП, описывающего процесс функционирования системы в условиях воздействия и ее восстановления, показана на рис. 1.

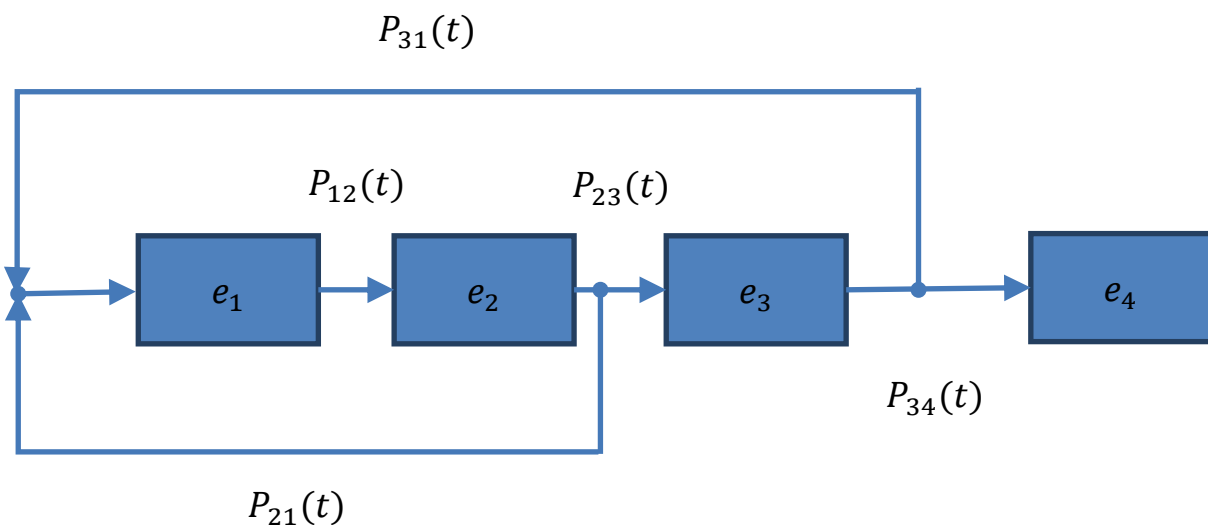


Рис. 1. Схема динамики состояний ПМП, описывающая процесс обмена информацией в системе

В состоянии e_1 ПМП пробудет случайное время t_β , после чего, с вероятностью $q_{12} = 1$, перейдет в состояние e_2 .

Среднее время пребывания ПМП процесса в состоянии e_1 определяется из формулы

$$\zeta_1 = \int_0^{\infty} [1 - G_\beta(t)] dt. \quad (1)$$

Вероятность перехода из состояния e_1 в состояние e_2 зависит от необходимости обмена информацией между элементами НКУ, и определяется из формулы

$$P_{12}(t) = q_{12}G_\beta(t). \quad (2)$$

В состоянии e_2 ПМП будет находится случайное время:

$$t_2 = \min(t_h, t_v), \quad (3)$$

имеющее функцию распределения

$$F_2(t) = 1 - [1 - G_h(t)][1 - G_v(t)], \quad (4)$$

до тех пор, пока не закончится передача информации в системе или не начнет происходить воздействие на систему.

Среднее время пребывания в состоянии e_2

$$\zeta_2 = \int_0^{\infty} [1 - G_2(t)][1 - G_v(t)] dt. \quad (5)$$

Из состояния e_2 ПМП перейдет в состояние e_3 , если $t_v < t_h$, т. е. время наступления начала воздействия на систему будет меньше времени окончания передачи информации, с учетом вероятности обнаружения воздействия ρ . Вероятность определения этого события определяется из выражения

$$P_{23}(t) = \rho \int_0^t [1 - G_h(u)] dG_v(u). \quad (6)$$

Если $t_h < t_v$, или воздействия не обнаружены (не повлияли на передачу информации) ρ , то ПМП перейдет в состояние e_1 . Вероятность этого события определяется из выражения

$$P_{21}(t) = \int_0^t [1 - G_v(u)] dG_h(u) + (1 - \rho) \int_0^t [1 - G_h(u)] dG_v(u). \quad (7)$$

В состоянии e_3 ПМП будет находиться случайное время:

$$t_3 = \min(t_\mu, t_g), \quad (8)$$

распределенное по закону

$$F_3(t) = 1 - [1 - G_\mu(t)][1 - G_g(t)]. \quad (9)$$

Среднее время нахождения ПМП в состоянии e_3 зависит от варианта воздействия на систему и времени ее восстановления, и определяется выражением

$$\zeta_3 = \int_0^{\infty} [1 - G_\mu(u)][1 - G_g(v)] dt. \quad (10)$$

Если время исправной работы системы будет меньше необходимого для передачи информации: $t_g > t_v$, то данная задача не будет выполнена, и ПМП перейдет в состояние e_1 . Вероятность этого события

$$P_{31}(t) = \int_0^t [1 - G_g(u)] dG_\mu(u). \quad (11)$$

Вероятность передачи информации в системе, т. е. выполнения задачи, в течении времени t и перехода ПМП в состояние e_4 определяется выражением

$$P_{34}(t) = \int_0^t [1 - G_\mu(u)] dG_g(u). \quad (12)$$

Система интегральных уравнений ПМП для данной задачи будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Psi_1(t) &= \int_0^t \Psi_2(t-u) dP_{12}(u); \\ \Psi_2(t) &= \int_0^t \Psi_3(t-u) dP_{23}(u) + \int_0^t \Psi_1(t-u) dP_{21}(u); \\ \Psi_3(t) &= \int_0^t \Psi_1(t-u) dP_{31}(u) + P_{34}(u). \end{aligned} \quad (13)$$

Решение системы интегральных уравнений (13) относительно $\Psi_1(t)$, позволит определить вероятность своевременного восстановления работы системы за время t . Система линейных уравнений ПМП для данной задачи будет решена следующим образом:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \zeta_1 + P_{12} \tau_2; \\ \tau_2 &= \zeta_2 + P_{23} \tau_3 + P_{21} \tau_1; \\ \tau_3 &= \zeta_3 + P_{31} \tau_1.\end{aligned}\quad (14)$$

Решение системы уравнений (14) относительно τ_1 позволит определить среднее время до выполнения задачи по передаче информации между объектами НКУ, включая периоды неработоспособного состояния системы (воздействия и восстановления):

$$\tau_1 = \frac{\zeta_1 + \zeta_2 P_{12} + \zeta_3 P_{12} P_{23}}{1 - P_{12} P_{21} - P_{12} P_{23} P_{31}}. \quad (15)$$

Положим, что:

$$\begin{aligned}G_\beta(t) &= 1 - e^{-\beta t}; & G_v(t) &= 1 - e^{-vt}; \\ G_h(t) &= 1 - e^{-ht}; & G_\mu(t) &= 1 - e^{-\mu t}; \\ G_g(t) &= 1 - e^{-gt}.\end{aligned}\quad (16)$$

Тогда по формулам (1), (5), (10) получим:

$$\zeta_1 = \frac{1}{\beta}, \quad \zeta_2 = \frac{1}{h+v}, \quad \zeta_3 = \frac{1}{\mu+g}. \quad (17)$$

А по формулам (2), (7), (6), (11) при $t \rightarrow \infty$, получим:

$$P_{12} = 1, \quad P_{21} = \frac{h + (1-\rho)v}{v+h}, \quad P_{23} = \frac{\rho v}{h+v}, \quad P_{31} = \frac{\mu}{\mu+g}. \quad (18)$$

Подставляя значения $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ из (17) и $P_{12}, P_{21}, P_{23}, P_{31}$ из (18) в (15), получим формулу для расчета среднего времени до выполнения задачи по передаче информации между объектами НКУ, включая периоды неработоспособного состояния системы (воздействия и восстановления):

$$\begin{aligned}\tau_1(\text{вз}) &= \frac{\mu h + v g + h g + \beta \mu + \beta g + \beta v + \rho \mu v}{\rho \beta v g} = \\ &= \frac{(\mu + g)(h + v) + \beta(\mu + g + \rho v)}{\rho \beta v g}.\end{aligned}\quad (19)$$

Приближенная формула для расчета вероятности передачи информации между объектами НКУ после деструктивного воздействия, включая периоды неработоспособного состояния системы (воздействия и восстановления), за время t будет следующей:

$$\Psi_1^{\text{вз}}(t) = 1 - e^{-\frac{\rho \beta v g t}{(\mu+g)(h+v)+\beta(\mu+g+\rho v)}}, \quad (20)$$

- где β – частота передачи информации в системе;
 h – длительность передачи информации в системе, $h = \frac{1}{\tau_h}, \tau_h$;
 ν – частота деструктивных воздействия на систему;
 μ – длительность деструктивного воздействия на систему (с учетом восстановления),
 $\mu = \frac{1}{\tau_\mu}, \tau_\mu$;
 g – необходимое время для передачи информации в системе, $g = \frac{1}{\tau_g}, \tau_g$;
 ρ – вероятность обнаружения воздействия на систему.

ПРИМЕР ОЦЕНИВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫМИ ГРУППИРОВКАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

С помощью представленного математического аппарата можно рассчитать зависимости вероятности передачи информации между объектами НКУ в случае деструктивных воздействий на систему. Данные зависимости представлены на рис. 2.

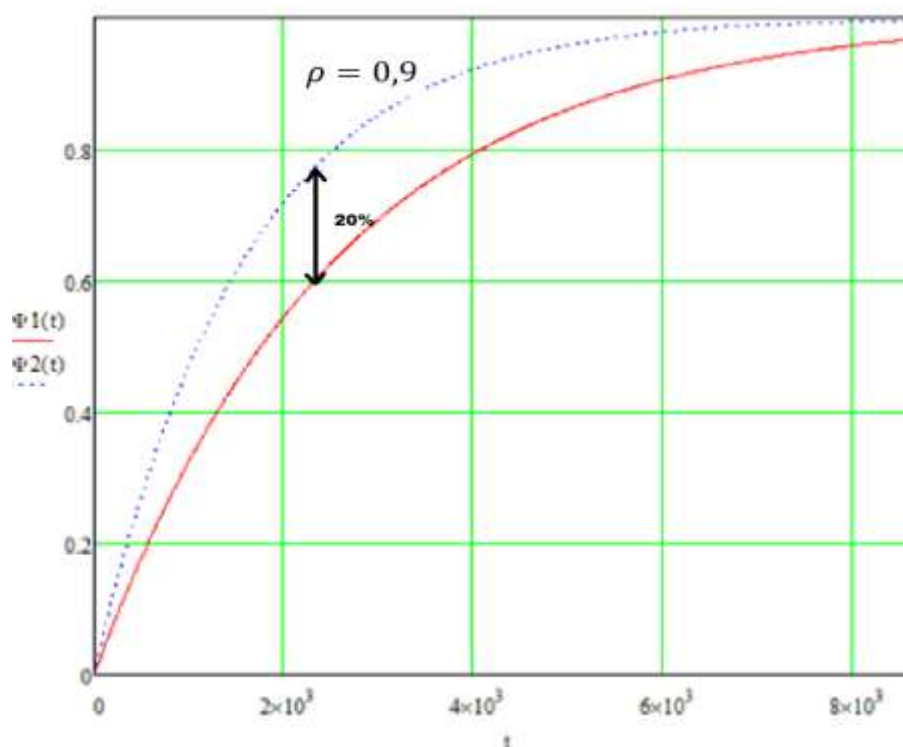


Рис. 2. Зависимости вероятности передачи информации от времени обнаружения деструктивных воздействий

Исходя из проведенных расчетов, можно сделать вывод, что вероятность своевременной передачи информации между объектами НКУ в случае деструктивных воздействий значительно зависит (на 20–30%) от вероятности обнаружения и быстрого восстановления работоспособности при одинаковых факторах:

- частота передачи информации в системе;
- длительность передачи информации в системе;

- частота деструктивных воздействий на систему;
- длительность деструктивного воздействия на систему (с учетом восстановления);
- необходимое время для передачи информации в системе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный авторами математический аппарат позволяет адекватно оценить устойчивость информационного обмена в контуре управления орбитальными группировками космических аппаратов в условиях деструктивных воздействий. Полученные результаты дают возможность рассчитать влияние каждого из рассмотренных факторов на вероятность своевременной передачи информации между объектами НКУ, что в свою очередь позволяет оценить общую устойчивость функционирования всей системы и обосновать варианты контроля состояния информационного обмена.

Список используемых источников

1. *Молотов Е.П.* Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 256 с.
2. *Кукушкин М.А., Пономарев Д.Ю.* Аналитическое представление функционирования космических систем и комплексов // Вестник АВН. – 2017. – 2 (59). – С. 107–111.
3. *Гончаров А.М., Галанкин А.В., Чащин С.В.* Применение теории информационных сетей для описания структуры Главного испытательного космического центра // Сб. трудов Всероссийской научно-техн. конф. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – С. 12–17.
4. *Матвеев В.Ф., Ушаков В.Г.* Системы массового обслуживания. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 242 с.
5. *Королюк В.С., Турбинпол А.Ф.* Полумарковские процессы и их приложения. – Киев: Наукова думка, 1976. – 184 с.

Д.С. Махов,

кандидат техн. наук

Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко;

О.А. Финько,

доктор техн. наук, профессор

Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко,

Российская академия ракетных и артиллерийских наук

СПОСОБ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАДИОКАНАЛАХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрен способ помехоустойчивого 2D-кодирования радиотехнических систем передачи информации по параллельным каналам с различной пропускной способностью, которая обусловлена неравномерным характером образования этих каналов в пространстве (расстояния, характеристики диаграмм направленности многолучевой антенны) и другими факторами (помехами). Под параллельными радиоканалами понимаются радиоканалы, образованные парциальными лучами характеристики направленности многолучевой антенной решетки. Радиоканал допускается стационарным на период передачи одного сообщения или одного кодового слова. Таким образом каждый обусловленный период времени параметры корректирующего кода строятся заново, исходя из текущих параметров параллельного канала связи. Приведены результаты численных исследований сравнения корректирующих способностей предлагаемого кода с известными. Это частный случай общего авторского подхода к построению многомерных корректирующих ошибки кодов для параллельных каналов, неравномерность пропускной способности которых обусловлена и такими параметрами как база или объем сигнала.

Ключевые слова: многолучевая антенная решетка, многомерные помехоустойчивые коды, параллельный радиоканал, многоостаточные коды, модулярная арифметика, пространственно-временной помехоустойчивый код, радиосвязь с беспилотными летательными аппаратами, система остаточных классов.

ВВЕДЕНИЕ

Роботизация и интеллектуализация современных телекоммуникационных систем мотивирует разработчиков совершенствовать существующие и разрабатывать новые теоретические подходы и практические решения по повышению качества и обеспечению непрерывности связи в системах связи различного назначения. Одним из подходов является передача дискретных сообщений по параллельным каналам, реализованная на базе стандартов 4G и 5G [1].

Особенно актуален такой подход в системах связи и управления робототехническими средствами (РТС), выполняющими задачи в условиях урбанизированной местности. Особенностью данных условий являются замирания в канале связи и межсимвольная интерференция, приводящие к ухудшению или пропаданию связи с роботизированной платформой. В стандарте 4G параметры сигналов каждой из антенн с широкой характеристикой направленности (ХН) рассматриваются независимо от остальных антенн системы. В перспективном стандарте 5G совокупность ненаправленных антенн на передаче будет рассматриваться во взаимосвязи в виде многолучевой антенной решетки (МАР), что позволит повысить мощность сигнала на приемной стороне системы связи [2]. Конструктивные решения по синтезу МАР на сегодняшний день позволяют реализовывать их на малогабаритных подвижных объектах (МПО), в том числе и воздушного базирования.

Требования к помехоустойчивости и особенности передачи информации по параллельным каналам задолго до появления вышеописанных стандартов были рассмотрены в работе [3]. Однако в указанной работе, несмотря на подробное описание процессов передачи дискретных сообщений по параллельным каналам, основное внимание уделено вопросам разносигнального приема при передаче *одинаковых* сообщений равной длительности. В свою очередь,

вопросы распределения мощности между параллельными каналами *различного качества* недостаточно освещены.

Возвращаясь к стандартам на основе технологии «multi-in multi-out» (MIMO), следует отметить, что пространственно-временное кодирование в данной технологии основывается на схемах и методах перераспределения сигнальных конструкций ортогональных сигналов между каналами, но не затрагивает методов помехоустойчивого кодирования. Это создает предпосылки для построения новых сигнально-кодовых конструкций и новых методов кодирования для повышения помехоустойчивости информации, передаваемой в параллельных радиоканалах.

Цель статьи заключается в разработке способа пространственно-временного помехоустойчивого кодирования информации в параллельных радиоканалах радиотехнических систем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОДА

Для построения пространственно-временного помехоустойчивого кода необходимо представить геометрию задачи и определить терминологию. Рассмотрим МПО в виде радиотехнической системы (РТС), например беспилотный летательный аппарат, который выполняет задачу по сбору и передаче информации одновременно в несколько пунктов приема (в общем случае – случайную выборку), расположенные на различных расстояниях от передающего устройства. Требования к достоверности и своевременности передаваемой информации выражаются уменьшением вероятности ошибки $\rho_{||}$ и времени передачи информационных сообщений t . Учитывая то, что параллельные радиоканалы образуются с помощью парциальных лучей ХН МАР [4], но при этом имеют различные параметры, уместно дать определение парциального радиоканала. Геометрия задачи поясняется с помощью рис. 1.

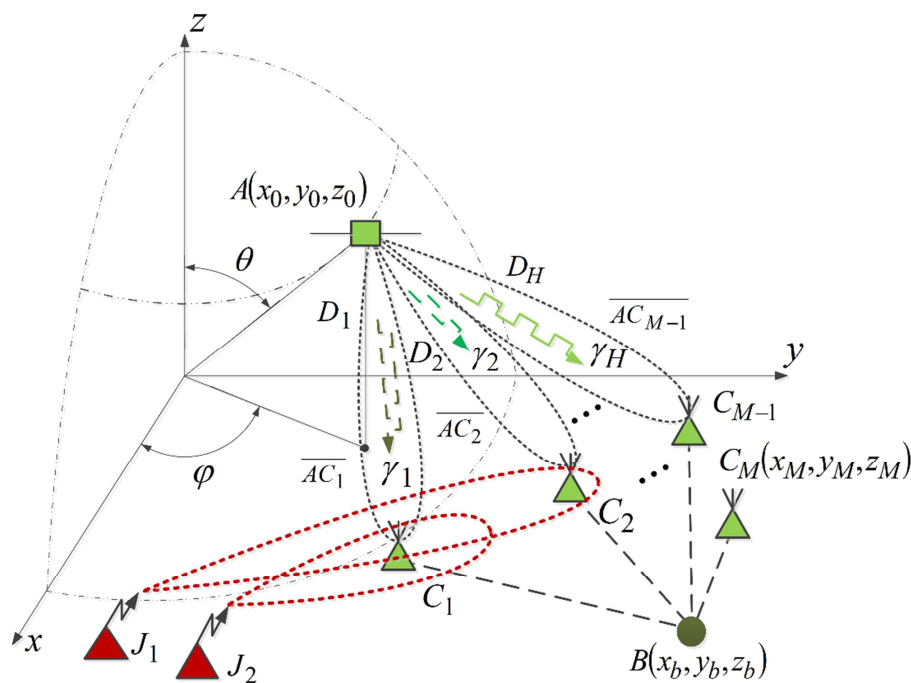


Рис. 1. Пространственное расположение РТС, ПОИ и промежуточных пунктов приема информации

Под **парциальным радиоканалом** будем понимать совокупность кодека, модема, приемопередатчика, элементов диаграммообразующей схемы (ДОС) передающей МАР и приемной антенны, а также **пространственно ориентированной** радиолинии, формируемой отдель-

ным лучом ХН МАР, предназначенной для передачи и приема информации. Пусть МПО, расположенному в точке A с координатами x_0, y_0, z_0 , необходимо передать информацию объемом V_0 в пункт обработки информации (ПОИ), расположенный в точке $B(x_b, y_b, z_b)$. Пусть также имеется M наземных промежуточных пунктов приема информации (ПП) в точках $C_m(x_m, y_m, z_m)$.

Расстояние между РТС и ПОИ может быть определено по известной формуле [5]:

$$R_0 = \sqrt{(x_0 - x_b)^2 + (y_0 - y_b)^2 + (z_0 - z_b)^2}. \quad (1)$$

Дальности R_m определяются по формуле (1) путем замены соответствующих индексов при координатах точек C_m . Причем $R_m \neq R_{M-m}$. Пусть на МПО установлена МАР, параметры которой позволяют формировать количество M лучей ХН, равное количеству ПП [4]. Рассмотрим случай, когда отношение «сигнал/(помеха+шум)» (ОСПШ) в радиоканале \overline{AB} дальностью R_0 много меньше единицы: $Q_0 \ll 1$. Такой случай может иметь место при воздействии преднамеренных помех на радиоканал \overline{AB} , либо при отсутствии между точками A и B прямой видимости (наличии препятствия). Важной отличительной особенностью задачи является то, что модель, описывающая формируемые парциальные радиоканалы, включает не только ошибки, вызванные влиянием естественных и преднамеренных помех, но и ошибки, возникающие вследствие пространственной девиации лучей ХН МАР, вызванной высокой скоростью и маневренностью МПО.

Учитывая то, что качества парциальных радиоканалов $D_m, m = \overline{1, M}$ различны, возникает ряд оптимизационных задач управления параметрами РТС МПО с целью удовлетворения предъявляемых требований. В таком случае формализация задачи может быть представлена в виде двух требований. Первое требование заключается в минимизации вероятности ошибки в парциальных каналах:

$$P_{\text{парциальных каналов}} = 0.5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\sum_{m=1}^M c_m^2} \right) \right] \rightarrow \min. \quad (2)$$

Здесь $P_{\text{парциальных каналов}}$ – вероятность ошибки в совокупности M парциальных каналов;

$\Phi(x)$ – функция Крампа, $\Phi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi_0}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$;

c_m^2 – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума с учетом коэффициента передачи:

$$c_m^2 = \frac{\chi_m^2 P_m T}{v_m^2},$$

где χ_m^2 – коэффициент передачи канала;

v_m^2 – спектральная плотность мощности шума;

P_m – доля мощности передатчика в каждом канале;

m – количество каналов;

T – длительность информационного символа сообщения.

Вторым требованием в задаче является минимизация времени передачи сообщения t по парциальным каналам:

$$t \rightarrow \min. \quad (3)$$

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ И ОГРАНИЧЕНИЯ НА ЕЕ РЕШЕНИЕ

Примем ограничения: распределительная задача энергетических ресурсов между параллельными каналами не решается и мощность передатчика, а также коэффициенты усиления и направленного действия МАР, распределены между параллельными каналами равномерно. Модель радиоканала учитывает ошибки, вызванные естественными помехами, преднамеренными помехами противника J_e , а также ошибки, возникающие вследствие пространственной нестабильности лучей ХН МАР, вызванных, в том числе, геометрической девиацией летательного аппарата. Тогда выполнение требований (2) и (3) может быть обеспечено путем разработки новых корректирующих кодов на основе исследований выдающихся отечественных ученых в области кодирования [5].

Рассмотрим подробно c_m^2 в выражении (2). Если принять коэффициент передачи канала равным единице, то перемножая P_m на T , получим отношение энергии символа к спектральной плотности мощности шума в одном канале [6, 7]:

$$\frac{E_s}{v^2} = \frac{E_b}{v^2} \left(\frac{k}{n} \right), \quad (4)$$

где E_b – энергия бита;

k – число информационных бит;

n – общее число бит.

С учетом парциальных радиоканалов задача преобразуется к отысканию оптимального коэффициента избыточности помехоустойчивого кода для исправления одиночных и групповых ошибок.

Для решения задачи и исключения неправильного понимания результата необходимо ввести понятие размерности и разрядности. Размерность моноалфавитного кода понимается как количество различных букв вторичного алфавита в одном разряде. Размерность полиалфавитного кода может иметь различное значение для различных алфавитов и зависеть от модуляции, что определяет скорость передачи информации. Так двоичная размерность моноалфавитного кода подразумевает то, что в одном разряде имеется либо «1», либо «0». Разрядность для двоичного кода определяется количеством знакомест моноалфавитного двоичного кода двоичной размерности, т. е. количеством бит. Разрядность полиалфавитного кода может определяться количеством символов передаваемого сообщения.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ

Известно, что циклические коды обладают хорошими корректирующими способностями. В связи с этим для повышения достоверности при наличии нескольких каналов передачи возможны несколько вариантов передачи. Первый способ заключается в параллельной передаче одинаковых сообщений в несколько ПП (дублирование). Однако, при таком способе удовлетворение критерия (2) не приводит к удовлетворению критерия (3). Второй способ заключается в разбиении сообщения на более короткие фрагменты и применении к ним помехоустойчивого кодирования. Такой принцип заложен в OFDM – передаче сигналов при модуляции с ортогональным разделением поднесущих частот. Однако недостатки второго способа те же, что при OFDM [8]. Возникает вопрос: как уменьшить время передачи при

уменьшении вероятности ошибки в пространственных параллельных радиоканалах? Ответ на данный вопрос может быть найден при помощи использования, в настоящее время не получивших распространения в области передачи информации, методов полиалфавитного кодирования (рис. 2). Его реализуют многоостаточные (многомодулярные) коды, больше известные как «система остаточных классов» (кавычки обусловлены первоначальным некорректным переводом термина Residual Number System (RNS), так как понятия «остаточные классы» не существует, а есть понятие «классы вычетов» [9–11]).

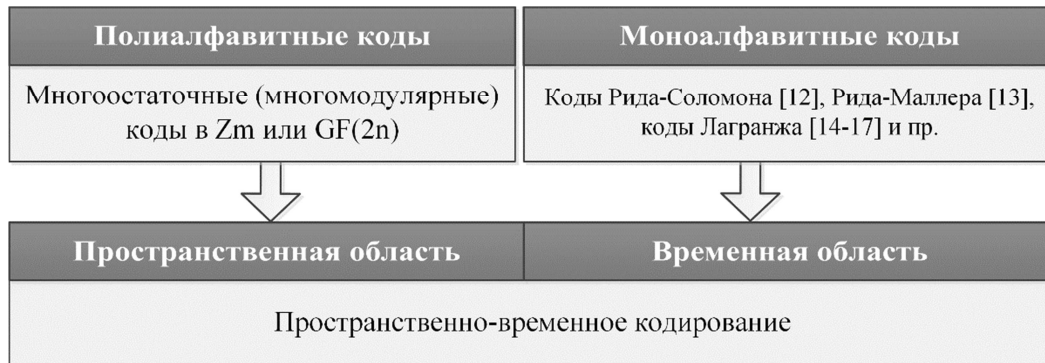


Рис. 2. Принцип синтеза двумерного пространственно-временного кода

Предложим подход, основанный на том, что при разделении объема данных на части для передачи их по параллельным парциальным каналам будет учитываться качество каждого канала, а фрагменты данных будут объявлены остатками (в общем случае не важно в какой алгебре – целочисленном кольце главных идеалов или расширенном поле Галуа).

В данной работе исходное сообщение представляет из себя набор символов, закодированных двоичным алфавитом. Каждый фрагмент содержит в себе несколько символов, содержащих различное количество двоичных букв.

Затем на основе множества доступных ПП получают множество парциальных каналов \overline{AC}_m . Из данного множества выбирают один или несколько парциальных каналов наилучшего качества по мере убывания, называя их контрольными каналами $h = \overline{1, H}$. На основе множества \overline{AC}_m формируют D_m лучей MAP для передачи фрагментов от разбиения информационного кадра S .

Параметр c_m^2 – ОСПШ, определяет количество разрядов I_g (разрядность двоичная) g -го фрагмента кадра γ_g , $g = \overline{1, G}$, $G = M - H$.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОДИРОВАНИЯ

Кадр \hat{A} разбивают на G фрагментов с длинами I_g . Длительности фрагментов получают различными для каждого парциального канала и обозначаются t_g при условии, что $t_g \neq t_{\tilde{g}}$. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является то, что фрагменты от разбиения объявляют рабочими остатками от деления \hat{A} по модулям, значения которых не определены. Данные остатки γ_g предназначены для передачи по D_g пространственным парциальным каналам (рис. 3).

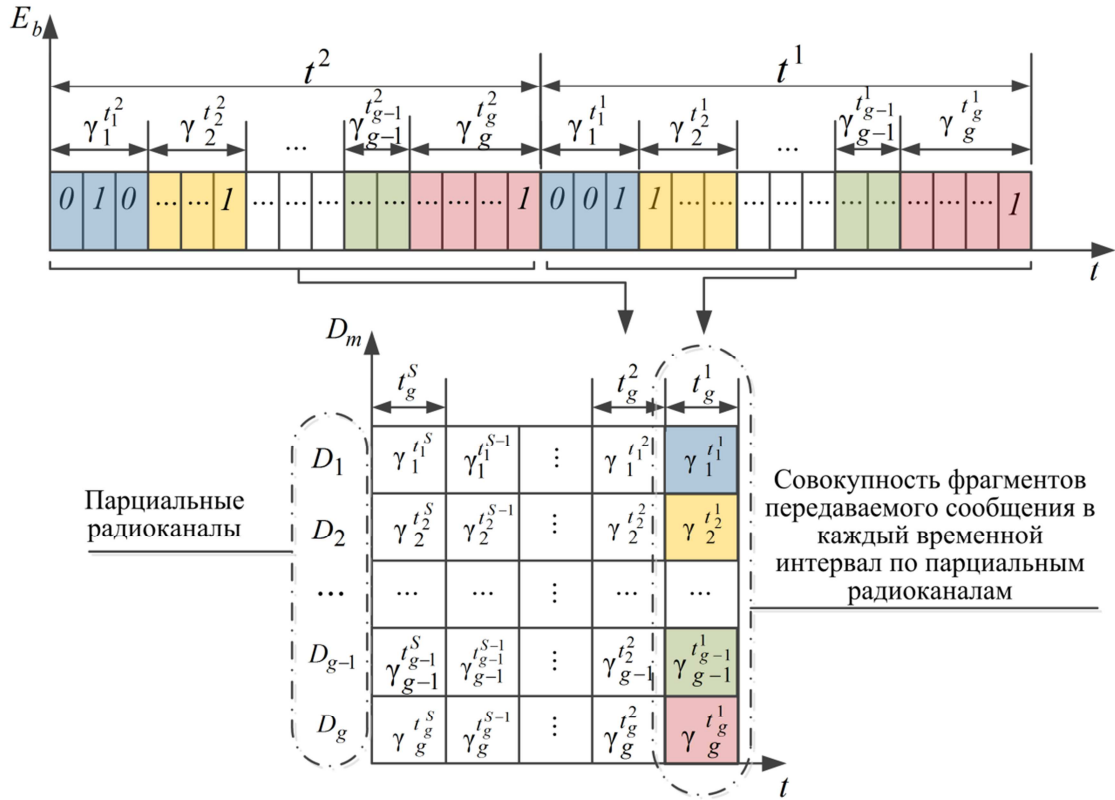


Рис. 3. Пространственное кодирование (принцип разбиения исходного сообщения на фрагменты)

Пространственный вектор каналов размерности $1 \times M$ с учетом рабочих остатков можно представить в виде

$$\gamma = \{\gamma_m\} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_g, 0, 0, \dots, 0]^T, \quad (5)$$

где γ_g – рабочий остаток от деления кадра.

Нулями обозначены позиции пока не определенных контрольных остатков. Пространственно-временная матрица для передачи нескольких сообщений, исходная длительность которых равна t , будет иметь вид

$$\Theta_{M \times S} = \begin{bmatrix} \gamma_1^{t_1^1} & \gamma_1^{t_1^2} & \vdots & \gamma_1^{t_1^S} \\ \gamma_2^{t_2^1} & \gamma_2^{t_2^2} & \vdots & \gamma_2^{t_2^S} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_g^{t_g^1} & \gamma_g^{t_g^2} & \vdots & \gamma_g^{t_g^S} \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где t_g^S – длительность g -го фрагмента S -го передаваемого сообщения.

На основании данных о двоичной разрядности I_g фрагментов определяют рабочее основание p_g для каждого фрагмента из условия, что наибольший общий делитель (НОД) для любых оснований p_g и $p_{\tilde{g}}$ равен единице:

$$p_g \geq 2^{I_g}, \quad \forall \{p_g, p_{\tilde{g}}\} \text{ НОД}(p_g, p_{\tilde{g}}) = 1, \quad g, \tilde{g} = \{1, 2, \dots, G\}, \quad g \neq \tilde{g}. \quad (7)$$

Такой подход позволяет применить принцип кодирования путем определения контрольных остатков, изложенный в [15, 18]. Для определения контрольных остатков необходимо получить изоморфный образ Q кадра \hat{A} с помощью китайской теоремы об остатках (КТО) [9]. Совокупность попарно взаимно простых оснований из (7) представляет новую систему оснований. В данной системе оснований определим p_h как контрольное основание h -го контрольного пространственного парциального канала D_h . Может существовать несколько контрольных оснований, таких как

$$p_1, p_2, \dots, p_g < p_{g+1} < p_{g+2} < \dots < p_h. \quad (8)$$

Произведение $Z = \prod_{g=1}^{G=M-H} p_g$ назовем рабочим диапазоном, а произведение $W = \prod_{m=1}^M p_m$ – полным диапазоном. На основе γ_g и p_g получают изоморфный образ Q по выбранной системе оснований (8), согласно выражению КТО:

$$Q = \sum_{g=1}^G \gamma_g \beta_g \text{ mod } Z, \quad (9)$$

где β_g – ортонормированные базисы системы оснований, $\beta_g = \mu_g \frac{Z}{p_g}$;

μ_g – вес базиса в виде целого положительного числа (для случая алгебры кольца целых чисел), удовлетворяющего условию $\mu_g \beta_g \equiv 1 \text{ mod } p_g$.

Число Q из (9) должно удовлетворять условию $Q \leq Z$. Далее определяют количество и значения контрольных оснований p_h и вычисляют значения контрольных остатков γ_h от деления числа Q на модули $\{p_1, p_2, \dots, p_h\}$.

Таким образом, по параллельным парциальным радиоканалам в один временной интервал, равный наибольшему количеству разрядов остатка, передается вектор $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_g, \gamma_{g+1}, \gamma_{g+2}, \dots, \gamma_H]^T$. Такого рода процедура сравнима с процедурой частотного или временного перемежения [5]. Однако в предложенном способе синтеза пространственно-временного кода отличием от известных является то, что «*перемежение*» производится в пространстве. Преимуществом предлагаемого способа является то, что временной интервал передачи исходного сообщения (кадра) t до приемного пункта уменьшается до числа разрядов самого большого фрагмента из γ с учетом свойств канала, по которому он передается. Временной интервал передачи информации t предлагаемого способа дополняется временем на синхронизацию фрагментов, принятых отдельными ПП, и сбор информации от ПП на пункте обработки информации. Важным свойством данного кода является то, что корректирующие остатки (фрагменты) в нем не связаны с информационными остатками (фрагментами), что создает множество различных вариантов для эффективного кодирования. Пространственно-временная матрица (6) примет вид:

$$\Theta_{M \times S} = \begin{bmatrix} \gamma_1^{t_1^1} & \gamma_1^{t_1^2} & \vdots & \gamma_1^{t_1^S} \\ \gamma_2^{t_2^1} & \gamma_2^{t_2^2} & \vdots & \gamma_2^{t_2^S} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_g^{t_g^1} & \gamma_g^{t_g^2} & \vdots & \gamma_g^{t_g^S} \\ \gamma_{g+1}^{t_{g+1}^1} & \gamma_{g+1}^{t_{g+1}^2} & \vdots & \gamma_{g+1}^{t_{g+1}^S} \\ \gamma_{g+2}^{t_{g+2}^1} & \gamma_{g+2}^{t_{g+2}^2} & \vdots & \gamma_{g+2}^{t_{g+2}^S} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_H^{t_H^1} & \gamma_H^{t_H^2} & \vdots & \gamma_H^{t_H^S} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Введение одного пространственного контрольного канала и передача по нему контрольного остатка позволяет обнаружить 100% одиночных ошибок и 95% двойных ошибок в пространственном векторе (столбце матрицы Θ) и при некоторых условиях исправить одну ошибку в рабочих основаниях пространственного вектора. Оценить эффективность пространственного кодирования можно путем сравнения с известными методами временного кодирования при равных параметрах кодов. Введение двух контрольных каналов позволяет обнаружить и исправить одну ошибку во всех основаниях данного вектора. Этого явно недостаточно для выполнения требований помехоустойчивости. В связи с чем необходимо дополнить пространственное кодирование временным, т.е. дополнительно закодировать каждый фрагмент исходного сообщения помехоустойчивым кодом.

Так как для каждого S -го сообщения длительности фрагментов для каждого парциального канала будут отличаться друг от друга, то дополнительно возникает задача синхронизации парциальных каналов, которая может быть решена оптимизацией порядка модуляции, оптимизацией скорости передачи, как например в [19], а также разработкой новых кодов над полем $GF(p)$ для обеспечения $t_g \neq t_{\tilde{g}}$.

КОДИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫМ КОДОМ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОДИРОВАНИЯ

Остатки от сообщения \hat{A} , представленные в виде символов, могут быть закодированы во временной области циклическим кодом, например кодом БЧХ, кодом Рида-Соломона (или, изоморфным ему, кодом Лагранжа [14–17]). А именно, каждая вектор-строка передаваемой матрицы может быть закодирована временным кодом классическим формированием корректирующего временного вектора $\mathbf{q} = [q_u]$, $u = \overline{1, U}$ для каждой строки матрицы (10). Каждый элемент вектора \mathbf{q} передается во временной интервал t_g^u .

При кодировании кодом Рида-Соломона выбор горизонтального размера (рис. 4) пространственно-временной псевдоинформационной матрицы и матрицы корректирующих символов временного кода определяется требованием к количеству обнаруживаемых и исправляемых ошибок во временной области. Соответственно, выбор вертикального размера матрицы корректирующих символов пространственного кода определяется доступностью и качеством парциальных каналов и требованием к исправляющей способности, что позволяет разрабатывать новые методы эффективного кодирования.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОДИРОВАНИЯ

Для того чтобы оценить эффективность предложенного способа кодирования, необходимо провести сравнение с классическими временными помехоустойчивыми кодами.

Для этого кодирование исходного сообщения циклическим кодом и его передачу по одному радиоканалу будем сравнивать с кодированием одного фрагмента сообщения циклическим кодом после разбиения сообщения предлагаемым способом и передачи его по каналу с наихудшим качеством. Далее приведем результаты сравнительной оценки при передаче того же исходного сообщения закодированного кодом Рида-Соломона, по одному каналу с передачей фрагментов этого сообщения по четырем парциальным радиоканалам, один из которых контрольный. Фрагменты также кодируются кодом Рида-Соломона.

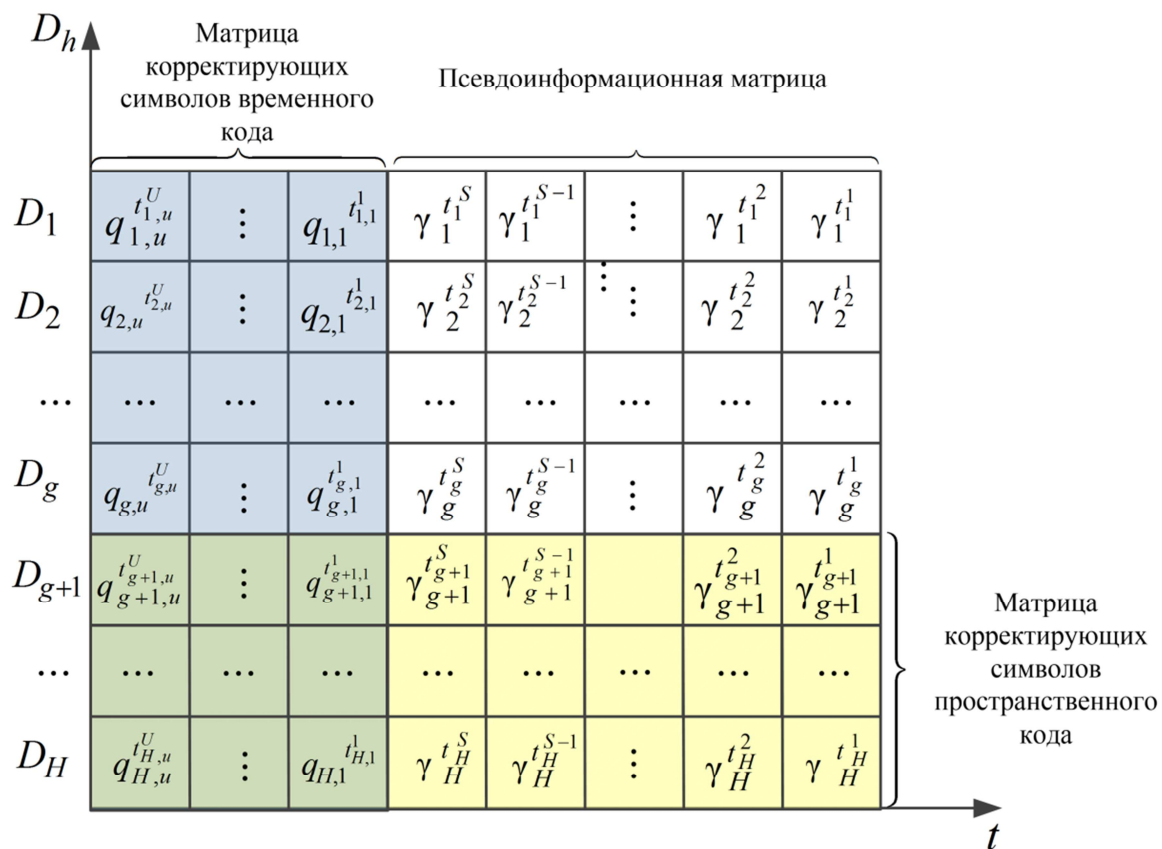


Рис. 4. Пространственно-временной корректирующий код

Численная оценка проводилась по формуле вероятности ошибки в условиях когерентной демодуляции BPSK с применением среды моделирования Matlab 7.0. Результаты сравнения представлены на рис. 5–7. Для кода Рида-Соломона так называемое «минимальное расстояние Хэмминга» во временной области показывает, аналогично двоичному коду, расстояние между разрешенными и запрещенными комбинациями символов сообщения, каждый из которых занимает несколько разрядов двоичного и рассчитывается по формуле [12]:

$$W = 2e + 1 = N - K + 1, \quad (11)$$

где N – длина кодовой комбинации, $N = 2^b - 1$;
 b – количество бит в символе;
 e – количество исправляемых символьных ошибок.

Пусть исходное сообщение до применения классического или предлагаемого способов кодирования, состоит из K 5-битных символов, выбираемых из диапазона $[0, 31]$. Для сравнения сначала необходимо закодировать сообщение кодом Рида-Соломона так, чтобы можно было исправить $e \leq 3$ ошибок. Такой код на основе (11) имеет параметры $N = 31, K = 25$. Тогда исходное сообщение длиной в 125 бит, при кодировании кодом Рида-Соломона с данными параметрами, будет иметь длину в 155 бит.

Если же некодированное исходное сообщение из K 5-битных символов разделить на фрагменты (остатки) согласно предлагаемому методу, то можно исходному сообщению сопоставить сообщение, состоящее из фрагментов, относящихся к различным радиоканалам, но выстроенных в одну последовательность в виде символов меньшей разрядности. Максимальная разрядность полученных остатков $\hat{b} = 4$. Тогда для исправления $e \leq 3$ ошибок необходимо кодировать сообщение кодом Рида-Соломона с параметрами $\hat{N} = 15, \hat{K} = 9$. Параметр \hat{K} определяется на основе \hat{N} , а \hat{N} на основе количества разрядов в символе. Отсюда очевиден выигрыш в помехоустойчивости предлагаемого пространственно-временного кода. Для подтверждения сказанного были получены оценки вероятности символьной ошибки фрагмента, передаваемого по радиоканалу с наихудшим качеством, а также вероятности ошибки в сообщении.

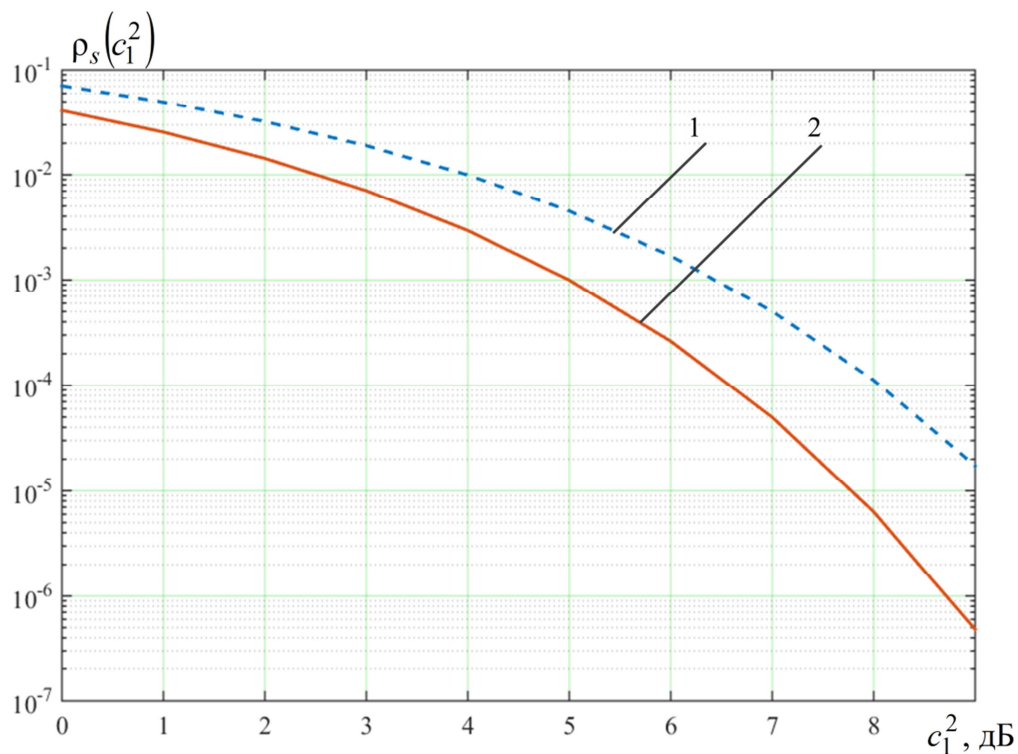


Рис. 5. Сравнение вероятности символьной ошибки при передаче исходного сообщения (кривая 1) и фрагмента, переданного радиоканалу наихудшего качества (кривая 2)

Длина кодовой комбинации будет составлять 60 бит. Сравнение вероятности ошибки в сообщении в условиях когерентной демодуляции BPSK приведена на рис. 6.

Выигрыш в помехоустойчивости при передаче сообщения из 25 символов, вычисленный в виде среднего арифметического разности вероятностей ошибки в сообщении, составляет 17%.

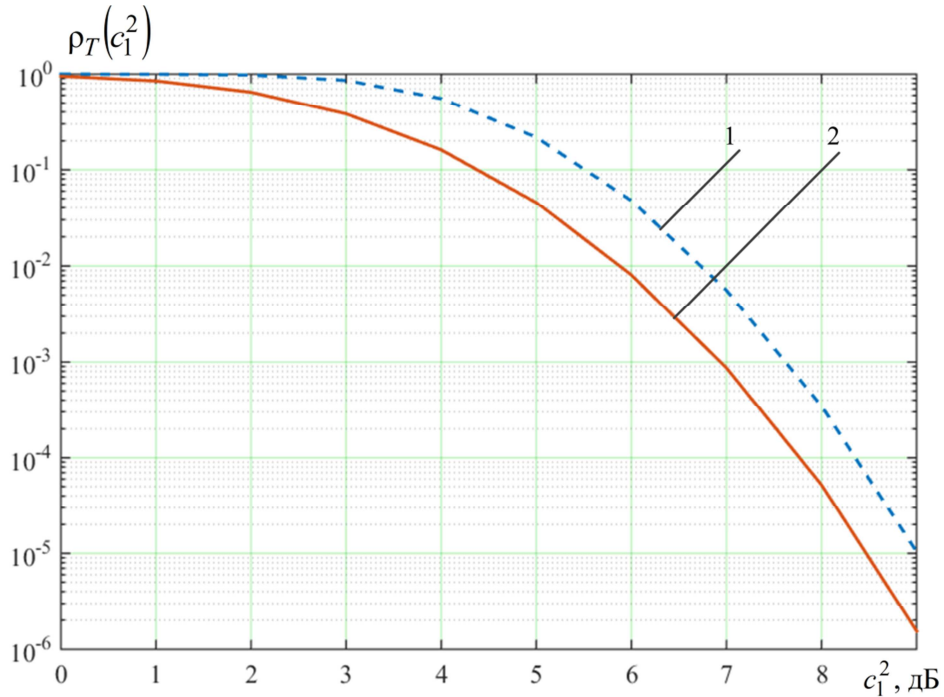


Рис. 6. Сравнение вероятности возникновения до трех ошибок в исходной кодовой комбинации (кривая 1) и кодовой комбинации остатков одного канала при кодировании кодом Рида-Соломона (кривая 2)

На рис.7 приведено сравнение вероятности ошибки ρ_T при передаче исходного девятиразрядного сообщения по одному каналу с вероятностью ошибки $\rho_{\text{парциальных каналов}}$ при передаче того же сообщения в виде фрагментов по четырем парциальным радиоканалам.

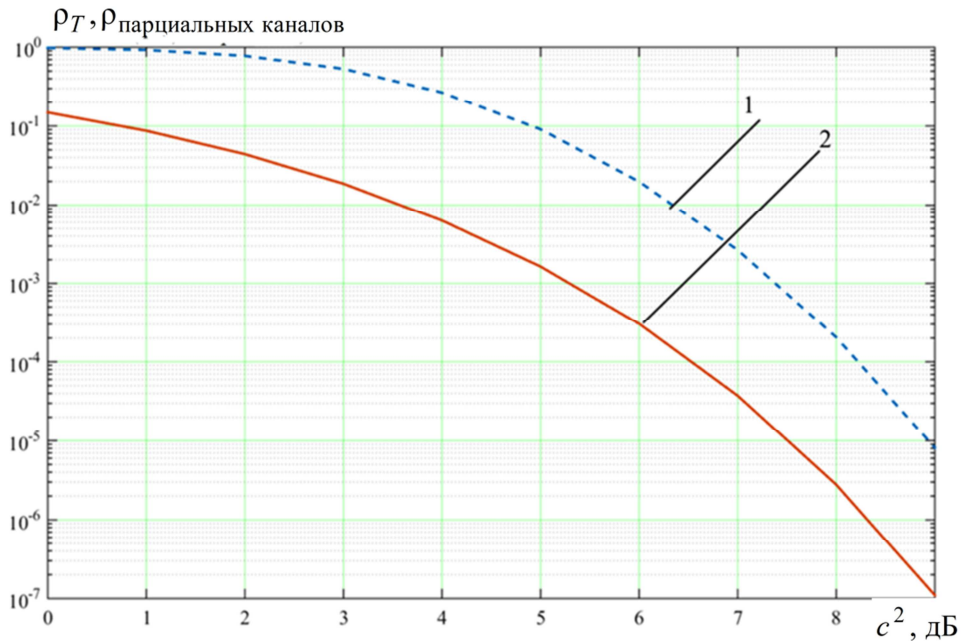


Рис. 7. Сравнение помехоустойчивости при передаче исходной кодовой комбинации (кривая 1) и совокупности фрагментов кодовой комбинации по четырем каналам при кодировании кодом Рида-Соломона (кривая 2)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен способ синтеза пространственно-временного 2D-кода. Помехоустойчивость системы передачи информации повышена приблизительно на 17% (при принятых допущениях), а также уменьшена длительность передачи одного символа сообщения приблизительно в 1,89 раз. При этом не учитывалась длительность сбора информации в пункте обработки информации. «Цена выигрыша» – увеличение энергетических затрат на формирование нескольких пространственных каналов, либо, в случае ограничения сверху на энергетические параметры, – уменьшение протяженности канала связи. Оптимизация энергетических параметров параллельных каналов, учитывающих ошибки, возникающие вследствие нестабильности главного максимума ХН МАР, является предметом отдельных работ [20] и дальнейших исследований. Вопросы защиты информации, передаваемой по радиоканалам связи с воздушными РТС, обсуждались авторами в [21].

Список используемых источников

1. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244 с.
2. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
3. Андронов И.С., Финк Л.М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. – М.: Советское радио, 1971. – 408 с.
4. 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. – 592 с.
5. Коржик В.И., Финк Л.М. Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой. – М.: Связь, 1975. – 34 с.
6. Рашич А.В. Сети беспроводного доступа WiMAX: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 179 с.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. Б. Скляр. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
8. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
9. Бухштаб А.А. Теория чисел. – М.: Просвещение, 1966. – 380 с.
10. Mandelbaum D.M. Error correction in residue arithmetic // IEEE Trans. Comput. – 1972. – Vol 21, № 6. – P. 538–545.
11. Mandelbaum D.M. On a class of arithmetic codes and a decoding algorithm // IEEE Trans. On information Theory. – 1976. – № 21. – P. 85–88.
12. Теория кодирования: пер. с яп. / Т. Касами, Н. Токура, Ё. Ивадари, Я. Инагаки. – М.: Мир, 1978. – 568 с.
13. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / пер. с англ. Р. Блейхут. – М.: Мир, 1986. – 575 с.
14. Способ кодирования чисел: а. с. №272666 СССР / Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. – Оpubл. 03.06.1970, Бюл. № 19. – 8 с.
15. Амербаев В.М. Теоретические основы машинной арифметики. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 324 с.
16. Устройство для обнаружения и исправления ошибок арифметических преобразований полиномиальных кодов: а. с. 542194 СССР / Амербаев В. М., Белова М.Н., Бияшев Р. Г., Черкасов Ю. Н. и Альзамарова Э. И. – Оpubл. 05.01.1977, Бюл. № 1. – 4 с.

17. *Кубицкий В.И.* Декодирование многократных ошибок кодами Лагранжа // Проблемы информатизации и управления. – 2007. – 4(22). – С. 86–92.

18. *Акушский И.Я., Юдицкий Д.И.* Машинная арифметика в остаточных классах. – М.: Советское радио, 1968. – 440 с.

19. Метод повышения скорости передачи информации в параллельных радиоканалах робототехнических комплексов специального назначения / Д.С. Махов, А.В. Крупенин, А.С. Кузьменко, В.И. Сирченко // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 6 (34). – С. 102–112.

20. *Махов Д.С.* Метод оптимизации энергетических параметров систем передачи информации в парциальных радиоканалах малоразмерных подвижных объектов на основе аппарата теории нечетких множеств // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 27–49.

21. Protection of Information from Imitation on the Basis of Crypt-Code Structures, Advances in Soft and Hard Computing / D. Samoilenko, M. Eremeev, O. Finko, S. Dichenko // ACS 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, Cham, 2019. – Vol. 889. – P. 317–331.

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

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ПОДАВЛЕНИЯ КОРРЕЛИРОВАННОЙ С СИГНАЛОМ ПОМЕХИ В ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПО МИНИМУМУ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ

В статье приведены результаты вычислительного эксперимента по исследованию и сравнению характеристик оптимальной пространственной селекции коррелированных и некоррелированных с сигналом помех в линейной эквидистантной антенной решетке (АР), оптимальной по критерию минимума среднеквадратического отклонения. Исследован характер и показаны существенные отличия формы диаграммы направленности и показателей эффективности оптимизированной антенной решетки по сравнению к стандартной АР в зависимости от угла прихода помех и наличия корреляционной зависимости между сигналом и помехой. Проанализирована динамика изменения отношения сигнал/помехи на выходе оптимизированной антенной решетки от значения коэффициента корреляции, разности между углами прихода сигнала и коррелированной помехи, приведены параметры сигнально-помеховой обстановки, приводящие к недопустимому снижению эффективности пространственного фильтра.

Ключевые слова: адаптивные антенные решетки, преднамеренные радиопомехи, коррелированные помехи, помехоустойчивость, вектор весовых коэффициентов антенной решетки.

ВВЕДЕНИЕ

Задача повышения помехоустойчивости радиотехнических систем является классической и не утрачивает свою актуальность на протяжении десятилетий. Решение данной задачи в радиолокации и радиосвязи достигается за счет совершенствования методов пространственной селекции, способов формирования и обработки сигналов [1]. В этой связи адаптивные антенные решетки (ААР) остаются предметом интенсивных исследований, так как позволяют повысить эффективность приема полезных сигналов при наличии помех. Основное преимущество адаптивных АР заключается в способности без априорной информации о помеховой ситуации автоматически обнаружить присутствие источников помех и подавить их сигналы на выходе, улучшая тем самым качество приема полезного сигнала. В системах с адаптивными решетками могут применяться различные критерии подавления помех и, при этом, результирующая эффективность у них будет гораздо выше, чем при использовании неадаптивных АР или остронаправленных антенн.

Принципы работы ААР в первую очередь различаются принятыми критериями оптимальности и возможностями их применения [2, 3]. Критерии определяют свойства учитываемого отличия сигнала от помех, используемые в ААР, как необходимую априорную информацию. Такие критерии, как максимум отношения сигнал/шум, максимум отношения правдоподобия используют различия в направлениях прихода сигнала и помехи. При этом помехой считают все, что принимается с направлений, отличных от направления полезного сигнала [2].

Одним из немногих критериев, учитывающих текущее изменение полезного сигнала и его структуру для селекции в ААР является минимум среднеквадратического отклонения (МСКО) выходного сигнала от эталонного. Поэтому адаптивные антенные решетки Уидроу [4], осуществляющие оптимальную пространственную селекцию помех по критерию МСКО [2–4], находят широкое применение в спутниковых каналах связи, навигационных и радиолокационных системах [1].

Свойства ААР Уидроу подробно рассмотрены в ряде работ зарубежных и отечественных авторов [2–5], но только для некоррелированных сигналов и помех. Вопросы исследования влияния коррелированности сигнала и помех на характеристики ААР с оптимальной пространственной селекцией сигнала рассмотрены в небольшом числе известных публикаций. В доступной научно-технической литературе не получили в достаточной степени обоснованные ответы на вопросы оценки влияния коррелированных помех на степень их подавления, а также на уровень полезного сигнала на выходе ААР при задаваемых угловых и энергетических различиях сигнала и преднамеренных помех.

В данной работе представлены результаты вычислительного эксперимента в среде Matlab и их интерпретация. Показаны виды диаграммы направленности ААР в декартовой, логарифмической и полярной системах координат, а также степень подавления помех при изменении параметров сигнально-помеховой обстановки. Проанализирована динамика изменения отношения сигнал/помехи на выходе оптимизированной АР в зависимости от угла прихода помех и значения коэффициента взаимной корреляции сигнала и помех. Приведены параметры коррелированных помех, приводящих к недопустимому снижению эффективности пространственного фильтра.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Модель сигнально-помеховой обстановки. Поскольку операция оптимального взвешенного суммирования сигнала и помех с выходов элементов АР является линейной, то достаточно выбрать модели сигнала и помех в рамках корреляционной теории. В качестве такой модели, как известно, можно принять квазиузкополосный случайный процесс $s(t)$ на несущем колебании частоты ω_0 со случайными амплитудой $A(t)$ и фазой $\varphi(t)$. Формулу радиосигнала в комплексной форме $\dot{s}(t)$ можно записать в следующем виде:

$$\dot{s}(t) = A(t)e^{-i[\omega_0 t + \varphi(t)]} = \dot{A}(t) e^{i\omega_0 t}, \quad (1)$$

где $\dot{A}(t) = A(t)e^{-i\varphi(t)}$ – комплексная амплитуда.

Рассматривается линейная эквидистантная АР, состоящая из L всенаправленных приемных элементов с расстоянием $d = \lambda/2$ между ними. На вход АР поступают квазиузкополосные сигнал и две помехи на совпадающих частотах несущих колебаний, воздействующие с различных направлений. Для компактности формул полезный сигнал будем индексировать буквой «с», шум – буквой «ш», помехи 1 и 2 – буквой «п» с порядковыми номерами 1 и 2. Мощности сигнала, собственного шума антенного элемента и помех, соответственно, обозначим P_c , $P_{ш}$, $P_{п1}$, $P_{п2}$. Углы прихода сигнала и помех относительно перпендикуляра к линии расположения элементов АР равны θ_c , $\theta_{п1}$, $\theta_{п2}$, соответственно.

На выходах элементов АР имеем отклики сигнала, помех и собственных шумов элементов АР. Мощности собственного шума в каждом элементе АР примем одинаковыми и равными $P_{ш}$. Для удобства вычислений уровни сигнала, i -й помехи и шума на выходе одного элемента АР будем выражать в относительных единицах, а именно:

$$q_c = P_c/P_{ш}, \quad q_{pi} = P_{pi}/P_{ш} \quad (i = 1, 2), \quad q_{ш} = P_{ш}/P_{ш} = 1. \quad (2)$$

При выводе формул примем, что относительные амплитуды напряжения сигнала, помех и шума можно представить в виде, соответственно, $s_c\sqrt{q_c}$, $s_{pi}\sqrt{q_{pi}}$, $s_{ш}\sqrt{q_{ш}}$, причем справедливо соотношение для введенных случайных составляющих амплитуд $\langle s_c^2 \rangle = \langle s_{pi}^2 \rangle = \langle s_{ш}^2 \rangle = 1$, где $\langle \dots \rangle$ – знак статического усреднения. Векторы и матрицы будем обозначать «жирным» шрифтом.

Вектор входной смеси сигнала и помех представим в виде

$$\mathbf{x}_{\text{вх}} = \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_{\text{п1}} + \mathbf{x}_{\text{п2}} + \mathbf{x}_{\text{ш}}. \quad (3)$$

Тогда векторы сигнала, помех и шума на выходах элементов АР, не теряя общности, примем в виде:

$$\mathbf{x}_c = s_c \sqrt{q_c} \mathbf{h}_c, \quad \mathbf{x}_{\text{п}i} = s_{\text{п}i} \sqrt{q_{\text{п}i}} \mathbf{h}_{\text{п}i} \quad (i = 1, 2), \quad \mathbf{x}_{\text{ш}} = \sqrt{q_{\text{ш}}} \mathbf{S}_{\text{ш}}. \quad (4)$$

Собственные шумы элементов АР имеют одинаковую мощность $P_{\text{ш}}$, взаимно не коррелированы, не коррелированы с сигналом и помехами. Поэтому при принятых условиях (2) корреляционная матрица вектора шумов элементов АР представляет собой квадратную матрицу \mathbf{I} с единицами по главной диагонали $\langle \mathbf{x}_{\text{ш}} \mathbf{x}_{\text{ш}}^+ \rangle = \mathbf{I}$, где $(\dots)^+$ – знак эрмитова сопряжения.

Формулы вычисления весовых коэффициентов при оптимизации антенной решетки по критерию МСКО. Основной особенностью адаптивных антенных решеток является возможность управления формой характеристики диаграммы направленности АР (за счет выбора оптимального вектора весовых коэффициентов (ВВК) в диаграммообразующей схеме) даже в условиях априорной неопределенности сигнально-помеховой обстановки с целью ослабления воздействия помех вплоть до полного их подавления.

Структурная схема антенной решетки с адаптацией по критерию МСКО приведена в работах [2, 4, 5]. Оптимальная пространственная селекция помех в рассматриваемой антенной решетке осуществляется в соответствии с критерием МСКО выходного сигнала от эталонного [4], позволяющим осуществлять адаптацию значений вектора весовых коэффициентов \mathbf{w}_{opt} к текущему состоянию сигнально-помеховой обстановки. За счет соответствующего выбора комплексных ВВК в диаграммообразующей схеме АР осуществляется управление и изменение формы диаграммы направленности с целью улучшения качества приема полезного сигнала и одновременного подавления помех.

Вид диаграммы направленности ААР с учетом оптимального на текущий момент времени ВВК \mathbf{w}_{opt} вычисляется по формуле

$$f(\theta) = \mathbf{w}_{\text{opt}}^+ \mathbf{h}(\theta). \quad (5)$$

Здесь \mathbf{w}_{opt} – оптимальное по критерию МСКО значение ВВК антенной решетки $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_L)^T$, где $(\dots)^T$ – знак операции транспонирования;

$\mathbf{h}(\theta)$ – фазор АР;

θ – угол относительно вертикали к линии расположения элементов АР.

Фазоры сигнала и помех для линейной эквидистантной АР имеют вид [5, 6]:

$$\mathbf{h}_c = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\varphi_c} \\ \dots \\ e^{-jl\varphi_c} \\ \dots \\ e^{-j(L-1)\varphi_c} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{h}_{\text{п1}} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\varphi_{\text{п1}}} \\ \dots \\ e^{-jl\varphi_{\text{п1}}} \\ \dots \\ e^{-j(L-1)\varphi_{\text{п1}}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{h}_{\text{п2}} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\varphi_{\text{п2}}} \\ \dots \\ e^{-jl\varphi_{\text{п2}}} \\ \dots \\ e^{-j(L-1)\varphi_{\text{п2}}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Здесь L – число элементов АР;

φ – фазовый набег между соседними элементами АР, определяемый для сигнала и помех выражениями:

$$\varphi_c = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_c; \quad \varphi_{\text{п}i} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_{\text{п}i},$$

где λ – длина волны несущего колебания;
 d – расстояние между соседними элементами АР;
 θ_c и $\theta_{\text{п}i}$ – углы прихода сигнала и помех относительно вертикали к линии расположения элементов АР.

Произведем расчет оптимального комплексного вектора весовых коэффициентов \mathbf{w}_{opt} для случая, когда на вход АР воздействуют сигнал и две помехи. Вектор второй помехи коррелирован с сигналом, но не коррелирован с первой помехой. В процессе вычисления произведем сравнение аналогичных выражений, полученных нами в статье [5] для случая взаимно некоррелированных векторов сигнала и помех.

Оптимальная пространственная селекция помех в рассматриваемой адаптивной АР осуществляется по критерию МСКО, согласно которому оптимальный вектор весовых коэффициентов \mathbf{w}_{opt} вычисляется по формуле [2, 4]

$$\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}_d, \quad (7)$$

где \mathbf{R} – автокорреляционная матрица вектора $\mathbf{x}_{\text{вх}}$ (3) входной смеси сигнала и помех,
 $\mathbf{R} = \langle \mathbf{x}_{\text{вх}} \mathbf{x}_{\text{вх}}^+ \rangle$;

\mathbf{R}_d – взаимно корреляционная матрица (в данном случае вектор) входного сигнала \mathbf{x} и скалярного опорного сигнала $d(t)$, $\mathbf{R}_d = \langle \mathbf{x}_{\text{вх}} \cdot d(t) \rangle$.

Общая корреляционная матрица вектора откликов с выходов элементов АР \mathbf{R} будет содержать корреляционную матрицу сигнала \mathbf{R}_c и корреляционные матрицы некоррелированных $\mathbf{R}_{\text{нкп}}$ и коррелированных $\mathbf{R}_{\text{ксп}}$ с сигналом помех:

$$\mathbf{R} = \langle (\mathbf{x}_c + \mathbf{x}_{\text{п}1} + \mathbf{x}_{\text{п}2} + \mathbf{x}_{\text{ш}})(\mathbf{x}_c + \mathbf{x}_{\text{п}1} + \mathbf{x}_{\text{п}2} + \mathbf{x}_{\text{ш}})^+ \rangle = \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_{\text{нкп}} + \mathbf{R}_{\text{ксп}} = \mathbf{R}_c + \mathbf{M}, \quad (8)$$

где $\mathbf{R}_c = q_c \mathbf{h}_c \mathbf{h}_c^+$ – автокорреляционная матрица сигнала.

Выполненные по формуле (8) расчеты показывают, что полная корреляционная матрица суммарных помех на выходах элементов АР

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_{\text{нкп}} + \mathbf{R}_{\text{ксп}} \quad (9)$$

включает в себя две составляющие:

– корреляционную матрицу взаимно некоррелированных помех и шума

$$\mathbf{R}_{\text{нкп}} = q_{\text{п}1} \mathbf{h}_{\text{п}1} \mathbf{h}_{\text{п}1}^+ + q_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{п}2}^+ + \sqrt{q_{\text{ш}}} \mathbf{S}_{\text{ш}} = q_{\text{п}1} \mathbf{h}_{\text{п}1} \mathbf{h}_{\text{п}1}^+ + q_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{п}2}^+ + \mathbf{I}; \quad (10)$$

– матрицу взаимной корреляции сигнала и второй помехи

$$\mathbf{R}_{\text{ксп}} = r_{c \text{ п}2} \sqrt{q_c q_{\text{п}2}} \mathbf{h}_c \mathbf{h}_{\text{п}2}^+ + r_{c \text{ п}2} \sqrt{q_c q_{\text{п}2}} \mathbf{h}_{\text{п}2} \mathbf{h}_c^+ = r_{c \text{ п}2} \sqrt{q_c q_{\text{п}2}} (\mathbf{h}_c \mathbf{h}_{\text{п}2}^+ + \mathbf{h}_{\text{п}2} \mathbf{h}_c^+), \quad (11)$$

где $r_{c \text{ п}2} = r_{\text{п}2 c}$ – численные значения коэффициентов взаимной корреляции сигнала и второй помехи.

При расчете полной матрицы помех \mathbf{M} (9) принимается правило, при котором объединенной помехой считается все, что не относится к сигналу. Анализ полученного выражения для матрицы помех \mathbf{M} показывает, что при определении уровней помех на входе и выходе ААР наряду с корреляционной матрицей взаимно некоррелированных помех и шума $\mathbf{R}_{\text{нкп}}$ (10), при наличии корреляции появляется дополнительная составляющая $\mathbf{R}_{\text{ксп}}$ (11). Матрицу взаимной корреляции сигнала и второй помехи $\mathbf{R}_{\text{ксп}}$ будем называть матрицей **корреляционной составляющей помехи**, так как она проявляется только при наличии корреляции.

Следовательно, полная матрица помех \mathbf{M} (9) изменяет свое значение в зависимости от наличия корреляции между сигналом и второй помехой:

– при отсутствии корреляции между сигналом и помехами матрица $\mathbf{R}_{\text{ксп}} = 0$ и полная матрица помех равна

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_{\text{нкп}} = q_{\text{п1}} \mathbf{h}_{\text{п1}} \mathbf{h}_{\text{п1}}^+ + q_{\text{п2}} \mathbf{h}_{\text{п2}} \mathbf{h}_{\text{п2}}^+ + \mathbf{I}; \quad (12)$$

– при наличии корреляции между сигналом и второй помехой матрица $\mathbf{R}_{\text{ксп}} \neq 0$ и

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_{\text{нкп}} + \mathbf{R}_{\text{ксп}} = q_{\text{п1}} \mathbf{h}_{\text{п1}} \mathbf{h}_{\text{п1}}^+ + q_{\text{п2}} \mathbf{h}_{\text{п2}} \mathbf{h}_{\text{п2}}^+ + r_{\text{с п2}} \sqrt{q_{\text{с}} q_{\text{п2}}} (\mathbf{h}_{\text{с}} \mathbf{h}_{\text{п2}}^+ + \mathbf{h}_{\text{п2}} \mathbf{h}_{\text{с}}^+) + \mathbf{I}. \quad (13)$$

Таким образом, суммарная мощность коррелированных с сигналом помех (13) оказывается большей, чем простая сумма мощностей помех (12), воздействующих на АР [5, 6].

Затем определим значение взаимно корреляционной матрицы \mathbf{R}_d (в данном случае вектора) входного $\mathbf{x}_{\text{вх}}$ и опорного скалярного сигнала $d(t)$, присутствующей в формуле (7) для оптимального ВВК \mathbf{w}_{opt} . В качестве эталона $d(t)$ обычно принимается полная копия полезного сигнала $s(t)$ [2, 4], поэтому

$$\mathbf{R}_d = \langle \mathbf{x}_{\text{вх}} \cdot d(t) \rangle = \langle \mathbf{x}_{\text{вх}} \cdot s(t) \rangle. \quad (14)$$

Если сигнал не коррелирован с помехами, то последняя формула после вычислений принимает вид [5]

$$\mathbf{R}_d = q_{\text{с}} \mathbf{h}_{\text{с}}. \quad (15)$$

При взаимной коррелированности сигнала и второй помехи модель вектора эталонного сигнала \mathbf{R}_d усложняется и содержит вектор значений их взаимно корреляционной функции

$$\mathbf{R}_d = K q_{\text{с}} \mathbf{h}_{\text{с}} + r_{\text{с п2}} \sqrt{q_{\text{с}} q_{\text{п2}}} \mathbf{h}_{\text{п2}}. \quad (16)$$

Таким образом, сигнально-помеховая обстановка на выходе элементов АР полностью определяется корреляционной матрицей вектора откликов \mathbf{R} (8) с выходов элементов АР, которая служит в соответствии с формулами (12), (13), (15), (16) основой для вычисления оптимального ВВК \mathbf{w}_{opt} (7) и формирования оптимальной диаграммы направленности ААР (5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Условия проведения эксперимента. Эксперимент проводился при следующих исходных данных: число элементов эквидистантной АР $L = 7$, расстояние между соседними элементами АР $d = \lambda/2$. Рассматривается ситуация, когда на антенную решетку одновременно воздействуют сигнал и две помехи. С сигналом коррелирована только вторая помеха. Уровни сигнала, первой и второй помех на входе АР, соответственно, равны $q_{\text{с вх}} = 50$, $q_{1 \text{ вх}} = q_{2 \text{ вх}} = 250$. При численном моделировании изменялись углы прихода помех и коэффициент корреляции $r_{\text{с п2}}$ между сигналом и второй помехой.

Полезный сигнал приходит перпендикулярно линии расположения элементов АР, т.е. угол прихода сигнала $\theta_{\text{с}}$ принят равным нулю. Угол прихода первой помехи $\theta_{\text{п1}}$ является переменной величиной, изменяющейся в пределах верхней полусферы – $\theta_{\text{п1}} = [-90^\circ, 90^\circ]$ относительно нормали к линии решетки. Углы прихода второй помехи $\theta_{\text{п2}}$ принимали фиксированные значения: -5° , -10° и $24,4^\circ$, первое и второе направления попадают в основной лепесток диаграммы направленности $[-16,8^\circ, 16,8^\circ]$, а последнее – соответствует макси-

муму первого бокового лепестка $[16,8^\circ, 34,8^\circ]$ стандартной АР. Коэффициент взаимной корреляции $r_{c_{п2}}$ сигнала и второй помехи изменялся в диапазоне $[0, 1]$.

Формулы вычисления в компьютерной программе уровней принимаемых сигналов на входе и выходе ААР. При проведении вычислительного эксперимента моделирование ААР и вычисление уровней сигнала и помех на выходе оптимального пространственного фильтра производилось по следующим формулам.

Оптимальный по критерию МСКО вектор весовых коэффициентов – $\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{R}_d$.

Диаграмма направленности ААР – $f(\theta) = \mathbf{w}_{opt}^+ \mathbf{h}(\theta)$.

Уровень сигнала на входе ААР – $q_{c_{вх}} = q_c$.

Уровень сигнала на выходе ААР – $q_{c_{вых}} = \mathbf{w}_{opt}^+ \mathbf{R}_c \mathbf{w}_{opt}$.

В соответствии с полученными формулами (8) и (13) при взаимной корреляции сигнала и второй помехи суммарный уровень помех и шума на входе ААР описывается равенством

$$q_{п_{вх}} = q_{п1} + q_{п2} + 2r_{c_{п2}}\sqrt{q_c q_{п2}} + q_{ш} = q_{п1} + q_{п2} + 2r_{c_{п2}}\sqrt{q_c q_{п2}} + 1.$$

Суммарный уровень помех на выходе ААР – $q_{п_{вых}} = \mathbf{w}_{opt}^+ \mathbf{M} \mathbf{w}_{opt}$.

Условие независимости сигнала и помехи является частным случаем варианта взаимной корреляции сигнала и второй помехи при коэффициенте корреляции $r_{c_{п2}} = 0$. На рис. 1–6 этот случай представлен отдельной кривой, показывающей характеристики ААР при отсутствии корреляции между сигналом и помехами, что позволяет наглядно оценить динамику изменения характеристик ААР от величины взаимной корреляции.

Используемые показатели эффективности ААР.

При моделировании выбраны следующие показатели эффективности ААР:

$K_{c_{вх}} = q_{c_{вх}}/q_{п_{вх}}$ – отношение «сигнал/(помехи+шум)» на входе ААР;

$K_{(c/п)_{вых}} = q_{c_{вых}}/q_{п_{вых}}$ – отношение «сигнал/(помехи+шум)» на выходе ААР с оптимизированным ВВК.

Виды диаграмм направленности ААР. Работа адаптивной антенной решетки наглядно характеризуется формой ее диаграммы направленности (ДН). Подавление помехового сигнала достигается за счет управления положениями нулей диаграммы направленности и уменьшения уровня боковых лепестков в направлении источников помех [2, 4]. Изменением весовых коэффициентов \mathbf{w}_{opt} (5) в каналах адаптации имеется возможность формировать глубокие минимумы ДН (очень малые значения коэффициентов передачи) и обеспечивать высокое подавление помеховых сигналов [5].

Следовательно, вид диаграммы направленности ААР определяется текущим значением ВВК \mathbf{w}_{opt} (7). На рис. 1 построены графики зависимостей модулей составляющих оптимального вектора весовых коэффициентов ААР от значений коэффициента корреляции r при фиксированных углах прихода первой $\theta_{п1} = 24,4^\circ$ и второй $\theta_{п2} = -5^\circ$ помех. Пунктирной кривой отдельно выделен график оптимальных значений ВВК при коэффициенте корреляции $r = 0$, соответствующий отсутствию корреляции между сигналом и помехами. Графики иллюстрируют, что модули составляющих оптимального ВВК существенно меньше единицы. Кривые показаны при наиболее информативно значимых величинах коэффициента взаимной корреляции r . Видно, что наиболее существенные изменения происходят при близких к единице значениях r , а диапазоне $0 < r < 0.9$ значения ВВК \mathbf{w}_{opt} (7) изменяются незначительно.

Проанализируем характер изменения вида ДН АР при наличии взаимной корреляции сигнала со второй помехой. Назовем **квазинормированной диаграмму направленности ААР**, нормированную относительно максимума ДН стандартной АР, т.е. АР с простым суммированием. Использование такой характеристики позволяет наглядно увидеть отличия ДН ААР от ДН стандартной АР и проанализировать изменение значений нормированной ДН оптими-

зированной АР относительно фиксированного (эталонного) уровня при увеличении коэффициента корреляции r между сигналом и помехой.

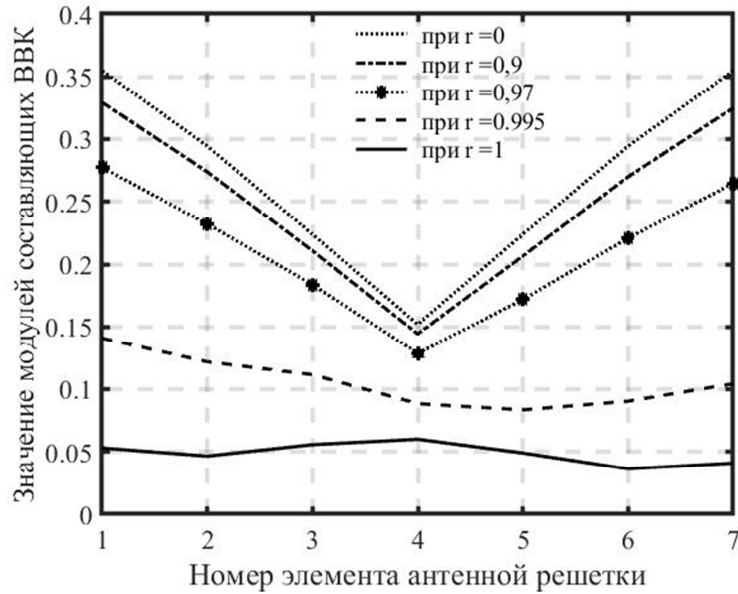


Рис. 1. Значения модулей составляющих ВВК ААР при заданных значениях коэффициента взаимной корреляции r между сигналом и 2-й помехой

На рис. 2 приведены квазинормированные ДН в декартовой системе координат и логарифмическом масштабе при наличии корреляции между сигналом и 2-й помехой, а на рис. 3 – в полярной системе координат. Графики построены при заданных значениях коэффициента взаимной корреляции r , обеспечивающих наилучшую наглядность. Угол прихода первой помехи $\theta_{п1}$ составляет $24,4^\circ$ и совпадает с положением максимума первого бокового лепестка ДН стандартной АР. Вторая помеха с направления $\theta_{п2} = -5^\circ$ попадает в главный лепесток ДН и оказывает наибольшее влияние. Сплошная кривая с маркерами в виде кружков на рис. 2 есть нормированная ДН стандартной АР. Диаграмма направленности при оптимизированном ВВК искажается: главный лепесток уменьшается по амплитуде и отклоняется от помех, а в направлениях помех $\theta_{п1} = 24,4^\circ$ и $\theta_{п2} = -5^\circ$ формируются «нули» ДН.

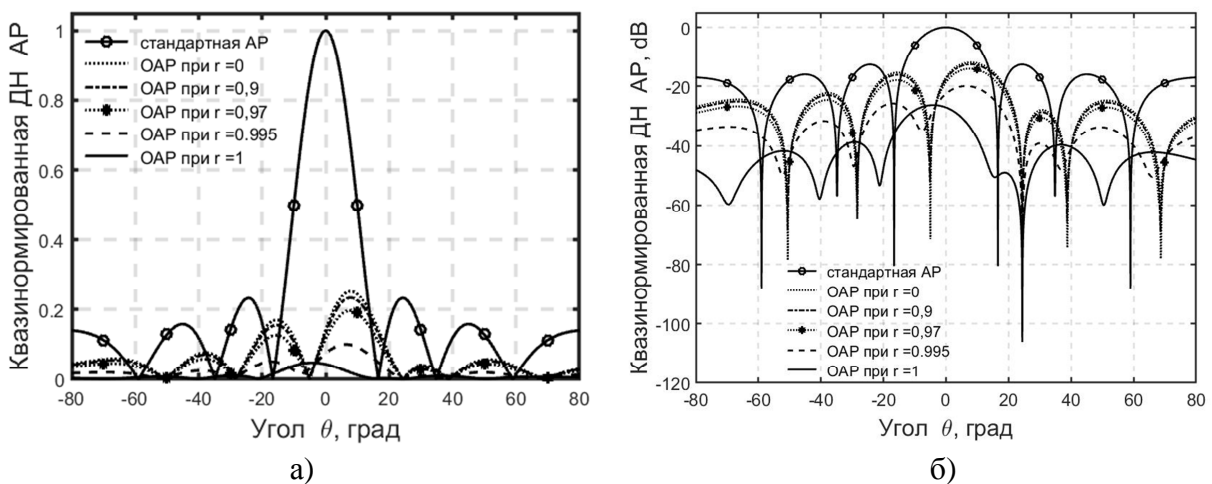


Рис. 2. Квазинормированное значение множителя антенной решетки при заданных значениях коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой:
а – в декартовых координатах; б – в логарифмическом масштабе

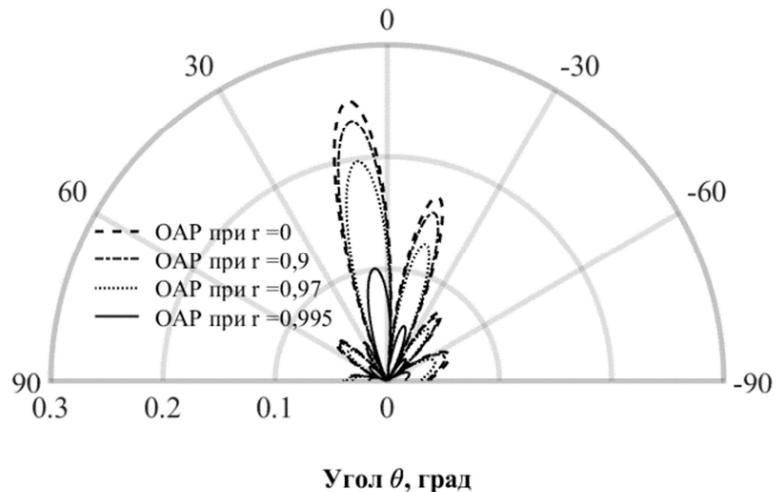


Рис. 3. Квазинормированное значение множителя AP при заданных значениях коэффициента корреляции r в полярной системе координат

Из рис. 2, 3 видно, что взаимная корреляция сигнала и помехи практически не сказывается на форме ДН АР до значений $r = 0,9$. Наиболее резкие изменения ДН происходят при $r > 0,9$, что полностью коррелирует с графиками значений ВВК w_{opt} (7) на рис. 1. Имеющее место уменьшение максимума диаграммы направленности ААР относительно ДН стандартной АР приводит к уменьшению коэффициента усиления ААР в направлении полезного сигнала, что следует учитывать при энергетическом расчете радиолинии, включающей оптимальный пространственный фильтр.

Следует отдельно отметить, что с увеличением коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой резко уменьшается и степень подавления помех за счет уменьшения глубины «нуля» в главном лепестке ДН в направлении на коррелированную с сигналом помеху. Это наглядно демонстрирует сплошная кривая на рис. 4, согласно которой глубина «нулей» в направлении коррелированной с сигналом помехи в диапазоне изменения коэффициента корреляции $r \in [0, 1]$ уменьшается от минус 60 до 0 дБ. В отличие от коррелированной помехи, как показывает пунктирная кривая на рис. 4, уровень подавления некоррелированной с сигналом помехи постоянен, не зависит от коэффициента корреляции r и составляет -77 дБ.

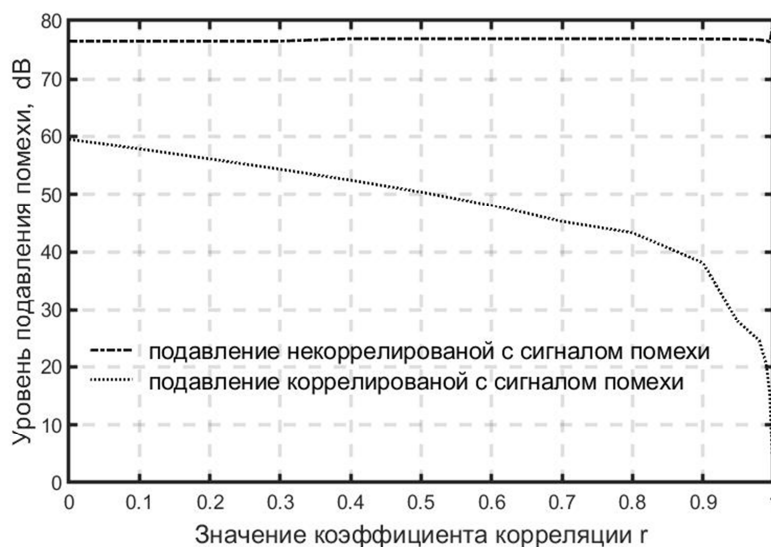


Рис. 4. Зависимость уровня подавления помех от коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой

Зависимость отношения $C/(П+Ш)$ от значений коэффициента взаимной корреляции сигнала и второй помехи. В большинстве случаев наилучшей характеристикой результирующей эффективности приема полезного сигнала оказывается выходное отношение мощности сигнала к сумме мощностей помехи и шума [2].

На рис. 5,а приведены графики изменения отношения $C/(П+Ш)$ на выходе стандартной АР при сканировании первой некоррелированной помехи в диапазоне углов $\theta_{п1} = [-90^\circ, 90^\circ]$ для различных значениях коэффициента корреляции r между сигналом и второй помехой. Вторая помеха приходит с направления $\theta_{п2} = -5^\circ$. Видно, что резкое уменьшение отношения $C/(П+Ш)$ на выходе стандартной АР наблюдается уже при малых величинах коэффициента корреляции и характеризует низкую помехоустойчивость неоптимизированного пространственного фильтра по отношению к коррелированным помехам. Во всех точках графиков рис. 6а отношение $C/(П+Ш)$ меньше 0,3. Наиболее глубокое падение наблюдается при прохождении первой помехой максимума главного лепестка ДН.

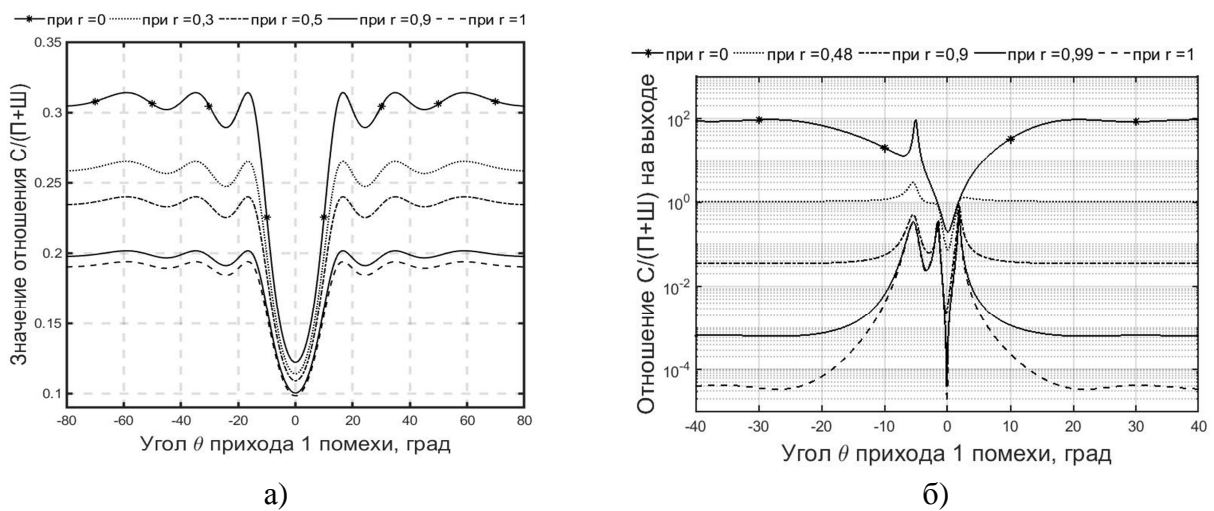


Рис. 5. Зависимость отношения $C/(П+Ш)$ от коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой при $\theta_{п2} = -6^\circ$ на выходе:
а – стандартной АР; б – оптимизированной АР

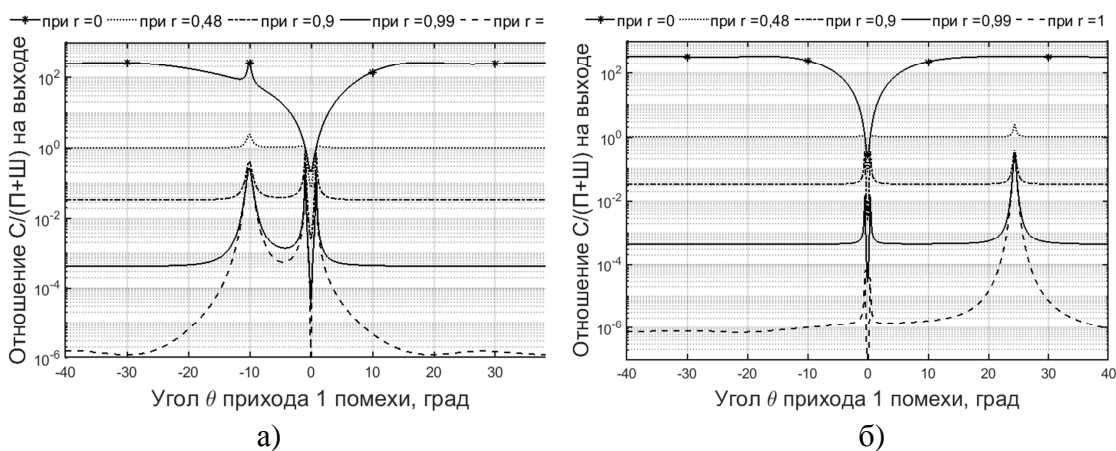


Рис. 6. Зависимость отношения $C/(П+Ш)$ на выходе оптимизированной АР от коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой:
а – при $\theta_{п2} = -10^\circ$; б – при $\theta_{п2} = 24,4^\circ$

На рис. 5,б, 6,а и 6,б представлены в логарифмическом масштабе графики зависимости отношения сигнал/(помехи+шум) на выходе ААР от значений коэффициента взаимной корреляции r сигнала и второй помехи. Единственным условием, которое отличает эти рисунки, является различие в направлении прихода второй помехи. Следует отметить, что на рис. 5,б при $\theta_{п2} = -5^\circ$ и на рис. 6,а и при $\theta_{п2} = -10^\circ$ вторая помеха попадает в главный лепесток ДН стандартной АР, а на рис. 6,б при $\theta_{п2} = 24,4^\circ$ она располагается в максимуме первого бокового лепестка.

Зависимость динамики изменения отношения $C/(П+Ш)$ на входе и выходе оптимизированной АР от величины взаимной корреляции сигнала и помех. На рис. 7 сплошной линией показана зависимость отношения $C/(П+Ш)$ на входе АР от величины коэффициента корреляции r при заданных уровнях сигнала и помех. Видно, что при взаимной коррелированности второй помехи и сигнала входное отношение $C/(П+Ш)$ уменьшается незначительно: при мощности 1-й и 2-й помех в 5 раз большей мощности полезного сигнала отношение $C/(П+Ш)$ на входе АР уменьшается примерно в 1,4 раза от 0,1 до 0,07. Это уменьшение объясняется тем, что в рассматриваемом случае на входе АР наряду с мощностью помех и шума появилась корреляционная составляющая шума (11), которая растет с увеличением коэффициента корреляции r .

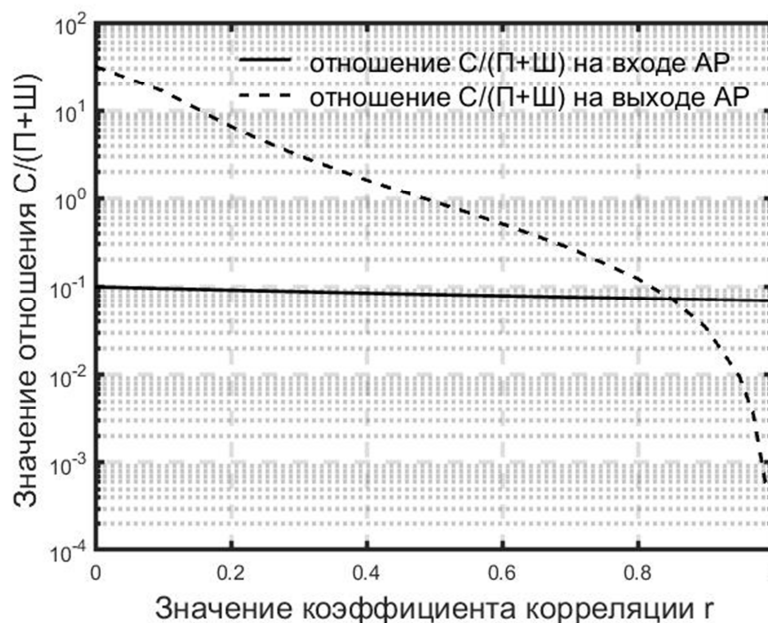


Рис. 7. Динамика изменения отношения $C/(П+Ш)$ на входе и выходе оптимизированной АР в зависимости от значения коэффициента корреляции r при $\theta_{п2} = -10^\circ$

Пунктирной линией на рис. 7 отражается зависимость отношения $C/(П+Ш)$ на выходе оптимального пространственного фильтра при заданных условиях. Графики построены для фиксированных углов прихода первой помехи $\theta_{п1} = 24,4^\circ$ в области боковых лепестков и второй помехи $\theta_{п2} = -10^\circ$, попадающей в главный лепесток ДН. Видно насколько сильно отличается динамика изменения сплошной и пунктирной кривых для указанных условий.

Пунктирный график на рис. 7 показывает, что при взаимной коррелированности сигнала с помехой падение отношения $C/(П+Ш)$ наблюдается уже при малых величинах коэффициента корреляции r . Значение коэффициента корреляции $r = 0,48$ является пороговым ($C/(П+Ш) = 1$), так как при $r > 0,48$ уровень полезного сигнала на выходе АР становится меньше, чем на входе, т.е. АР перестает усиливать полезный сигнал.

Графики изменения коэффициента подавления помехи $K_{(с/п)вых/вх} = \frac{q_{с\text{ вых}}/q_{п\text{ вых}}}{q_{с\text{ вх}}/q_{п\text{ вх}}}$ на выходе АР отдельно не приводятся. Его значение легко определить, поделив отношение $C/(П+Ш)$ на выходе ААР на отношение $C/(П+Ш)$ на входе АР. Моделирование показывает, что динамика изменения коэффициента подавления совпадает с видом пунктирного графика на рис. 7. Для случая коррелированности сигнала и второй помехи значение коэффициента подавления $K_{(с/п)вых/вх} = 1385$ при $r = 0$, $K_{(с/п)вых/вх} = 1$ при $r = 0,48$ и $K_{(с/п)вых/вх} = 0$ при $r = 1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы.

1. Взаимная коррелированность между сигналом и одной помехой существенно влияет на характеристики оптимального пространственного фильтра, уменьшая степень подавления помех и изменяя вид диаграммы направленности.

2. Взаимная коррелированность между сигналом и помехой приводит к изменению вида корреляционной матрицы принимаемых сигналов и помех. На входе и на выходе устройства пространственного фильтра появляется дополнительная помеховая составляющая, названная в статье корреляционной помехой.

3. При взаимной коррелированности между сигналом и одной помехой сильное влияние проявляется уже при малых значениях коэффициента корреляции r . При расположении обеих помех в области основного лепестка ДН увеличение значения коэффициента взаимной корреляции от 0 до 0,2 приводит к уменьшению отношения $C/(П+Ш)$ на 2–3 порядка (от 138,5 до 7,5) уже при числе элементов АР $L = 7$.

4. Компьютерное моделирование позволило качественно и количественно оценить при каких условиях и в какой степени оптимальный пространственный фильтр теряет свойства селекции. При выбранных условиях моделирования коэффициент корреляции $r = 0,48$ является критичным, так как отношение $C/(П+Ш)$ на выходе оптимизированной АР становится близким к единице, что равносильно потере эффективности.

5. Максимальную величину отношения $C/(П+Ш)$ на выходе оптимизированной АР имеет в отсутствие взаимной корреляции (графики при $r = 0$) и когда сканирующая помеха находится в области боковых лепестков. Подтвердились свойства алгоритма адаптации по критерию МСКО, который показал, что при нахождении первой помехи в области боковых лепестков ДН АР отношение $C/(П+Ш)$ на выходе оптимизированной АР, как и ожидалось, имеет практически постоянную величину.

6. Минимальное значение отношения $C/(П+Ш)$ имеет при совпадении углов прихода первой помехи и сигнала, вследствие отсутствия подавления помех в области максимума главного лепестка ДН. Локальный максимум отношения $C/(П+Ш)$ имеет место при совпадении углов прихода обеих помех в области боковых лепестков и сложении их мощностей с учетом наличия корреляционной составляющей.

Список используемых источников

1. Лукьянчиков А.И., Гарманов С.С., Моисеев А.П. Обзор методов пространственной фильтрации при помощи адаптивной антенной решётки в системах спутникового позиционирования // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 12. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/12/74815> (дата обращения: 11.01.2018).

2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.

3. Адаптивные антенные решетки: учеб. пособие: в 2 ч. / В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин и др.; под общ. ред. В.А. Григорьева. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – Ч.1. – 179 с.; ч.2. – 118 с.
4. Adaptive Antenna Systems / B. Widrow, P.E. Mantey, L.J. Griffiths, B.V. Goode // Proceedings of the IEEE. – 1967. – Vol. 55, № 12. – P. 2143–2159.
5. *Пименов В.Ф., Попов А.С.* Исследование эффективности оптимальной пространственной селекции помех в линейной антенной решетке по критерию минимума среднеквадратического отклонения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – Вып. 666. – С. 77–83.
6. *Пистолькорс А.А., Литвинов О.С.* Введение в теорию адаптивных антенн. – М.: Наука, 1991. – 200 с.

А.В. Алексеев;
 Э.А. Рагимов,
 кандидат физико-математических наук

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКОГО ПОЛИНОМА ПРИ СОЗДАНИИ КАРТ ПЛАСТИКИ РЕЛЬЕФА

Для определения точек перегиба горизонталей, необходимых для построения линий нулевой кривизны, может применяться скользящая аппроксимация исходных данных алгебраическим полиномом второй степени. В публикации обосновывается выбор оптимального числа исходных данных, который необходимо использовать при построении такого алгебраического полинома.

Ключевые слова: карты, полином, навигация, аппроксимация, рельеф.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач топогеодезического и навигационного обеспечения войск и систем вооружений создаются различные специальные карты. В настоящее время большая потребность возникает в картах пластики рельефа. На этих картах с помощью линий нулевой кривизны горизонталей, которые также называют морфоизографами, плоское изображение рельефа заменяется объемным. Морфоизограф разделяет выпуклости от вогнутостей. Таким образом, рельеф отображается не в виде «застывшей» поверхности, как на классической топографической карте, а в виде структур, характеризующих пространственное распределение потоков вещества и энергии.

В некоторых методиках создания таких специальных карт точки, описывающие форму горизонталей, аппроксимируют скользящим алгебраическим полиномом 2-й степени [1]. В данной статье обосновывается выбор оптимального числа исходных данных, который необходимо использовать при построении алгебраического полинома для правильного определения точек перегиба горизонталей.

ОБОСНОВАНИЕ ЧИСЛА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКОГО ПОЛИНОМА

Для решения сформулированной задачи применим спектральный метод. Пусть на вход низкочастотного (сглаживающего) фильтра подается функция комплексной переменной, характеризующая форму исследуемой горизонтали, следующего вида:

$$e^{j\omega x} = \cos \omega x + j \sin \omega x, \quad (1)$$

где $j = \sqrt{-1}$;

ω – круговая частота, нормированная к интервалу Найквиста, $\omega = 2\pi f$ (f – нормированная циклическая частота);

x – координата точки на горизонтали.

На выходе фильтра будет получена та же самая функция, только умноженная на частотную характеристику выполняемого преобразования (передаточную функцию) $\Phi(\omega)$. Вид функции $\Phi(\omega)$ в рассматриваемой задаче будет определяться числом m точек, с использо-

ванием которых выполняется аппроксимация дискретно заданных координат горизонтали. При $m = 5$ передаточная функция будет [3] иметь следующий вид:

$$\Phi(\omega) = \frac{17 - 6 \cos 2\omega + 24 \cos \omega}{35}. \quad (2)$$

Если увеличить число одновременно обрабатываемых точек горизонтали до $m = 7$, то после выполнения несложных преобразований, аналогичных [3], определится передаточная функция вида

$$\Phi(\omega) = \frac{7 - 4 \cos 3\omega + 6 \cos 2\omega + 12 \cos \omega}{21}. \quad (3)$$

Наконец, при $m = 9$ можно получить следующее уравнение передаточной функции:

$$\Phi(\omega) = \frac{59 - 42 \cos 4\omega + 28 \cos 3\omega + 78 \cos 2\omega + 108 \cos \omega}{231}. \quad (4)$$

Графики уравнений (2)–(4), построенные с использованием математического пакета MathCad, представлены на рис. 1. Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. С увеличением числа исходных данных, используемых для выполнения аппроксимации полиномом 2-й степени, будет увеличиваться степень сглаживания заданных координат y_i . Так, при аппроксимации по семи точкам составляющие исходного сигнала с длиной волны $\lambda = 5\Delta x$ (Δx – расстояние между смежными точками оцифрованной горизонтали) будут подавляться практически полностью. При аппроксимации на локальном участке по девяти точкам будут в значительной мере подавляться составляющие спектра исходных данных с длинами волн $\lambda = 7\Delta x$. Это, очевидно, приведет к тому, что при математической обработке будут утрачены отдельные точки, характеризующие перегибы исследуемой горизонтали, прежде всего на участках со сложными формами горизонталей.

При аппроксимации исходных данных по пяти точкам будут подавляться составляющие спектра с длинами волн вблизи $\lambda = 3\Delta x$, т.е. вероятность того, что будут сглажены отдельные высокочастотные колебания горизонтали, становится очень малой. При применении аппроксимации по трем точкам процедура сглаживания исходных данных будет вообще отсутствовать. Изложенное выше позволяет заключить, что наиболее предпочтительным вариантом определения точек перегиба исследуемой горизонтали является скользящая аппроксимация исходных координат y_i по трем или пяти точкам.

2. Известно [2, 3], что дискретизация любой непрерывной функции (в том числе и характеризующей рельеф) на равномерных интервалах Δx неизбежно приведет к трансформации высоких частот $f > \frac{1}{2 \cdot \Delta x}$, присутствующих в сигнале, в более низкие частоты с

$f < \frac{1}{2 \cdot \Delta x}$, т.е. к искажению спектра исходных данных. Для исключения таких искажений следует подавить высокочастотные колебания функции y (с частотой $f > \frac{1}{2 \cdot \Delta x}$).

Для решения этой задачи, как следует из графиков, показанных на рис. 1, уже удобно применить скользящую аппроксимацию по пяти и более точкам. При этом с увеличением числа точек, участвующих в аппроксимации, всё более надежно будут подавляться высокочастотные колебания спектра исходных данных. С этой точки зрения следует отказаться от применения скользящей аппроксимации по трем точкам и использовать для решения задачи пятиточечную аппроксимацию.

Следует также учитывать, что аппроксимация алгебраическим полиномом 2-й степени обеспечивает не только вычисление параметров, необходимых для установления точек перегиба исследуемой горизонтали, но и ослабление высокочастотных случайных погрешностей определения координат y_i при оцифровке горизонтали. Значит, при применении трехточечной схемы аппроксимации будут пропускаться все ошибки исходных данных. При аппроксимации координат y_i по пятиточечной схеме, как видно из анализа графиков, изображенных на рис. 1, практически все высокочастотные погрешности исходных данных будут подавляться. Принимая во внимание сказанное, следует рекомендовать аппроксимацию координат точек на локальном участке горизонтали по пяти исходным точкам.

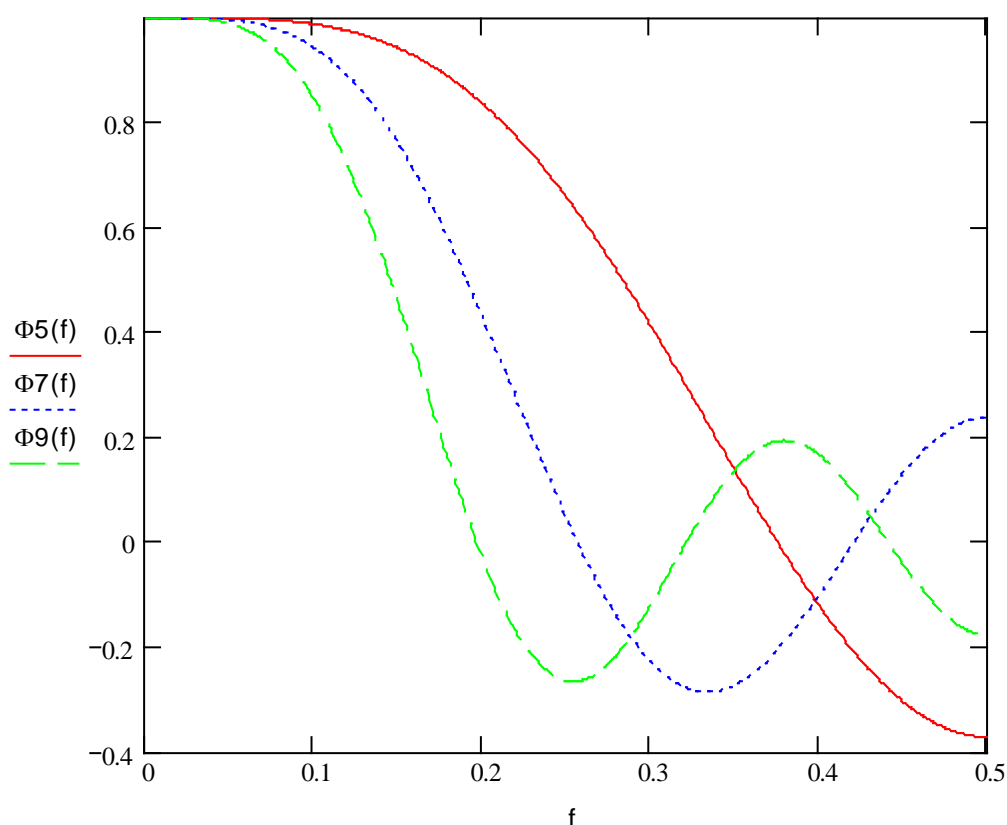


Рис. 1. Графики передаточных функций (f -нормированная к интервалу Найквиста циклическая частота)

Сделанные выводы проверялись при оценке точек перегиба горизонтали, показанной на рис. 2. Координаты точек на ней определялись через 20 м. Всего на горизонтали было оцифровано 63 точки. После обработки исходных данных методом скользящей аппроксимации полиномом второй степени по пятиточечной схеме были выявлены 14 точек перегиба, показанные на рис. 2 черным цветом. Их расположение позволяет заключить, что в процессе математической обработки были определены наиболее характерные, но не все существующие на горизонтали точки перегиба (пропущенные точки показаны на рис. 2 белым цветом).

Вместе с тем на рисунке хорошо видно, что пропущенные точки как раз и характеризуют высокочастотную составляющую спектра формы горизонтали. Как следует из анализа графика (рис. 1), в процессе вычислений были подавлены составляющие исходных данных с длинами волн $\lambda < 60$ м, т.е. полином второй степени обеспечил сглаживание исходных данных.

Теперь попробуем установить точки перегиба исследуемой горизонтали по результатам обработки исходного массива данных скользящим полиномом второй степени, коэффициенты которого вычисляются не по пяти, а только по трем оцифрованным точкам. Результаты подобных вычислений показаны на рис. 2 черным и белым цветом.

Их анализ позволяет сделать вывод о том, что в процессе математической обработки были выявлены практически все точки перегиба исследуемой горизонтали, как характерные, так и не интересные для решения целевой задачи.

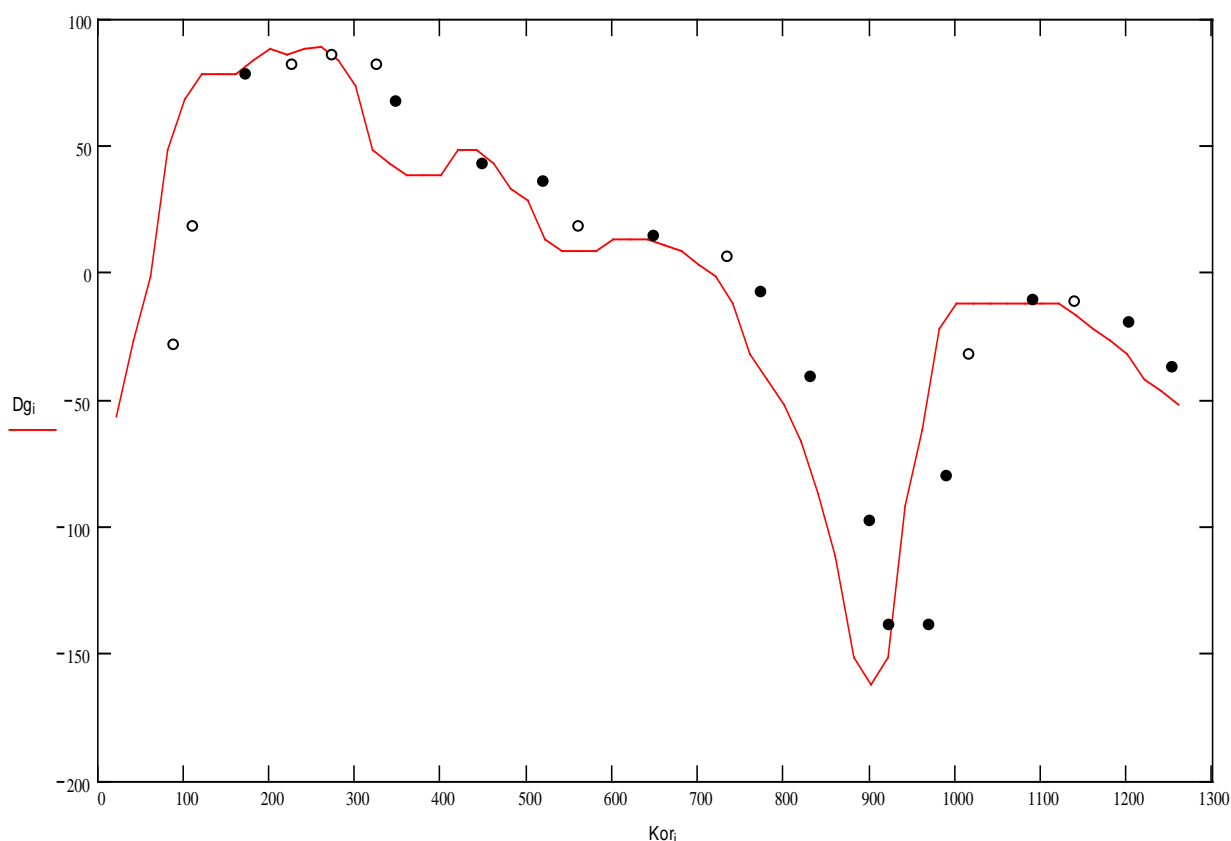


Рис. 2. Точки перегиба горизонтали при использовании трех- и пятиточечной аппроксимации исходных данных полиномом второй степени

Отдельно следует подчеркнуть, что примененный подход не решил задачу подавления высокочастотных случайных погрешностей оцифровки горизонтали, которые, по всей видимости, имеют место.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют заключить, что применение к исходным данным пятиточечной скользящей аппроксимации полиномом второй степени является наиболее целесообразным и обеспечивает надежное выявление всех основных точек перегиба горизонтали.

Следует обратить внимание и на следующее обстоятельство. Подбирая число исходных данных для скользящей полиномиальной аппроксимации, можно регулировать детальность информации на создаваемой карте пластики рельефа. Если потребителю необходима обзорная карта, характеризующая только общую структуру морфоизограмм, то сглаживание ис-

ходных данных можно выполнять методом скользящей аппроксимации по семи или девяти исходным точкам. Если же поставлена задача создать возможно более подробную карту морфоизограмм, то следует выполнять аппроксимацию исходных данных по пяти, а в некоторых случаях и по трем, последовательно расположенным точкам.

Список используемых источников

1. *Алексеев А.В.* Применение алгебраических полиномов в алгоритмах автоматизированной обработки информации о рельефе // *Информация и Космос.* – 2016. – № 4. – С. 152–154.
2. *Марпл-мл. С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 545 с.
3. *Хемминг Р.В.* Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1987. – 220 с.

В.Ф. Алексеев,
доктор техн. наук, профессор;
В.Ю. Андриевская,
кандидат физико-математических наук, доцент

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ДИСКРЕТНОСТИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ГЕОПОТЕНЦИАЛА

В публикации рассматривается методика априорной оценки допустимой детальности гравиметрической съемки, которую планируется использовать для определения вторых производных геопотенциала. Предлагаются уравнения, позволяющие оценить величину средней квадратической ошибки вторых производных геопотенциала в зависимости от сложности гравитационного поля и дискретности исходных значений аномалий силы тяжести.

Ключевые слова: геопотенциал, гравиметрия, точность, функция, гравитационное поле Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Определение значений вторых производных геопотенциала в точках земной поверхности выполняется гравитационными вариометрами или градиентометрами. Применение таких приборов предусматривает достаточно сложную и длительную методику полевых измерений. Однако решить данную задачу можно и альтернативным способом, обработав результаты детальной съемки с использованием высокоточных гравиметров. При таком подходе важно оценить детальность гравиметрической съемки, которая должна правильно отображать спектральную структуру гравитационного поля Земли в исследуемом районе, а точность съемки – обеспечивать трансформацию измерительной информации в составляющие тензора вторых производных геопотенциала с допустимой средней квадратической погрешностью. Один из вариантов решения первой задачи предлагается в настоящей статье.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ АПРИОРНОЙ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМОЙ ДИСКРЕТНОСТИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пусть в исследуемом районе известна функция аномалий силы тяжести (АСТ) $\Delta g(x, y)$, применение к которой прямого преобразования Фурье позволяет получить спектр $S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)$, где (ω_x, ω_y) – круговые частоты. Для преобразования этого спектра в спектр, например, второй вертикальной производной возмущающего геопотенциала $S_{T_{zz}}(\omega_x, \omega_y)$ необходимо умножить исходную функцию на частотную характеристику выполняемой трансформации, т.е.

$$S_{T_{zz}}(\omega_x, \omega_y) = (\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2} \cdot S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y). \quad (1)$$

В результате выполнения гравиметрической съемки вместо исходной функции $\Delta g(x, y)$ будут получены только ее значения в узлах регулярной сетки с дискретностью $\Delta x \times \Delta y$, т.е. будет определена функция $\Delta g^{\text{спл}}(x, y)$. Спектр этой функции можно получить, умножив $S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)$ на частотную характеристику оператора сглаживания вида [1]:

$$\Pi^{\text{cpl}}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin \frac{\Delta x \cdot \omega_x}{2}}{\frac{\Delta x \cdot \omega_x}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{\Delta y \cdot \omega_y}{2}}{\frac{\Delta y \cdot \omega_y}{2}}. \quad (2)$$

Следовательно, спектр Фурье функции $T_{zz}^{\text{cpl}}(x, y)$ будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} S_{T_{zz}}^{\text{cpl}}(\omega_x, \omega_y) &= S_{T_{zz}}(\omega_x, \omega_y) \cdot \Pi^{\text{cpl}}(\omega_x, \omega_y) = \\ &= (\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2} \cdot S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y) \Pi^{\text{cpl}}(\omega_x, \omega_y). \end{aligned} \quad (3)$$

Теперь спектр ошибок оцениваемой функции второй вертикальной производной возмущающего геопотенциала за счет сглаживания исходной $\Delta g(x, y)$ по площадкам $\Delta x \times \Delta y$ можно найти из уравнения

$$\begin{aligned} S_{T_{zz}}^{\delta}(\omega_x, \omega_y) &= S_{T_{zz}}(\omega_x, \omega_y) - S_{T_{zz}}^{\text{cpl}}(\omega_x, \omega_y) = \\ &= (\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2} \cdot S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y) [1 - \Pi^{\text{cpl}}(\omega_x, \omega_y)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Умножение функции (4) на комплексно сопряженную позволит найти функцию спектральной плотности мощности (СПМ) и, следовательно, вычислить среднюю квадратическую ошибку определяемой функции $T_{zz}^{\text{cpl}}(x, y)$:

$$m_{T_{zz}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_{T_{zz}}^{\delta}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y. \quad (5)$$

Здесь $m_{T_{zz}}$ – средняя квадратическая ошибка определяемой функции второй вертикальной производной возмущающего геопотенциала $T_{zz}(x, y)$;

$|S_{T_{zz}}^{\delta}(\omega_x, \omega_y)|^2$ – функция СПМ, $|S_{T_{zz}}^{\delta}(\omega_x, \omega_y)|^2 = S_{T_{zz}}^{\delta}(\omega_x, \omega_y) \cdot S_{T_{zz}}^{\delta*}(\omega_x, \omega_y)$, где символом * обозначено комплексное сопряжение.

Учитывая четность подынтегральной функции, уравнение (5) будет иметь вид

$$m_{T_{zz}}^2 = 4 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (\omega_x^2 + \omega_y^2) |1 - \Pi^{\text{cpl}}(\omega_x, \omega_y)|^2 |S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y, \quad (6)$$

где функция СПМ точного поля АСТ $|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2$ определяется по формуле

$$|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 = S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y) \cdot S_{\Delta g}^*(\omega_x, \omega_y).$$

Функцию $|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2$ в уравнении (6), которая характеризует СПМ исходного поля АСТ, можно задать с помощью, например, модели Jordan [2, 3]:

$$|S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y)|^2 = \frac{15 D_{\Delta g} (\omega_x^2 + \omega_y^2)}{4\pi \mu^3 [\mu^{-2} + (\omega_x^2 + \omega_y^2)]^{7/2}}. \quad (7)$$

где $D_{\Delta g}$ – дисперсия функции $\Delta g(x, y)$;

μ – параметр, связанный с радиусом корреляции $R_{\Delta g}$ исходного поля АСТ соотношением $\mu = \frac{R_{\Delta g}}{1,361}$ [2].

Методика применения уравнения (6) состоит в следующем:

– с использованием априорной информации о гравитационном поле в исследуемом районе (цифровых моделей АСТ, гравиметрических карт и др.) определяются значения дисперсии $D_{\Delta g}$ и радиуса корреляции $R_{\Delta g}$ аномалий силы тяжести;

– задаются допустимые значения средней квадратической ошибки $m_{T_{zz}}$, а затем итерациями подбираются наибольшие Δx и Δy , при которых $m_{T_{zz}}$ не превысят установленных величин.

Предложенный подход был применен для оценки допустимой дискретности гравиметрической съемки при восстановлении функции второй вертикальной производной возмущающего геопотенциала со средней квадратической погрешностью, не превышающей 0,5–1 ЭТВ.

Результаты вычислений по (6) показывают, что даже в районах, гравитационное поле которых характеризуется $D_{\Delta g} \leq 200 \text{ мГал}^2$ и $R_{\Delta g} = 20 - 40 \text{ км}$, шаг дискретизации гравиметрической съемки должен составлять 0,1 – 0,6 км.

Такие оценки хорошо согласуются с результатами, полученными при прогнозировании средних квадратических погрешностей за счет сглаживания исходных данных для других составляющих тензора вторых производных геопотенциала, например для горизонтального градиента аномалии силы тяжести T_{xz} , средняя квадратическая погрешность которого вычислялась по формуле

$$m_{T_{xz}}^2 = 4 \int_0^\infty \int_0^\infty \omega_x^2 \left| 1 - \Pi^{\text{сгл}}(\omega_x, \omega_y) \right|^2 \left| S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y) \right|^2 d\omega_x d\omega_y. \quad (8)$$

Рассматриваемая задача может быть решена с использованием альтернативного подхода. Идея его заключается в том, что дисперсия ошибки за счет сглаживания исходной функции может быть рассчитана как разность дисперсий полного и сглаженного сигналов [1], т.е. применительно ко второй вертикальной производной возмущающего геопотенциала – по формуле

$$\begin{aligned} m_{T_{zz}}^2 &= D_{T_{zz}} - D_{T_{zz}}^{\text{сгл}} = \\ &= 4 \int_0^\infty \int_0^\infty (\omega_x^2 + \omega_y^2) \left| S_{\Delta g}(\omega_x, \omega_y) \right|^2 \left[1 - \left| \Pi^{\text{сгл}}(\omega_x, \omega_y) \right|^2 \right] d\omega_x d\omega_y. \end{aligned} \quad (9)$$

Сравнение результатов реализации уравнений (6) и (9) показывает, что различия вычисленных значений $m_{T_{zz}}$ не превышает 10–15%. Такие расхождения можно считать не принципиальными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные оценки показывают, что определение вторых производных геопотенциала, даже в слабоаномальных в гравиметрическом отношении районах, всё равно приведет к значительному объему полевых работ, связанных с производством детальной гравиметрической съемки. Учитывая большой объем полевых измерений, следует отказаться от проведения площадной гравиметрической съемки и значения вторых производных геопотенциала вычислять по материалам математической обработки профильных измерений, детальность которых должна составлять порядка 0,2–0,5 км.

Список используемых источников

1. Точностные вопросы вычисления уклонений отвеса по сглаженным аномалиям силы тяжести / Л.П. Пеллинен, Ю.М. Нейман, С.В. Лебедев, А.А. Дронин // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1980. – № 5. – С. 38–44.
2. *Левицкая З.Н.* Статистические модели аномальных характеристик гравитационного поля Земли // Гравиметрические исследования на море. – М.: МГУ, 1988. – С. 26–46.
3. *Jordan S.K.* Self-consistent statistical models for the gravity anomaly, vertical deflections, and undulations of the geoid // J. Geophys. Res. – 1972. – Vol. 77, № 20. – P. 3660–3670.

В.С. Ивановский*,
доктор техн. наук, профессор;
В.С. Игнатчик**,
доктор техн. наук, профессор;
С.Ю. Игнатчик***,
доктор техн. наук, профессор;
Н.В. Кузнецова****,
кандидат техн. наук;
С.В. Саркисов**,
доктор техн. наук, доцент;
М.А. Сеньюкович**;
Б.М. Усвяцов*****,
кандидат военных наук, профессор
* ВИТ «ЭРА» МО РФ, г. Анапа
** ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулёва, г. Санкт-Петербург
*** СПб ГАСУ
**** ООО «Ассоциация ученых и инженеров по водоснабжению и водоотведению», г. Санкт-Петербург
***** Администрация СПб

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОТВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В соответствии с нормативными документами расчет сетей отведения атмосферных осадков с урбанизированных территорий осуществляется методом «предельных интенсивностей», объединяющим в себе две части: метеорологическую и гидравлическую. В статье проанализировано состояние предметной области каждой из них.

Экспериментально обоснована необходимость внедрения нового ускоренного метода актуализации климатических параметров, позволяющего решать задачу на основании данных за период от 5 лет.

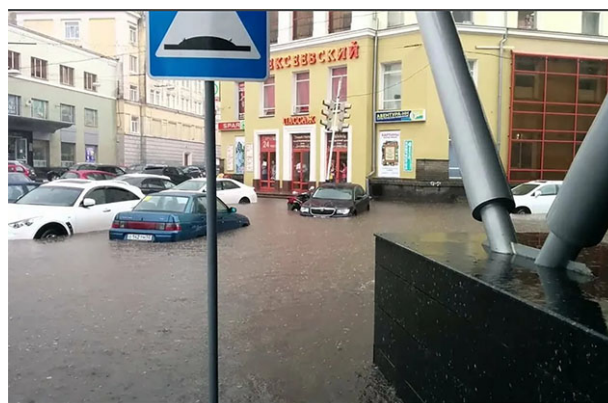
Обоснована необходимость в разработке универсального метода гидравлического расчета сетей водоотведения поверхностного стока, работающего в условиях неравномерного нарастания площадей стока, при различных вариантах формулировок расчетных интенсивностей дождей и позволяющего определять расходы изменяющиеся во времени.

Ключевые слова: системы отведения поверхностного стока, метод «предельных интенсивностей», климатические параметры, подтопление урбанизированных территорий, гидравлический расчет.

ВВЕДЕНИЕ

Для предотвращения подтоплений населенных мест поверхностными сточными водами, образующимися в том числе и в результате выпадения дождей, создаются системы водоотведения поверхностного стока. Конструктивно они могут быть выполнены по-разному. Например, в Санкт-Петербурге эксплуатируются в основном общесплавные системы, предназначенные для одновременного отведения хозяйственно-бытовых, поверхностных и производственных сточных вод. В Москве системы водоотведения выполнены отдельными, и поверхностный сток отводится отдельной системой.

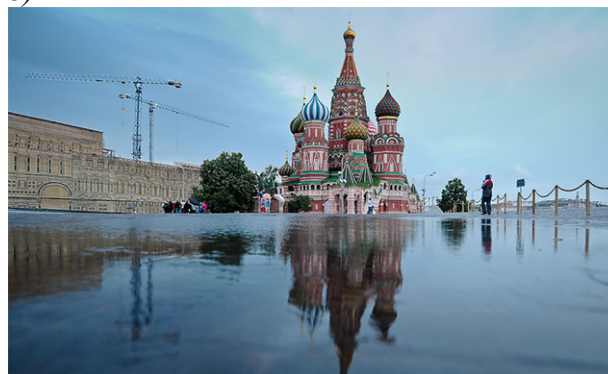
Характерной особенностью эксплуатации систем водоотведения поверхностного стока в последнее десятилетие является увеличившееся количество случаев подтоплений урбанизированных территорий [1, 2]. Причиной возникновения подтоплений является то, что пропускная способность систем водоотведения оказывается меньше притока поверхностного стока. В результате вода поднимается на поверхность, затапливает улицы и подвалы (рис. 1). В Санкт-Петербурге имеется 18 потенциальных зон подтоплений [1], проявляющихся не одновременно. В Москве таких зон значительно больше. Например, по данным ГУП «Мосводосток», 27 июня 2015 года в столице одновременно были зафиксированы 116 подтоплений [3].



а)



б)



в)

г)

*Рис. 1. Подтопляемые территории:
а – Санкт-Петербург; б – Нижний Новгород; в – Ростов-на-Дону; г – Москва*

Причин, по которым происходят такие явления, довольно много, и их можно разделить на две группы. К первой группе (организационно-производственной) можно отнести ошибки проектирования, несвоевременность прочистки сетей и устранения аварий, уплотнительную застройку, увеличивающую площади благоустроенных территорий и др. Ко второй группе (нормативно-методической) относятся ошибки, вызванные несовершенством нормативно-методической базы, с применением которой обосновываются проектные решения. Настоящая статья посвящена анализу второй группы причин. Ее целью является обоснование мероприятий, направленных на повышение эффективности систем отведения поверхностного стока урбанизированных территорий путем совершенствования метода их расчета.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В действующем нормативном документе СП 32.13330.2018 [4] для гидравлического расчета систем водоотведения поверхностного стока применена методика, реализующая способ «пределных интенсивностей». Эта методика предложена около века назад профессором П.Ф. Горбачевым и базируется на «Теории ливней» [5]. В существующем методе реализован замысел увязки гидравлической составляющей с метеорологической. Необходимость объединения указанных подходов следовала из того, что при расчете систем водоотведения поверхностного стока точный гидравлический расчет, основывающийся на грубых метеорологических допущениях, терял значение так же, как и точный учет климатической стороны вопроса, при котором полностью игнорировались законы гидравлики. Поэтому подходы были объединены в методе «пределных интенсивностей». Суммарным параметром яв-

ляется продолжительность t , которая характеризует, с одной стороны, время, в течение которого вода движется по трубам к расчетному участку, а с другой стороны, продолжительность выпадения осадков. С этой точки зрения суть метода заключается в том, что вычисление расхода дождевого стока производится по возможным наиболее неблагоприятным «предельным интенсивностям», соответствующим продолжительности протекания дождевого потока через весь участок стока и выражаемым из отношения интенсивностей и продолжительностей в следующей функции силы дождя:

$$\Delta = i_1 \sqrt{t_1} = i_2 \sqrt{t_2} = \dots = i_n \sqrt{t_n}, \quad (1)$$

где i – напряженность (интенсивность) дождей, мм/мин;
 t – продолжительность выпадения дождевых осадков, мин;
 Δ – сила дождя.

Имеется два направления совершенствования актуального способа гидравлического расчета систем водоотведения поверхностного стока. Первое направление связано с совершенствованием его метеорологической составляющей, а второе – с совершенствованием гидравлической составляющей. Каждое из направлений заслуживает отдельного рассмотрения.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА

Необходимость совершенствования метеорологической части заключается в том, что отличительным признаком данного периода являются устаревшие климатические параметры расчетных дождей, которые в действующий свод правил СП 32.13330.2018 [4] практически без актуализации перенесены из строительных норм и правил СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения», утвержденного 35 лет назад. В результате, в том числе и по причине увеличившихся интенсивностей и количества сверхрасчетных дождей, в городах России увеличилось количество локальных подтоплений [1, 2]. Такое положение не является случайным, так как после ликвидации Ленинградского института Академии коммунального хозяйства, разработавшего основы теории в данном направлении, в России по существу нет научно-исследовательской организации, способной выполнить актуализацию климатических параметров в масштабах всей страны. Об этом свидетельствуют результаты разработки сводов правил 2012 и 2018 годов.

Поэтому для предотвращения случаев подтопления урбанистических территорий в будущем возникает необходимость актуализации разделов нормативных документов для общесплавных сетей и систем водоотведения поверхностного стока на региональных уровнях с учетом местных метеорологических параметров:

1. Такая возможность утверждена в актуальной редакции СП 32.13330.2018 [4], где в п. 7.4.2 указано, что климатические параметры и зависимости между ними определяются по результатам обработки многолетних записей самопишущих дождемеров местных метеорологических станций или по данным территориальных управлений Гидрометеослужбы. В этом же разделе правил предусмотрено, что метеорологической информацией из данного документа разрешается пользоваться при отсутствии таких обработанных данных.

2. Такая возможность утверждена в актуальных законах Российской Федерации, постановлениях правительства РФ, приказах министерств и ведомств, в соответствии с которыми с начала XXI века управление развитием коммунальной инфраструктуры осуществляется на уровне субъектов Российской Федерации [6]. С давних времен, до разработки в Советском Союзе общих строительных нормативных документов, так и было. Например, в Ленинграде климатические данные для разработки проектов систем водоотведения поверхностного стока утверждала Городская исполнительная комиссия. Затем их разработкой занимался Ленинградский институт Академии коммунального хозяйства [10].

Однако до настоящего времени актуализацию климатических параметров сдерживала одна нерешенная проблема – требование СП 32.13330.2018 [4] по применению в качестве исходных данных результатов обработки многолетних записей не может быть осуществлено в каждом регионе из-за отсутствия самопишущих (с интервалом не более 5 мин) дождемеров местных метеорологических станций или по причине небольшого объема накопленной базы данных. Принято считать [4, 10, 11, 18], что продолжительность накопительного периода исходных данных должна быть не менее 20 лет. Например, в Санкт-Петербурге до недавнего времени функционировал только один осадкомер, при помощи которого выполнялись многолетние наблюдения (с 1960-х годов). Но данный прибор не самопишущий, и интервал наблюдений составляет 3 ч. Аналогичная ситуация сложилась во многих регионах страны.

Поэтому в Санкт-Петербурге разработан [6] ускоренный метод, позволяющий сократить до 5 лет период накопления исходной информации для актуализации климатических параметров. Его суть заключается в том, что для сбора информации используются данные сети осадкомеров, расположенных в разных точках климатической зоны. Например, в Санкт-Петербурге установлен комплекс автоматических самопишущих осадкомеров Росгидромета, накапливающих информацию в 34 точках города с интервалом 5 мин. Экспериментально установлено, что выявленные закономерности выпадения осадков за 5 лет не противоречат «Теории ливней», но, в отличие от данных, собранных с одного дождемера, более точно и полно показывают особенности неравномерного распределения атмосферных осадков по территории мегаполиса. Для подтверждения таких выводов на рис. 2 приведены результаты сравнения различных методов оценки сил дождей в зависимости от периода p повторяемости дождей, под которым понимается число лет, в течение которых сила дождя может быть превышена не более одного раза. То есть, если $p = 10$ годам, то это значит, что расчетный дождь должен быть такой силы, которая произойдет в расчетной местности один раз в 10 лет. В частности, на рис. 2 позицией 3 показаны результаты аппроксимации данных Н.Н. Белова по следующей зависимости:

$$\Delta = \mu \sqrt[3]{p}, \quad (2)$$

где μ – климатическая постоянная местности, характеризующая совокупность местных физико-географических особенностей.

Из анализа рис. 2 также следует, что выявленные закономерности выпадения осадков за 30 лет на основании записей, зафиксированных в Санкт-Петербурге (с 1897 по 1928 год) самопишущим дождемером в одной точке и базы данных Росгидромета за 5 лет (с 2015 по 2020 год), зафиксированных при помощи комплекса самопишущих осадкомеров с интервалом 5 мин при $p \leq 10$ не имеют существенных отличий. В то же время в промежутке повторяемости ливней $p > 10$ лет достоверность многолетних данных с одной точки меньше достоверности данных, полученных за пятилетний интервал времени с помощью 34 самопишущих осадкомеров за счет менее представительной выборки данных.

Для реализации разработанного метода на практике необходимо экспериментально обосновать зависимость силы дождя Δ от климатических параметров и периода p однократного превышения расчетной интенсивности дождя. Формула (1) является частным ее случаем, она, как показано на рис. 2, имеет невысокую точность при $p > 5$. В нормативных документах [4], по которым осуществлялось и осуществляется проектирование сетей водоотведения поверхностного стока, сила дождя Δ обозначена как параметр A без объяснения физического его смысла, $A = \Delta$ при $p = 1$. При этом в соответствии с СП 32.13330.2018 [4]

$$A = q_{20} 20^n \left(1 + \frac{\lg p}{\lg m_r}\right)^n, \quad (3)$$

где q_{20} – интенсивность дождя для рассматриваемой местности продолжительностью 20 мин при периоде однократного превышения расчетной интенсивности дождя

$P = 1$ год. Многие специалисты считают, что этот параметр является расчетной интенсивностью дождя, не смотря на то, что это всего лишь параметр, с применением которого (в сочетании с другими параметрами) определяется расчетная интенсивность;

m_r – среднее количество дождей за год;

n, γ – климатические параметры.

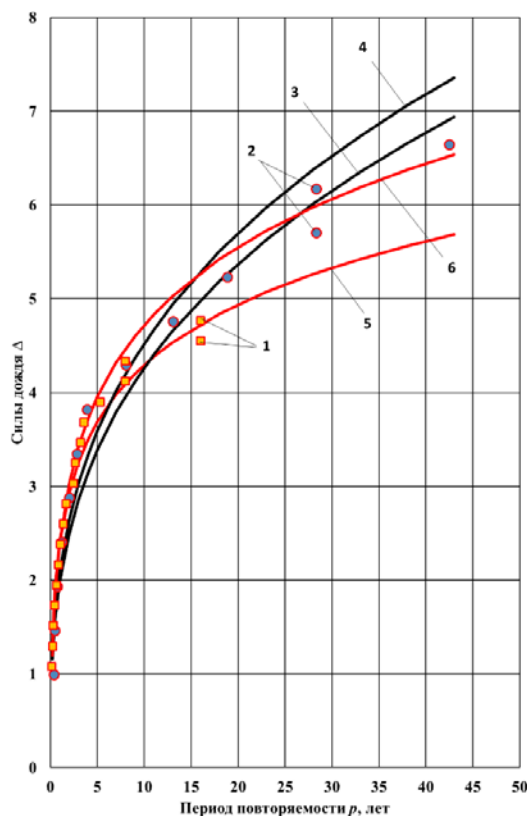


Рис. 2. Результаты сравнения различных методов оценки климатических зависимостей и их параметров [6]:

1 – данные Н.Н. Белова (полученные по самопишущему осадкомеру) в одной точке за период с 1897 по 1928 год; 2 – усредненные данные в 34 точках за период с 2015 по 2020 год; 3 – результаты аппроксимации данных Н.Н. Белова по зависимости (1); 4 – результаты аппроксимации данных в 34 точках; 5 – результаты аппроксимации данных Н.Н. Белова по логарифмической зависимости; 6 – результаты аппроксимации данных в 34 точках

Степень значимости каждого параметра при определении A проиллюстрирована на рис. 3, где $A_1 = q_{20} 20^n$. Таким образом, математическая интерпретация актуализации климатических параметров сводится к решению двух задач:

1) определения вида зависимости силы дождя Δ от параметров q_{20} , m_r , n , γ и их значений для каждой местности;

2) определения пределов изменений аргумента p в зависимости от значимости участков сети в бассейне водоотведения.

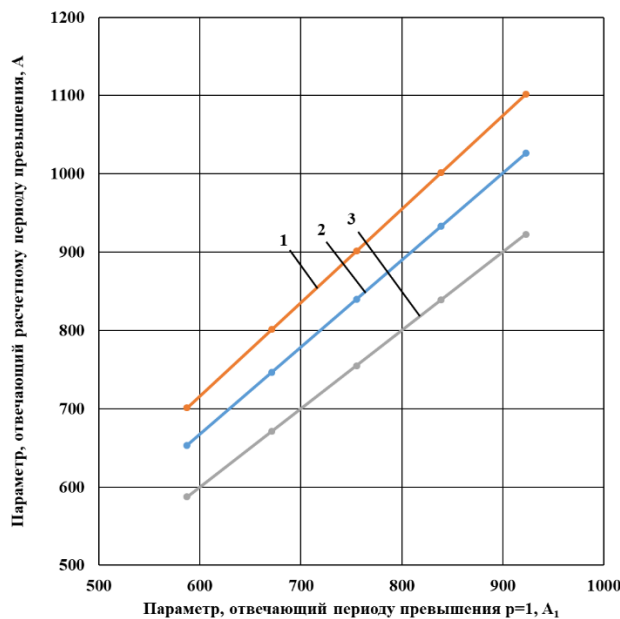


Рис. 3. Зависимость параметра, отвечающего расчетному периоду превышения, от параметра, отвечающего периоду превышения $p = 1$, и периода превышения при $1 - p = 2$ года; $2 - p = 1,5$ года; $3 - p = 1$ год

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА

Необходимость совершенствования гидравлической составляющей метода предельных интенсивностей заключается в том, что, несмотря на известность и широкое применение его на практике, у метода есть ряд недостатков.

Первый недостаток заключается в том, что метод имеет ограниченную область применения, поскольку некоторые авторы [7–9] доказали, что он справедлив лишь при выполнении трех условий [9]:

- 1) площади стока вблизи участков коллектора пропорциональны длинам этих участков;
- 2) величины продолжительности протока по каждому участку соразмерны длине участков или, что то же самое, скорости течения воды одинаковы на всех участках коллектора;
- 3) характер поверхности земли не меняется, т.е. коэффициент стока остается неизменным.

Однако, несмотря на очевидные ограничения метода «предельных интенсивностей», результаты количественной оценки погрешностей этого метода в технической литературе отсутствуют. По этой причине профессором А.М. Кургановым был проведен анализ степени влияния на результаты гидравлического расчета первого и третьего условий [9]. Отдельные результаты анализа на примере сети, состоящей из 11 участков, приведены на рис. 4.

Из него следует, что при времени выпадения осадков T_d , меньшем продолжительности добега стока τ_c от наиболее удаленной точки до конечного сечения, при равномерном нарастании площадей максимальный приток при всех вариантах хода выпадения дождей достигается в момент времени окончания дождя, а при неравномерном нарастании — в разные периоды времени. Таким образом, наибольший расход достигается при максимальной напряженности дождя в первой трети выпадения осадков и может превышать в 1,7 раза тот же расход при равномерном увеличении площади поверхности, который определяется по методу «предельных интенсивностей».

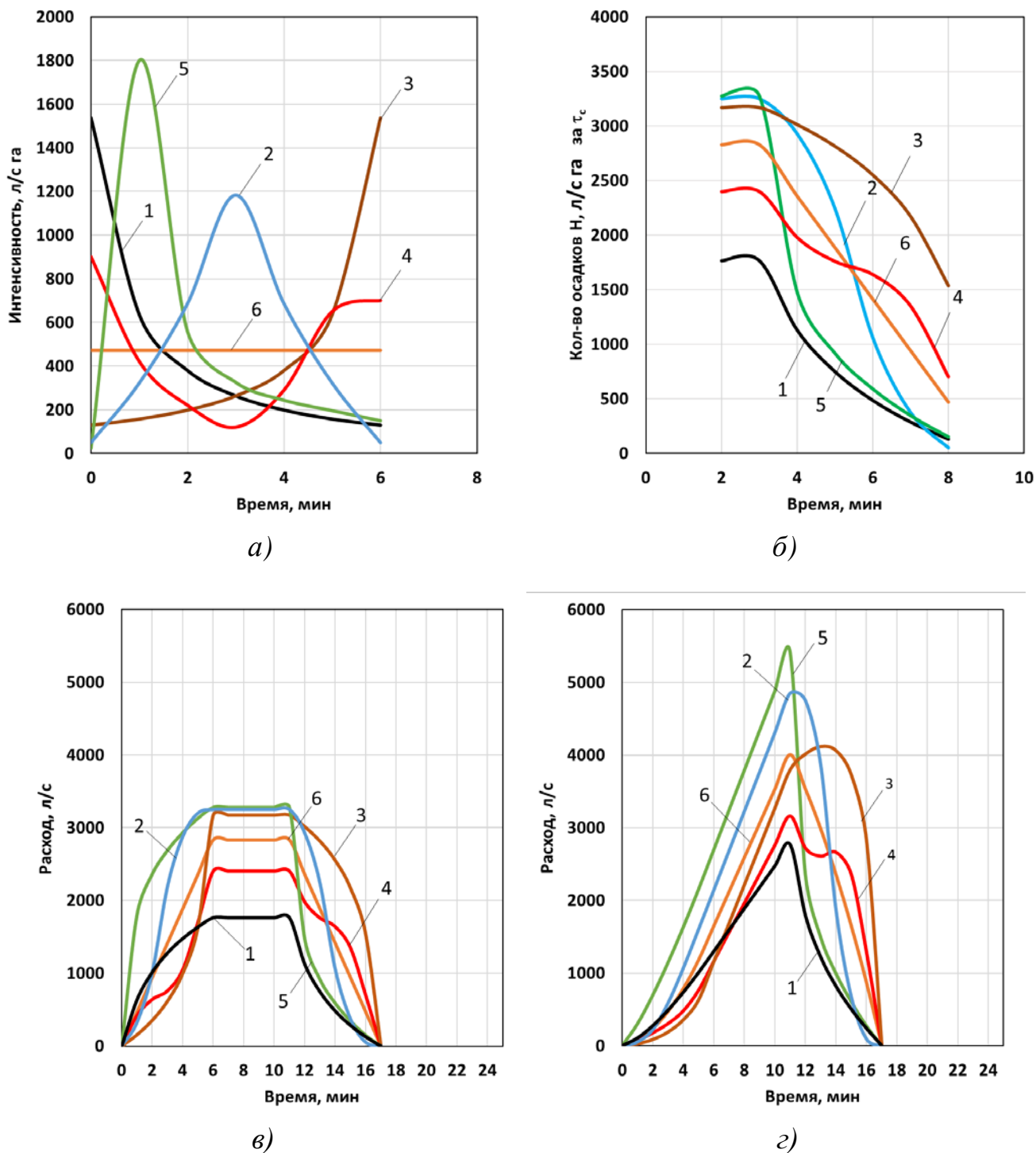


Рис. 4. Динамика изменения параметров стока и дождя

при времени выпадения дождя T_d меньше, чем продолжительность

добегания стока τ_c от наиболее удаленной точки до конечного сечения:

а – изменение интенсивности дождя $q = 166,7 \cdot i_t$; б – изменение количества осадков H за τ_c ;

в – изменение расхода Q в точке конечного сечения при равномерном нарастании площадей;

г – то же, при неравномерном нарастании площадей; 1 – ход выпадения дождя

с максимальной интенсивностью в начале выпадения осадков; 2 – то же, в середине;

3 – то же, в конце; 4 – то же, в начале и конце; 5 – то же, в первой трети; б – то же,

при равномерном выпадении осадков

Аналогично проанализированы варианты, когда время выпадения дождя T_d равно и больше продолжительности добега стока τ_c от наиболее удаленной точки до конечного сечения. В результате установлено, что применение существующего метода гидравлического расчета в рамках действующих сводов правил может приводить к занижению (от 1,2 до 1,7 раза) расчетных расходов стока. Поэтому подтопления расчетной местности возможны при дождях, напряженность которых не выше расчетных значений.

Второй недостаток заключается в том, что усложнена диагностика причин подтоплений, поскольку нормативный метод предельных интенсивностей не позволяет сформулировать требования к расчетным интенсивностям дождей для бассейнов водоотведения, при превышении которых должно происходить подтопление территорий. Его алгоритм предусматривает возможность вычисления расчетной интенсивности дождей только участков сетей. При этом каждому участку соответствует своя расчетная интенсивность дождя.

Третий недостаток заключается в том, что методом предельных интенсивностей возможно определить только максимальные значения расходов воды на участках сетей. Причем динамику изменения расхода во времени оценить невозможно. Это затрудняет выполнение расчетов по определению требуемых объемов регулирующих емкостей и проведение гидравлических расчетов сетей, к которым подключены такие емкости.

Таким образом, одной из задач, направленных на совершенствование систем отведения поверхностного стока урбанизированных территорий [12–18], является разработка универсального метода гидравлического расчета систем водоотведения поверхностного стока, работающего в условиях неравномерного увеличения площадей стока при различных вариантах формулировок расчетных интенсивностей дождей и позволяющего определять изменяющиеся во времени расходы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее десятилетие зафиксировано увеличившееся количество случаев подтоплений урбанизированных территорий в периоды ливневых дождей по причине недостаточной пропускной способности систем отведения поверхностного стока. В результате вода поднимается на поверхность, затопливает улицы и подвалы. Одной из причин таких явлений стало несовершенство нормативно-методической базы, с применением которой обосновываются проектные решения.

Для гидравлического расчета систем водоотведения поверхностных сточных вод до сих пор применяется метод «предельных интенсивностей», предложенный около века назад и объединивший в себе метеорологическую и гидравлическую составляющие.

Несовершенство метеорологической составляющей состоит в неактуальных на сегодняшний день климатических параметрах расчетных дождей, полученных в 1970-х годах, которые в действующий свод правил СП 32.13330.2018 практически без изменений перенесены из нормативных документов прошлого века. Суть проблемы заключается в том, что требование СП 32.13330.2018 по использованию в качестве исходных данных результатов обработки многолетних данных не может быть выполнено в каждом регионе из-за отсутствия самопишущих осадкомеров местных метеорологических станций или по причине незначительного объема накопленной базы данных.

Одним из направлений решения указанной проблемы является внедрение разработанного в Санкт-Петербурге ускоренного метода актуализации климатических параметров, позволяющего сократить с 20 до 5 лет период накопления исходной информации при одновременном повышении достоверности ее оценки.

Несовершенство гидравлической составляющей метода «предельных интенсивностей» состоит в ограничении области применения равномерного нарастания водосборных площадей по длине коллекторов. На практике это требование не соблюдается и приводит к занижению

расчетных расходов, приводящему к снижению в 1,2–1,7 раза пропускной способности сетей отведения поверхностного стока. Кроме того, для нормативного метода характерны усложненная диагностика причин подтоплений и невозможность оценивать динамику изменения расхода поверхностного стока во времени. По этим причинам одной из задач, направленных на совершенствование систем отведения поверхностного стока урбанизированных территорий, является разработка универсального метода гидравлического расчета сетей водоотведения поверхностных сточных вод, работающего в условиях неравномерного увеличения площадей стока при различном значении интенсивности дождей, принятой за расчетную и позволяющей определять изменяющиеся во времени расходы сточных вод.

Список используемых источников

1. *Серебрицкий И.А.* Опыт Санкт-Петербурга в вопросах управления адаптацией к изменениям климата и смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему // Экологический портал Санкт-Петербурга, 2020. – URL: <http://www.infoeco.ru/index.php?id=8780> (дата обращения: 05.10.2020).
2. *Павловский А.А.* О ливневых затоплениях некоторых территорий Санкт-Петербурга при современных изменениях климата // Общество. Среда. Развитие. – 2013. – Вып. 2. – С. 251–256.
3. Ливни вызвали в Москве более сотни подтоплений. – URL: <https://cont.ws/@news/96754> (дата обращения: 05.10.2020).
4. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/554820821> (дата обращения: 05.10.2020).
5. *Горбачев П.Ф.* Методы расчета ливневого стока. – М.: изд. и типограф изд-ва «Власть Советов» при Президиуме ВЦИК, 1937. – 156 с.
6. Обоснование метода оценки климатических параметров ливневых дождей по данным комплекса осадкомеров / С.Н. Волков, А.И. Житенев, Ю.А. Курганов и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 7. – С. 2–9.
7. *Сурин А.А.* Учет емкости сети при расчете дождевой канализации // Коммунальное дело. – 1930. – № 5. – С. 37–44.
8. *Надысев В.С.* Расчет дождевой и общесплавной канализации по методу «критических приливных площадей». – Л.: Типография №2 Управления издательств и полиграфии Ленгорисполкома, 1949. – 95 с.
9. *Курганов А.М.* Закономерности формирования и движения дождевых стоков в безнапорных трубопроводах: диссертация ... доктора технических наук. – Ленинград, 1980. – 433 с.
10. *Молоков М.В., Шигорин Г.Г.* Дождевая и общесплавная канализация. – М.: изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1954. – 332 с.
11. *Алексеев М.И., Курганов А.М.* Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий: учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2000.
12. Применение вероятностно-статистических методов при определении требуемой производительности узлов регулирования общесплавных систем водоотведения / Ф.В. Кармазинов, А.И. Житенев, И.П. Шунто и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 11. – С. 4–10.
13. Результаты экспериментального исследования неравномерностей поступления сточных вод / А.П. Гринёв, В.С. Игнатчик, В.С. Ивановский и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 649. – С. 153–158.
14. Результаты исследования напорных режимов канализационных коллекторов / С.Ю. Игнатчик, Н. В. Кузнецова, А.Я. Феськова, М.А. Сенюкович // Вода и экология: проблемы и решения. – 2019. – № 4 (80). – С. 88–95.

15. Способ оптимизации потоков сточных вод: пат. на изобретение RUS 2667 745 / Кармазинов Ф.В., Рублевская О.Н., Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю., Кузнецова Н.В. – Оpubл. 24.09.2018, Бюл. 27.

16. Оптимизированная система водоотведения: пат. на изобретение RUS 2646 064 / Кармазинов Ф.В., Рублевская О.Н., Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю., Кузнецова Н.В. – Оpubл. 01.03.2018, Бюл. 7.

17. Управляемая система водоотведения: пат. на изобретение RUS 2605 908 / Кармазинов Ф.В., Курганов Ю.А., Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю., Кузнецова Н.В. – Оpubл. 18.04.2018, Бюл. 11.

18. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты: метод. пособие. – М.: АО «НИИ ВОДГЕО», 2015. – 146 с.

Е.И. Литинский;
А.А. Макаренко,
кандидат техн. наук;
С.А. Масленников,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Представлено описание усовершенствованной методики обоснования рационального способа комплексного применения космических картографирования и наблюдения, в которой впервые предложено учитывать возможности разнотипных космических систем наблюдения по матричной съемке участков местности района построения цифровой модели рельефа. Усовершенствование базируется на методике обоснования требований к видовой космической информации для построения цифровой модели рельефа, которая, в отличие от разработанных ранее, позволяет связать точность построения цифровой модели рельефа фотограмметрическими методами с разрешением и перекрытием исходных космических снимков. Также представлен пример моделирования комплексного применения указанных космических систем в интересах определения рациональных вариантов применения орбитального ресурса систем для построения цифровых моделей рельефа двух разноширотных районов земной поверхности.

Ключевые слова: космические системы картографирования, космические системы наблюдения, цифровая модель рельефа, комплексное применение, методика обоснования рационального способа, моделирование комплексного применения.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках организации картографирования местности актуальной является задача оперативного построения цифровой модели рельефа (ЦМР) на удаленный физико-географический район. Данная задача может решаться традиционными топогеодезическими методами наземной либо аэросъемки, а в случае отсутствия возможности доступа на картографируемую территорию единственным адекватным методом получения исходной информации для построения ЦМР является космическая съемка. В соответствии с общемировой практикой для нее привлекаются специализированные космические системы (КС) топогеодезического назначения, предназначенные для решения задач геодезии и картографии. Для удобства дальнейшего рассмотрения ограничимся той частью данных космических систем, которые предназначены (или могут использоваться) для решения картографических задач (КСК). В их состав включаются космические аппараты (КА) с оптико-электронной аппаратурой (ОЭА), обеспечивающей стереосъемку участков местности с качеством (разрешением), пригодным для дальнейшей фотограмметрической обработки в целях получения матрицы высот рельефа. При этом баллистическая структура орбитальных систем таких КА строится исходя из требований обеспечения покрытия районов съемки перекрывающимися полосами захвата ОЭА с определенной периодичностью.

Планирование применения КСК осуществляется исходя из предположения о заблаговременном решении задач получения топогеодезических данных. В случае же возникновения необходимости оперативного построения ЦМР на крупный район (размером порядка 500 км), когда на картографирование отводится менее месяца [1, 2], может сложиться ситуация, при которой возможностей существующей орбитальной группировки КСК будет недостаточно.

Для решения задач такого рода предложено исследовать возможность совместного применения (комплексирования) КСК и орбитального ресурса других космических систем не картографического назначения, способных производить съемку земной поверхности и ее оперативную передачу потребителю [далее – КС наблюдения земной поверхности (КСН)]. С целью корректного решения указанной задачи необходимо дополнительно решить задачу обоснования требований к видовой космической информации, используемой при построении ЦМР, обеспечивающих возможность применения КСН в ходе получения необходимого объема космической видовой информации для ее фотограмметрической обработки в интересах построения ЦМР на район планируемого картографирования.

СТРУКТУРА МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

В соответствии с поставленной задачей разработана структурно-функциональная схема методики обоснования рационального способа комплексного применения КСК и КСН, приведенная на рис. 1. Структурными компонентами данной методики являются блок формирования исходных (входных) данных, две отдельные методики и модель комплексного применения рассматриваемых систем.

Методика обоснования требований к видовой космической информации для построения цифровой модели рельефа включает в себя реализацию следующих блоков:

- обоснования требований к линейному разрешению оптико-электронных снимков;
- обоснования требований к перекрытию снимков.

Модель комплексного применения КСК и КСН в интересах картографирования недоступной территории включает в себя реализацию следующих этапов:

- планирования применения КА картографирования и КА наблюдения (КА КН) для получения стереопар космических снимков;
- оценивания оперативности построения цифровой модели рельефа на заданный район.

Методика выбора способа комплексного применения КСК и КСН включает в себя реализацию следующих этапов:

- определения допустимых режимов съемки для получения стереопары снимков дискрета (элементарного участка) района построения ЦМР;
- разбиения района на дискреты;
- формирования и оценивания расчетных вариантов орбитальной группировки (ОГ) КА КН для съемки района;
- выбора способа комплексного применения КСК и КСН в интересах картографирования.

Входными данными являются:

$A = \{a_i\}, i=1(1)I$ – множество КА КН, доступных для картографирования;

$V = \{V_i\}, i=1(1)I$ – параметры орбиты КА;

$W = \{W_i\}, i=1(1)I$ – параметры оптико-электронной аппаратуры КА;

I – число КА КН.

Требования потребителя к топогеодезическим данным:

$\Theta = \langle \varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2, \Delta X, \Delta Y, \Delta H \rangle$ – топографические параметры района построения ЦМР (широты, долготы границ района, его протяженность и высота);

m_{XYZ} – требование к точности построения матрицы высот рельефа.

Выходными данными является $\omega^* = \operatorname{argmin} \Delta T(\omega_k)$, где $\Delta T(\omega_k)$ – показатель оперативности получения стереопар снимков заданного качества на весь район в соответствии с вариантом ω_k ; T – множество моментов времени; ω_k – способ комплексного применения КСК и КСН, $\omega_k \in \Omega$.

Первой в схеме методики выбора способа комплексного применения КСК и КСН реализуется методика обоснования требований к видовой космической информации для построения ЦМР. Выходными данными методики являются требования к разрешению ОЭА – $R=f(m_{XYZ})$ и перекрытию стереопар $P=g(m_{XYZ})$.

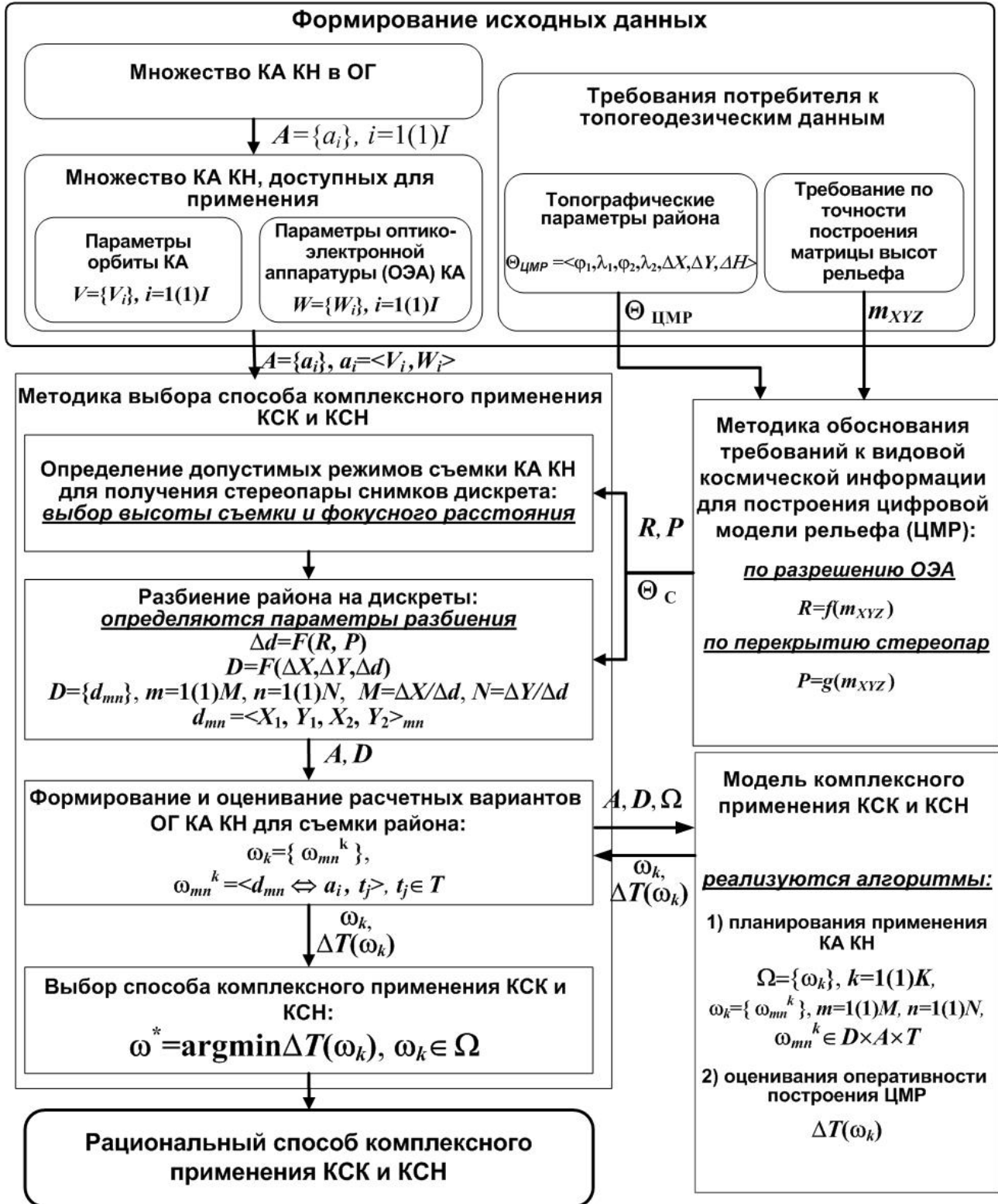


Рис. 1. Структурно-функциональная схема методики обоснования рационального способа комплексного применения КСК и КСН

На основе указанных требований и топографических параметров района картографирования производится разбиение района на дискреты со стороной

$$\Delta d = \text{Int} \left(\frac{l_x}{\sqrt{2}} \right). \quad (1)$$

Здесь Int – оператор округления в большую сторону, где координатами углов каждого дискрета с учетом требуемого перекрытия являются:

$$d_{mm} = \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} L_{m1} = L_A + (n-1)\Delta d - (n-1)P\Delta d \\ B_{n2} = B_A + n\Delta d - (n-1)P\Delta d \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} L_{m1} = L_A + (n-1)\Delta d - (n-1)P\Delta d \\ B_{n1} = B_A + (n-1)\Delta d - (n-1)P\Delta d \end{array} \right] \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} L_{m2} = L_A + n\Delta d - (n-1)P\Delta d \\ B_{n2} = B_A + n\Delta d - (n-1)P\Delta d \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} L_{m2} = L_A + n\Delta d - (n-1)P\Delta d \\ B_{n1} = B_A + (n-1)\Delta d - (n-1)P\Delta d \end{array} \right] \end{array} \right], \quad (2)$$

а также при сопоставлении требований R и P с параметрами орбит и ОЭА КА ОГ наблюдения в методике становится реализуемой процедура определения допустимых режимов съемки (выбора высоты съемки и фокусного расстояния для получения стереопары снимков дискрета района применения) для КА наблюдения, которые могут быть задействованы при решении задачи картографирования рассматриваемого района.

Полученные таким образом множество КА КН и данные по параметрам разбиения района построения ЦМР на дискреты служат основой для выполнения на следующем этапе методики процедуры формирования и оценивания расчетных вариантов ОГ КА КН для съемки района, из которых на выходе методики и производится выбор рационального (обоснованного) способа комплексного применения КСК и КСН. Особенностью процедуры формирования и оценивания расчетных вариантов ОГ КА КН является ее взаимосвязь с отдельной моделью комплексного применения КСК и КСН, реализующей алгоритмы планирования применения КСК и КСН и оценивания оперативности построения ЦМР по каждому из сгенерированных планов $\Delta T(\omega_k)$.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ВИДОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Методика обоснования требований к видовой космической информации при построении цифровой модели рельефа предназначена для обоснования требования к разрешению и перекрытию космических снимков исходя из заданной точности построения ЦМР и ее района [1]. Структурная схема разработанной методики приведена на рис. 2. Входными данными является задание на построение ЦМР [3, 4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\Theta_{\text{ТР}} \subseteq \Theta_{\text{ЦМР}}) \cong U, \\ m_{\text{ТР}} \geq m_{\text{ЦМР}}, \\ t_{\text{ТР}} \geq t_{\text{ЦМР}}, \end{array} \right. \quad (3)$$

- где $\Theta_{\text{ЦМР}}$ – район построенной ЦМР;
 $\Theta_{\text{ТР}}$ – заданный район построения ЦМР;
 U – достоверное событие;
 $t_{\text{ТР}}$ – время, отведенное для создания ЦМР;
 $t_{\text{ЦМР}}$ – время затраченное на создание ЦМР на заданный район;
 $m_{\text{ТР}}$ – требуемое среднее квадратическое отклонение (СКО) определения координат точки по ЦМР в плане и по высоте, $m_{\text{ТР}} = \{m_{\text{ХТР}}, m_{\text{УТР}}, m_{\text{ЗТР}}\}$;
 $m_{\text{ЦМР}}$ – полученное СКО определения координат точки по ЦМР, $m_{\text{ЦМР}} = \{m_x, m_y, m_z\}$.

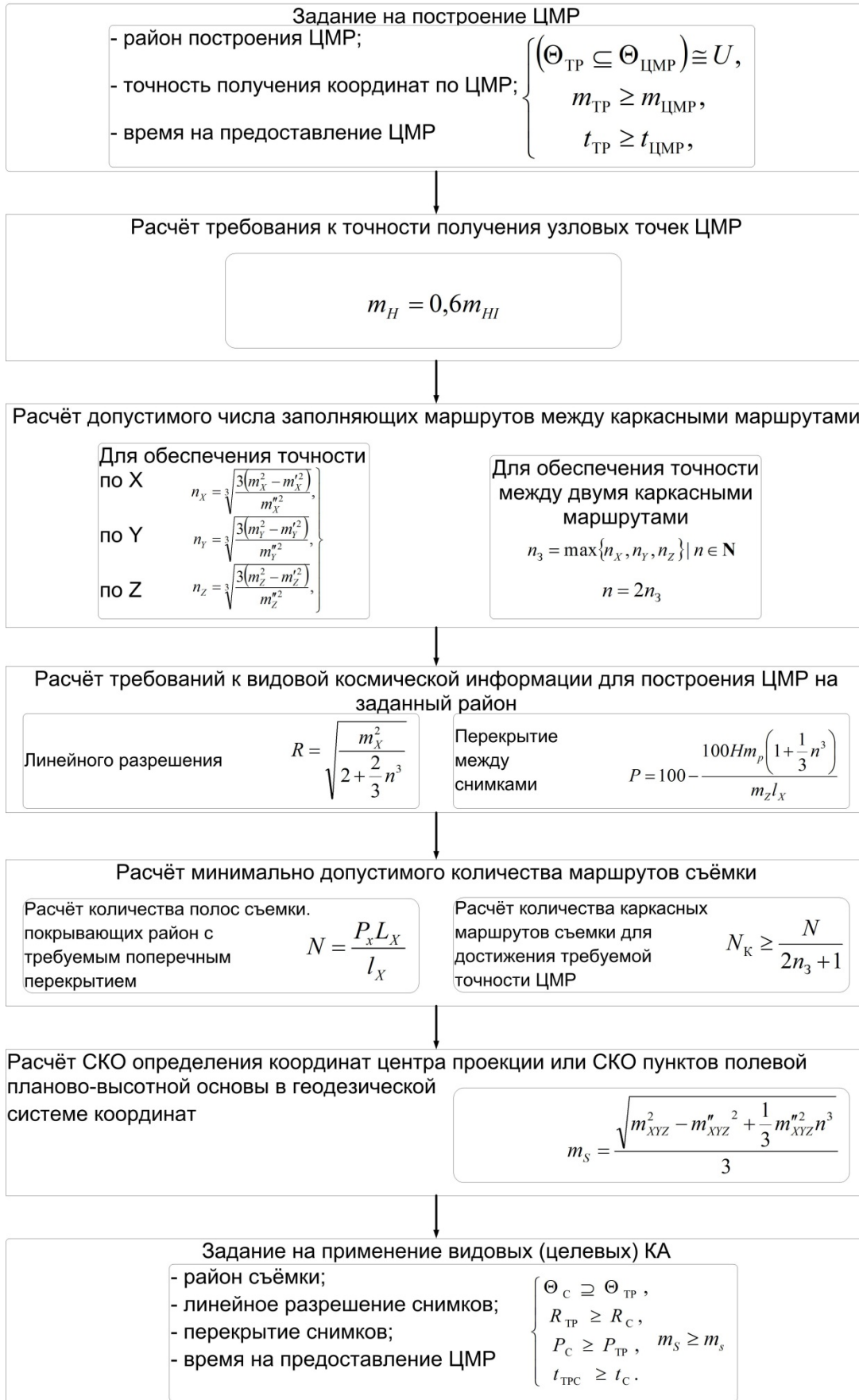


Рис. 2. Методика обоснования требований к видовой космической информации для построения цифровой модели рельефа

Выходными данными является задание на применение КА:

- 1) заданные заказчиком границы района картографирования – $\Theta_{\text{ТР}}$;
- 2) требуемое геометрическое разрешение снимков – $R_{\text{ТР}}$;
- 3) требуемое перекрытие снимков – $P_{\text{ТР}}$;
- 4) время, отведенное на предоставление материалов съемки – $t_{\text{ТРС}}$.

Задание на применение КА будет иметь следующий формализованный вид [3, 5]:

$$\begin{cases} \Theta_{\text{С}} \supseteq \Theta_{\text{ТР}}, \\ R_{\text{ТР}} \geq R_{\text{С}}, \\ P_{\text{С}} \geq P_{\text{ТР}}, \\ t_{\text{ТРС}} \geq t_{\text{С}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\Theta_{\text{С}}$ – район съемки;
 $R_{\text{С}}$ – геометрическое разрешение снимков;
 $t_{\text{С}}$ – время, затрачиваемое на предоставление материалов съемки;
 $t_{\text{ТРС}}$ – время, отведенное на предоставление материалов съемки, $t_{\text{ТРС}} = \psi(t_{\text{ТР}}, t_{\text{ЦМР}})$,
 где $t_{\text{ЦМР}}$ – время, затрачиваемое на построение ЦМР.

Методика обоснования требований к видовой космической информации для построения цифровой модели рельефа на заданный район включает следующие действия:

- 1) расчет точности получения узловых точек ЦМР. Для этого, используя $m_{\text{ТР}} = \{m_{\text{ХТР}}, m_{\text{УТР}}, m_{\text{ЗТР}}\}$ – требуемое СКО определения координат точки по ЦМР в плане и по высоте, и по формуле [3, 5]

$$m_{\text{Н}} = 0,6m_{\text{НП}} \quad (5)$$

вычислить требуемую точность определения узловых точек ЦМР;

- 2) расчет допустимого числа заполняющих маршрутов между каркасными маршрутами (рис. 3).

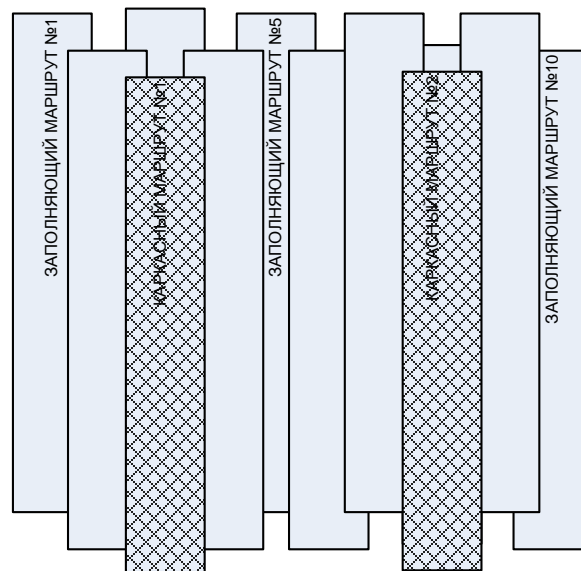


Рис. 3. Вариант схемы расположения каркасных и заполняющих маршрутов

Зная $m_{\text{Х}}$ – заданную ошибку определения координат точек местности на n -м заполняющем маршруте; $m'_{\text{Х}}$ – ошибку определения координат точек (одиночной модели) на каркасном маршруте; $m''_{\text{Х}}$ – ошибку определения координат точек одиночной модели на заполняющем маршруте, по следующим формулам [3, 6]:

$$\left. \begin{aligned} n_x &= \sqrt[3]{\frac{3(m_x^2 - m_x'^2)}{m_x^{n^2}}}, \\ n_y &= \sqrt[3]{\frac{3(m_y^2 - m_y'^2)}{m_y^{n^2}}}, \\ n_z &= \sqrt[3]{\frac{3(m_z^2 - m_z'^2)}{m_z^{n^2}}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$n_3 = \max\{n_x, n_y, n_z\} \mid n \in \mathbf{N} \quad (7)$$

последовательно рассчитывается $n=2n_3$, где n_3 – допустимое число заполняющих маршрутов между каркасными маршрутами;

3) расчет требований к видовой космической информации для построения ЦМР на заданный район. Зная допустимое количество заполняющих маршрутов между каркасными маршрутами и ширину полосы захвата одного КА, по формулам [3, 6]:

$$R = \sqrt{\frac{m_x^2}{2 + \frac{2}{3}n^3}}, \quad P = 100 - \frac{100Hm_p \left(1 + \frac{1}{3}n^3\right)}{m_z l_x}, \quad (8)$$

в которых символом l_x обозначена ширина полосы захвата КА, l_y – длина полосы захвата КА, рассчитывается требуемое разрешение снимков и требуемое перекрытие снимков;

4) расчет числа полос съемки, покрывающих район с требуемым поперечным перекрытием (рис. 4).

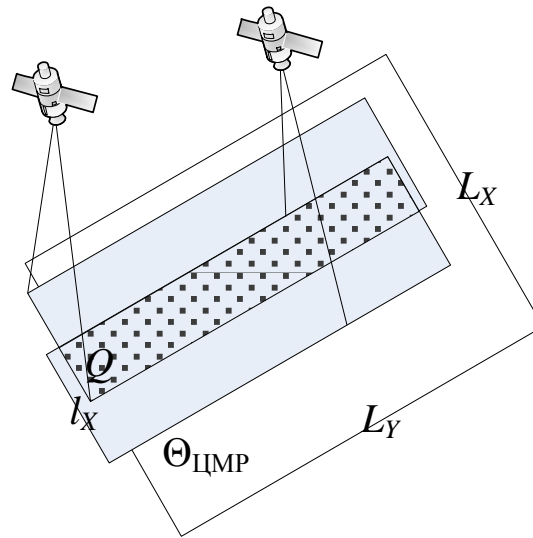


Рис. 4. Схема района построения ЦМР

Для расчетов используется формула [3, 6]

$$N = \frac{QL_x}{l_x}, \quad (9)$$

где N – число маршрутов съемки, покрывающих район с требуемым перекрытием;
 L_x – ширина района построения ЦМР;
 Q – ширина поперечного перекрытия;
 l_x – ширина поля изображения одного КА;

5) расчет количества каркасных маршрутов съемки для достижения требуемой точности ЦМР. Зная допустимое количество заполняющих маршрутов между каркасными маршрутами и требуемую точность ЦМР, по формуле [3]

$$m_s = \frac{\sqrt{m_{XYZ}^2 - m_{XYZ}''^2 + \frac{1}{3}m_{XYZ}''^2 n^3}}{3}, \quad (10)$$

рассчитывается предельно допустимое СКО определения координат центра проекции или СКО пунктов полевой планово-высотной основы в геодезической системе координат.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЗАДАННОГО РАЙОНА

Для моделирования использовался программный комплекс моделирования применения космических сил и средств. Комплекс разработан в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского [7] в рамках развития базы моделирования применения наземных и орбитальных группировок космических сил и средств. Комплекс представляет собой совокупность проблемно-ориентированных приложений, реализующих модели и методики применения космических систем (комплексов). Комплекс был адаптирован для реализации модели комплексного применения КСК и КСН.

При проведении моделирования были заданы три условные типа КА КН [8, 9, 10]: картографические, условно картографические и некартографические (наблюдения) (табл. 1). Также упринимались во внимание: параметры ОЭА КА; расчетные значения периодичности съемки дискрета ОЭА КА КН при варьировании параметрами ОЭА, учитывающие требования к получению стереопар снимков дискретов. Особенностью исходных данных моделирования, представленных в табл. 1, является достаточно широкое варьирование значимыми для моделирования характеристиками КА, соответствующими уже достигнутому показателям либо отражающими значения, принципиально достижимые при современном уровне развития космических средств и технологий картографирования и наблюдения земной поверхности [8, 9, 10].

Таблица 1

Характеристики КА

| Тип КА | Ширина полосы захвата, км | Разрешение на местности, м | Периодичность надирной съемки, ч | Число КА | Всего |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------|-------|
| Условно картографические 1 | 13–19 | 0,5 | 95 | 1 | 12 |
| Условно картографические 2 | 12–18 | 0,5 | 95 | 6 | |
| Картографические | 50–70 | 0,5 | 53 | 5 | |
| Некартографические 1 | 38 | 1 | 85 | 3 | 6 |
| Некартографические 2 | 20 | 2 | 89 | 3 | |

Для непосредственного моделирования были выбраны два вытянутых по широте района Северного полушария размерами 600×300 км, локализованными на Ближнем Востоке (район №1) и в Восточной Европе (район №2) с центральными осями районов, пролегающими по широтам 34,5°с.ш. и 49,5°с.ш. соответственно.

На первом этапе моделирования определена зависимость значений периодичности полной съемки района (в сутках) от вариантов применения КСК и КСН условно принятого при моделировании полного состава, приведенных в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что КС картографического и условно картографического назначения в целом позволяют решать задачу съемки назначенных районов с показателями оперативности, в 1,5–2 раза превышающими суммарные возможности КС некартографического назначения. При этом наиболее значимый вклад вносит КС картографического назначения в составе 5 КА, условные характеристики которой наиболее соответствуют целевому предназначению системы. Именно данная КС была принята в качестве опорной при дальнейшем анализе моделируемых вариантов применения КСК и КСН. Анализ краевых вариантов (одновременное совместное применение КС всех типов) показал, что вклад КС условно картографического назначения в рост оперативности выполнения задачи составит около 8% для района 1 и около 14% для района 2. Задействование дополнительно КС некартографического назначения улучшит оперативность на 27% для района 1 и на 30% для района 2.

Таблица 2

Зависимость значений периодичности полной съемки разноширотных районов (в сутках) от вариантов применения КСК и КСН полного состава

| № района | Варианты применения КСК и КСН | | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | Картографические (5 КА) | Условно картографические 1 (1 КА) | Условно картографические 2 (6 КА) | Картографические и условно картографические (12 КА) | Прирост оперативности, % | Некартографические 1 (3 КА) | Некартографические 2 (3 КА) | Некартографические (6 КА) | КА всех типов (18 КА) | Прирост оперативности, % |
| 1 | 14,3 | 63,1 | 26,2 | 13,2 | 8 | 27,4 | 38,6 | 21,2 | 10,4 | 27 |
| 2 | 16,8 | 84,5 | 35,4 | 14,5 | 14 | 39,5 | 43,4 | 33,4 | 11,7 | 30 |

С учетом проведенного анализа краевых вариантов на втором этапе моделирования решения задачи за основу были взяты варианты комплексирования КА КСК и КСН, включающие различные варианты задействования КА из состава КС картографического назначения в различных сочетаниях с КА остальных КС для различных вариантов укомплектованности КСК и КСН.

Проведенное моделирование показало, что для заданных параметров качества космической съемки и показателей оперативности решения задачи для назначенных географических районов, сопоставимых с уровнем, обеспечиваемым целевой КС картографического назначения полного состава, находятся варианты комплексирования КС картографического назначения сокращенного состава (4, 3, 2 космических аппарата) с КА КС некартографического назначения, которые являются рациональными по критерию минимизации дополнительного задействования КА КС условно картографического и некартографического назначения и, соответственно, ресурса наземного комплекса управления космическими системами (табл. 3).

Таким образом, выигрыш в ресурсоемкости рациональных вариантов комплексирования (количество КА, не задействованных для решения данной задачи), в зависимости от укомплектованности базовой КС картографирования и географического положения района (по широте), составил от 27% до 67% по сравнению с вариантом полного задействования всех КА КСК и КСН, что свидетельствует о потенциальной возможности решения поставленной задачи по оперативному картографированию недоступных районов за счет рационального расходования орбитального ресурса КСК и КСН.

Таблица 3

Выигрыш в ресурсоемкости рациональных вариантов комплексного применения КС

| Район | Показатель | Варианты комплексного применения КСК и КСН для базовой системы, включающей 4, 3 и 2 КА картографического назначения | | | | | |
|-------|------------|---|--------------|--------|--------------|--------|--------------|
| | | 4 КА | | 3 КА | | 2 КА | |
| | | полный | рациональный | полный | рациональный | полный | рациональный |
| 1 | Всего КА | 17 | 7 | 16 | 9 | 15 | 11 |
| | Выигрыш | – | 10 (59%) | – | 7 (44%) | – | 6 (40%) |
| 2 | Всего КА | 17 | 10 | 16 | 11 | 15 | 11 |
| | Выигрыш | – | 7 (41%) | – | 5 (31%) | – | 4 (27%) |
| 1 | Всего КА | 21 | 7 | 20 | 9 | 19 | 11 |
| | Выигрыш | – | 14 (67%) | – | 11 (55%) | – | 8 (42%) |
| 2 | Всего КА | 21 | 8 | 20 | 10 | 19 | 12 |
| | Выигрыш | – | 13 (62%) | – | 10 (50%) | – | 7 (37%) |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная методика обоснования рационального способа комплексного применения космических систем картографирования и наблюдения обеспечивает возможность повышения эффективности картографирования с применением КСК и КСН за счет привлечения дополнительного орбитального ресурса. Крайне важной частью представленного методического аппарата с точки зрения моделирования является частная методика обоснования требований к видовой космической информации для построения цифровой модели рельефа, которая позволяет связать точность построения ЦМР фотограмметрическими методами с требованиями к разрешению и перекрытию исходных космических снимков. Разработанные методики позволяют учитывать возможности разнотипных КС по съемке больших участков местности, обосновывать количественный состав и порядок применения КСК и КСН и, как показали результаты моделирования, позволяют повысить эффективность применения КС для оперативного картографирования недоступных районов на 27–67% по критерию минимизации задействованного ресурса (для заданных экспериментальных условий). Применение предложенного методического аппарата позволяет рационально решать оперативно возникающие задачи по приоритетному картографированию заданных районов с учетом текущего состояния КСК и КСН и с минимальным ущербом для решения других (плановых) задач системы.

Список используемых источников

1. Временные нормы времени на создание ЦТК масштабов 1:200000, 1:100000, 1:50000 в программном комплексе «Панорама». – URL:<http://www.alppp.ru/law/hozjajstvennaja-dejatel'nost/geologija--geodezija-i-kartografija/5/vremennye-normy-vremeni-na-sozdanie-ctk-masshtabov-1200000-1100000-150000-v-programmnom-ko.html> (дата обращения: 12.10.2019).
2. Временные нормы времени на технологические процессы по созданию (обновлению) топографических и электронных карт «946 Главного центра геопространственной информации» Минобороны России. – Ногинск: в.ч. 43651, 2012. – 117 с.
3. Методика обоснования характеристик аппаратуры и требований к навигационному обеспечению космической съемки / И.В. Чернов, С.А. Масленников, А.С. Кузнецов, В.А. Телеш // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С. 151–156.

4. *Готюр И.А., Прохоренко П.А.* Модель космической системы гидрометеорологического обеспечения // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Вып. 656. – С. 57–67.
5. *Чернов И.В., Масленников С.А., Жулев А.Е.* Обоснование требований к информации и составу бортовой космической аппаратуры для построения цифровой модели местности // Научная мысль. – 2017. – Т. 1, № 3 (25). – С. 58–64.
6. *Хрущ Р.М.* Фотограмметрия: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 541 с.
7. Программный комплекс моделирования применения космических сил и средств / А.В. Чарушников, П.А. Проценко, М.Ю. Ортиков и др. // Наука и инновации в технических университетах: материалы девятого всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. 27–30 октября 2015 г. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2015. – С. 64–66.
8. *Дворкин Б.А., Дудкин С.А.* Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. – URL:<http://geomatica.ru/clauses/130/> (дата обращения: 12.10.2019).
9. *Дворкин Б.А., Дудкин С.А.* Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. – 2013. – № 2. – С. 16–39.
10. *Дворкин Б.А.* Импортозамещение в сфере геоинформационных технологий и ДЗЗ // Геоматика. – 2015. – № 1. – С. 17–28.

Р.-Б.Б. Станиславичюс,
кандидат техн. наук, доцент;
А.В. Суворов;
А.И. Яковлев,
кандидат техн. наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ИСХОДНЫХ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА РАБОТУ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Результаты исследования основаны на измерениях, полностью проводимых на объекте в соответствии с законами движения и гравитации Ньютона. Измерения осуществляются блоком чувствительных датчиков инерциальной навигационной системы, установленной на транспортном средстве.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, погрешности, астрономо-геодезические данные.

В отличие от всех существующих навигационно-геодезических методов определения местоположения и параметров движения какого-либо объекта инерциальный метод позволяет получить все эти данные, находясь непосредственно на объекте во время его движения или на остановках.

Погрешности оценивания навигационных параметров, обусловленные влиянием ошибок инерциальных измерений, растут с высокой скоростью по времени и пройденному пути. Поэтому для счисления всего спектра астрономо-геодезических и гравиметрических данных с инерциальной навигационной системы требуются частые остановки транспортного средства на заблаговременно определенных пунктах маршрута.

Необходимыми для работ инерциальных систем исходными данными являются астрономические и геодезические координаты наземных пунктов, азимуты направлений на местности, данные о гравитационном поле Земли. Астрономические координаты устанавливают угловую связь топоцентрической системы координат с общеземной системой координат. Геодезические координаты определяют линейное положение объекта. Данные о гравитационном поле Земли необходимы для вычисления ускорения силы тяжести [1].

На эффективную работу инерциальных навигационных систем (ИНС) оказывают существенное влияние следующие ошибки исходных астрономо-геодезических данных:

- ошибки планового положения и высоты начального и конечного пунктов $\delta x', \delta y', \delta H$;
- ошибки составляющих уклонения отвесной линии $\delta \xi, \delta \eta$ и аномалии силы тяжести δg по маршруту перемещения;
- ошибки астрономического азимута δA начального направления.

Следовательно, для ИНС необходимо определять исходные астрономо-геодезические и гравиметрические данные с такой точностью, чтобы ошибки исходных данных оказывали наименьшее влияние на точность измеряемых параметров ИНС [3, 4]:

$$\delta_{\text{ИАГГД}} \leq \left(\frac{1}{n} \right) \delta_{\text{измер.пар}}, \quad (1)$$

где n – критерий установления точности определения измеренных параметров относительно ИАГГД. Для примера рассмотрим влияние критериев 3, 5, 10 (табл. 1).

Бортовыми приемниками, находящимися в транспортном средстве, будут определяться координаты точек в топоцентрической системе координат, где начало отсчета находится в некоторой точке измерений на земной поверхности. Топоцентрическая система координат x, y, H имеет четкую аналитическую связь с общеземной системой координат B, L, H .

Таблица 1

Среднеквадратические ошибки определения координат начального пункта

| Длина маршрута, км | Общее время движения, ч | Время движения между точками маршрута, мин | $\delta_{\Delta x, \Delta y}$ | Точность определения координат начального пункта | | |
|--------------------|-------------------------|--|-------------------------------|--|---|--|
| | | | | $\frac{\delta_{\Delta x, \Delta y}}{3}$ | $\frac{\delta_{\Delta x, \Delta y}}{5}$ | $\frac{\delta_{\Delta x, \Delta y}}{10}$ |
| 100 | 5 | 5 | 1,0 | 0,33 | 0,20 | 0,10 |
| 100 | 3 | 3 | 0,6 | 0,2 | 0,12 | 0,06 |
| 70 | 5 | 5 | 0,5 | 0,166 | 0,10 | 0,05 |

Вектор ошибок угловой связи топоцентрической системы координат с общеземной имеет следующий вид [4]:

$$\delta \bar{\Psi}_{AG} = \begin{bmatrix} \delta B + \delta \xi \\ \delta L + \delta \eta \times \sec \varphi \\ \delta A \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\delta B, \delta L$ – ошибки эллипсоидальных координат:

$$\delta B = \frac{\delta x'}{(M + H)}, \delta L = \frac{\delta y'}{[(N + H) \times \cos B]}, \quad (3)$$

символами M, N в формуле (3) обозначены радиусы кривизны меридиана и первого вертикала.

Вектор ошибок положения объекта в общеземной системе координат вычисляется путем простого преобразования [2]:

$$\delta \bar{\tau} = A \times \delta \tau', \quad (4)$$

где $\delta \bar{\tau}$ – вектор ошибок геоцентрических координат;

A – матрица поворота осей координат.

В развернутом виде ошибки положения объекта в общеземной системе координат можно записать следующим образом [2]:

$$\begin{bmatrix} \delta x' \\ \delta y' \\ \delta H' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \times \cos L & -\sin L & \cos B \times \cos L \\ -\sin B \times \sin L & \cos L & \cos B \times \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta x' \\ \delta y' \\ \delta H \end{bmatrix} \quad (5)$$

где $\delta x', \delta y', \delta H'$ – изменения топоцентрических координат.

Оценим влияние точности определения начального пункта на текущие координаты ИНС, полученные по маршруту эталонирования [4]:

$$\left. \begin{array}{l} x_i = x_n + \Delta x_{yi}; \\ y_i = y_n + \Delta y_{ni}; \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \delta_{x_i} = \sqrt{\delta_{x_n}^2 + \delta_{\Delta x_i}^2}; \\ \delta_{y_i} = \sqrt{\delta_{y_n}^2 + \delta_{\Delta y_i}^2}. \end{array} \right\} \quad (6)$$

при

$$\left. \begin{array}{l} \delta_{(x,y)_n} = \frac{\delta_{\Delta x, \Delta y}}{3}; \\ \delta_{(x,y)_n} = \frac{\delta_{\Delta x, \Delta y}}{5}; \\ \delta_{(x,y)_n} = \frac{\delta_{\Delta x, \Delta y}}{10}. \end{array} \right\} \quad (7)$$

В табл. 1 представлены среднеквадратические ошибки определения координат начального пункта в зависимости от длины эталонного маршрута инерциальной навигационной системы.

Ошибки определения координат ИНС из-за неточной ориентировки БИНС в начальной точке эталонного маршрута можно описать следующими формулами [4]:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{x_j}^{\alpha_0} &= -\alpha_{z_0} \times \Delta y_j, \\ \delta_{y_j}^{\alpha_0} &= \alpha_{z_0} \times \Delta x_j, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где Δx_j – смещение по оси x от начальной точки, $\Delta x_j = x_j - x_n$;

Δy_j – смещение по оси y от начальной точки, $\Delta y_j = y_j - y_n$, символами x_n , y_n обозначены координаты начальной точки эталонного маршрута.

Если на начальном пункте известна составляющая уклонения отвесной линии в первом вертикале η , то величину α_{z_0} – ошибку азимутальной ориентировки инерциальной навигационной системы – получим на основании выражения [5, 6]

$$\alpha_{z_0} = \alpha_{z_n} + \eta \times \operatorname{tg} B. \quad (9)$$

Считая, что η и B определены безошибочно, а ошибка в координатах начального пункта пренебрегаемо мала, получим ошибку определения азимутального направления на маршруте:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{z_{nx}} &= -\frac{\delta x_j}{\Delta y_j} - \eta \times \operatorname{tg} B, \\ \alpha_{z_{ny}} &= -\frac{\delta y_j}{\Delta x_j} - \eta \times \operatorname{tg} B. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В табл. 2 приведены ошибки определения направления ориентирования ИНС при различной протяженности эталонного маршрута.

Таблица 2

Расчет ошибок определения направления ориентирования

| Уровень точности определения координат, м | Протяженность маршрута, км | | | | | | |
|---|----------------------------|-------|-----|-----|-----|------|------|
| | 1,5 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 70 |
| $\delta_{x,y} = 1$ | 2'17" | 1'08" | 41" | 21" | 10' | 7" | 3" |
| $\delta_{x,y} = 0,6$ | 1'22" | 41" | 24" | 12" | 6" | 4" | 1,7" |
| $\delta_{x,y} = 0,5$ | 1'08" | 34" | 20" | 10" | 5" | 3,5" | 1,5" |

Для исключения ошибок определения координат, возникающих из-за азимутального дрейфа ИНС, на конечном пункте маршрута необходимо иметь также эталонное ориентированное направление. В этом случае ошибка определения координат будет вычисляться по формулам

$$\left. \begin{aligned} \delta x_j &= -0,5 \Delta y \times \alpha_z, \\ \delta y_j &= -0,5 \Delta x \times \alpha_z. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Выполнить определение высот инерциальным методом с приемлемой для потребителя точностью практически невозможно без осуществления периодической коррекции канала высоты инерциальной системы [5, 6]. Основной причиной этого является сложность выделе-

ния полезной составляющей вертикального ускорения объекта из показаний вертикального акселерометра на фоне помех, обусловленных влиянием аномалии ускорения силы тяжести, кориолисового и центробежного ускорения, инструментальных погрешностей акселерометра, колебаний транспортного средства.

Результаты исследований [6] показывают, что при условии исключения помех в показаниях вертикального акселерометра ИНС (дрейфы гироскопов 0,005–0,01°/ч, погрешности акселерометра 1–2 мГал) высоты точек местности будут получены с точностью 3–5 м при удалении до 50 км от исходных пунктов. Исходя из этих предпосылок среднеквадратические ошибки определения высоты начального пункта, пунктов калибровки ИНС, конечного пункта маршрута эталонирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Таблица расчета среднеквадратической ошибки определения высоты начального пункта

| Длина маршрута, км | Общее время движения, ч | Время движения между точками, мин | δ_H , м | Точность определения начального и конечного пункта, м | | |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------|---|----------------------|-----------------------|
| | | | | $\frac{\delta_H}{3}$ | $\frac{\delta_H}{5}$ | $\frac{\delta_H}{10}$ |
| 100 | 5 | 5 | 1,2 | 0,4 | 0,24 | 0,12 |
| 100 | 3 | 3 | 0,5 | 0,2 | 0,12 | 0,06 |
| 70 | 5 | 5 | 0,6 | 0,2 | 0,12 | 0,06 |

Для определения составляющих уклонений отвесных линий ξ и η необходимо в каждой определяемой точке фиксировать каким-либо способом направление нормали к поверхности принятого эллипсоида и направление отвеса. В инерциальных системах направление отвеса может быть зафиксировано с помощью горизонтальных акселерометров, показания которых во время остановок транспортного средства пропорциональны углам наклонов ИНС относительно направления отвеса в данной точке [3].

Направление нормали к поверхности принятого эллипсоида может задаваться путем определения изменений положения в процессе движения системы относительно известного положения нормали в исходной точке. Так как положение нормали непрерывно меняется в инерциальном пространстве за счет суточного вращения Земли и относительного перемещения системы, а оси ИНС относительно инерциального пространства неподвижны, то необходимо управлять положением ИНС путем ее разворота относительно собственных осей. Угловые скорости разворота ИНС ω_x , ω_y , ω_z равны проекциям абсолютной угловой скорости изменения направления нормали на оси системы координат [5, 6].

Значения ω_x , ω_y , ω_z рассчитываются бортовым вычислителем системы по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= -\frac{V_y}{M}; \\ \omega_y &= \Omega \cos B + \frac{V_x}{N}; \\ \omega_z &= \Omega \sin B + \frac{V_x}{N} \times \operatorname{tg} B; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где Ω – угловая скорость суточного вращения Земли;
 V_x , V_y – составляющие линейной скорости относительно перемещения системы;
 M , N – радиусы кривизны поверхности эллипсоида в плоскости меридиана и первого вертикала;
 B – текущее значение широты.

Удерживая ИНС относительно направления нормали на остановках, можно измерить сигналы горизонтальных акселерометров, которые пропорциональны величинам составляющих уклонения отвесной линии ξ , η , так как другие составляющие сигналов акселерометров равны нулю. Зная ξ_0 , η_0 в исходном пункте, можно передавать их в любые точки остановок системы.

В процессе движения инерциальной системы положением ИНС управляют с использованием угловых скоростей, рассчитанных по формулам (12).

Таким образом, горизонтальные акселерометры на остановках измеряют ускорения, пропорциональные величине изменения ξ , η относительно предыдущей остановки. Вычисление значений ξ , η производится по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \xi_n &= \xi_0 + \frac{\rho}{g} \sum_{i=1}^n (W_x)_i; \\ \eta_n &= \eta_0 + \frac{\rho}{g} \sum_{i=1}^n (W_y)_i, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где ξ_0 , η_0 – значения составляющих уклонения отвесной линии в исходном пункте;
 W_x , W_y – показания горизонтальных акселерометров на остановках системы.

Значения ускорений силы тяжести могут определяться с помощью инерциальных систем тем же методом, что и с использованием относительных гравиметров, т.е. путем измерения приращений относительно исходных пунктов по формуле

$$g = g_0 + \sum_{i=1}^n (W_i - W_{i-1}), \quad (14)$$

где W – показания вертикального акселерометра на остановках.

Исследования показали [6], что определение ускорений силы тяжести с точностью 1–2 мГал и уклонений отвесных линий со среднеквадратической ошибкой 1–2" с помощью ИНС может быть достигнуто на маршрутах протяженностью порядка 100 км между пунктами с известными значениями уклонений отвесных линий при коррекции системы методом кратковременных остановок, использовании оптимального алгоритма фильтра Калмана для обработки измерительной информации и при использовании в ИНС чувствительных элементов с точностными характеристиками на порядок выше по сравнению с теми, что необходимы для определения координат и высот.

Исходя из вышеизложенного среднеквадратические ошибки определения ξ , η , g начального пункта, пунктов калибровки, конечного пункта маршрута эталонирования ИНС приведены в табл. 4.

Таблица 4

Таблица расчета среднеквадратической ошибки определения основных исходных астрономо-геодезических и гравиметрических данных

| Длина маршрута, км | Общее время движения, ч | Время движения между точками, мин | $\delta_{\xi, \eta}$ δ_g | Точность определения начального пункта, пунктов калибровки | | |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|
| | | | | $\frac{\delta_{\xi, \eta, g}}{3}$ | $\frac{\delta_{\xi, \eta, g}}{5}$ | $\frac{\delta_{\xi, \eta, g}}{10}$ |
| 100 | 5 | 5 | 0,45 " 0,46 мГал | 0,15 " 0,15 мГал | 0,09 " 0,09 мГал | 0,04 " 0,04 мГал |
| 100 | 3 | 3 | 0,45 " 0,46 мГал | 0,15 " 0,15 мГал | 0,09 " 0,09 мГал | 0,04 " 0,04 мГал |
| 70 | 5 | 5 | 0,41 " 0,36 мГал | 0,14 " 0,12 мГал | 0,08 " 0,07 мГал | 0,04 " 0,04 мГал |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1) на современном уровне точности чувствительных элементов ИНС влияние ошибок исходных астрономо-геодезических и гравиметрических данных может составлять от 20 до 70% суммарной ошибки местоположения;

2) среди ошибок исходных астрономо-геодезических и гравиметрических данных преобладают ошибки в определении ускорения силы тяжести δg , их вклад составляет около 60%;

3) ошибки ориентирования системы вносят до 40% от суммарных ошибок;

4) точность определения x , y , H , ξ , η , g начального пункта, пунктов калибровки и конечного пункта маршрута должна быть не хуже:

$$\delta_{x,y} = 0,05 \text{ м};$$

$$\delta_H = 0,5 \text{ м};$$

$$\delta_g = 0,4 \text{ мГал};$$

$$\delta_{\xi,\eta} = 0,5''.$$

Список используемых источников

1. *Ишлинский А.Ю.* Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 672 с.

2. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.

3. Руководство по определению астрономо-геодезических и гравиметрических данных при топогеодезическом обеспечении войск. – М.: РИО ВТУ ГШ, 1994. – Ч. 1. – 196 с.

4. Руководство по определению астрономо-геодезических и гравиметрических данных при топогеодезическом обеспечении войск. – М.: РИО ВТС, 1979. – Ч. 3. – 224 с.

5. *Шолохов А.В.* Аналитический способ определения геодезических параметров на борту подвижного объекта с привлечением кусочно-линейной модели его траектории // Геодезия и картография. – 2005. – №4.

6. *Шолохов А.В.* Коррекция наземных навигационных систем по цифровой карте дорог с учетом ее погрешностей // V Научно-техническая конференция молодых ученых «Навигация и управление движением»: сб. докладов. – СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003.

И.В. Чернов,
кандидат техн. наук;
В.И. Якунин,
кандидат техн. наук, доцент

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГИРОТЕОДОЛИТНЫХ РАБОТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ

Обоснован показатель качества целевого эффекта гиротеодолитных работ и показатели виртуальных (возможных) временных затрат и затрат ресурсов, которые позволяют учесть при оценивании качества методов геодезической подготовки района (ГПР) влияние возможных случайных временных задержек.

Определен вид зависимости целевого эффекта от показателя автономности метода ГПР, что позволяет применять разработанный математический аппарат для поддержки принятия решения на реализацию метода ГПР в условиях отсутствия информации от внешних источников. Например, ГПР арктического региона или любого другого автономного района.

Обоснован операционный функционал, связывающий показатель целевого эффекта процесса ГПР с затратами ресурсов и времени. Данный подход позволяет обосновать выбор метода ГПР, обеспечивающий удовлетворение предъявляемых к его качеству требований.

Ключевые слова: модель, виртуальное (возможное) качество результатов геодезической подготовки, автономность, гиротеодолит, обоснование выбора метода геодезической подготовки.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим этапом работ при геодезической подготовке района (ГПР) являются априорные расчеты, проводимые камерально. Целью априорных расчетов является проектирование полевых работ. Методы, традиционно применяемые в практике организации геодезических работ [1, 2], хотя и позволяют решать задачи проектирования ГПР, однако не позволяют учесть влияние случайных временных задержек, связанных с отказами техники, ошибками наблюдателей, неблагоприятными погодными условиями и другими факторами, на результаты процесса ГПР. В итоге это может привести к появлению просчетов при проектировании ГПР.

Поскольку ГПР – это целенаправленный процесс, то при решении задачи оценивания пригодности метода ГПР необходимо соотнести возможные результаты ГПР с предъявляемыми к ним требованиями. Для этого необходимо построить математическую модель показателя виртуального качества результатов операции и предъявить к ним требования (обосновать предельно допустимые значения показателей качества результатов операции ГПР).

Операционными свойствами целенаправленного процесса (ЦнП) являются результативность, оперативность и ресурсоемкость [3]. В работе [4] была показана важность учета такого обеспечивающего свойства метода ГПР, как «автономность» [независимость от внешней (по отношению к системе топогеодезического обеспечения) информации]. Например, при геодезической подготовке удаленных районов отсутствие учета автономности реализуемого метода ГПР может привести к снижению качества результатов ГПР (ухудшению характеристик точности геодезической привязки, увеличению затрат времени на выполнение ГПР).

Таким образом, при организации качественного процесса ГПР важно учесть свойства автономности методов, применяемых при ГПР, и возможные случайные временные задержки.

ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ РАЙОНА

Для обеспечения требуемой точности геодезических определений используются избыточные измерения [1, 5, 6]. С увеличением объема данных (измерений) величина погрешности определения геодезических данных уменьшается [6, 7]. Одним из способов увеличения объема данных измерений является увеличение числа гиротеодолитов в комплекте, увеличение числа измерений, производимых каждым из них [8]. Так как именно гироскопический метод определения азимутов направлений обладает высокой автономностью [4], то для дальнейших рассуждений выберем его.

При увеличении числа приемов гироскопических измерений (пусков) погрешность $m_{\text{гир}}$ определения азимута будет описываться зависимостью [9]

$$m_{\text{гир}} = K_n \frac{\mu_{\text{гир}}}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где K_n – коэффициент понижения точности гироскопических наблюдений [9];

$\mu_{\text{гир}}$ – средняя квадратическая погрешность (СКП) определения азимута одним пуском;

n – число пусков (измерений).

Если представить число n пусков как отношение затрат времени τ_n на производство совокупности измерений (технологически необходимых затрат времени) к времени τ_n , затрачиваемому на производство одного измерения, т.е. $\tau_n = n\tau_n$ (n – число измерений), используя выражение (1), получим зависимость целевого эффекта $m_{\text{гир}}$ – погрешности определения азимута от операционного времени τ при отсутствии временных задержек (при $\tau = \tau_n$):

$$m_{\text{гир}} = K_n \mu_{\text{гир}} \sqrt{\frac{\tau_n}{\tau_n}}, \quad (2)$$

где $\tau_n = i\tau_n$; $i=1(1)n$.

Если используется не один гиротеодолит, а гиротеодолитный комплект (ГТК), состоящий из N гиротеодолитов, то формула (2) примет следующий вид [9]:

$$m_N = K_n K_N \frac{\mu_N}{\sqrt{N} \sqrt{n}}, \quad (3)$$

где N – число гиротеодолитов в ГТК;

K_N – коэффициент понижения точности наблюдений ГТК;

μ_N – усредненное СКП определения азимута одним пуском;

m_N – СКП определения азимута комплектом из N гиротеодолитов n измерениями.

Для гиротеодолитов, входящих в состав ГТК, должно соблюдаться условие $\mu_1 \approx \mu_2 \approx \dots \approx \mu_N$ [10].

Для измерений, выполненных гиротеодолитным комплектом, выражение (3) с учетом выражения (2) примет вид

$$m_N = K_n K_N \frac{\mu_N}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\tau_n}{\tau_n}}. \quad (4)$$

Зависимость (4) позволяет представить показатель m_N виртуального (возможного) целевого эффекта операции как функцию затрат операционного времени τ_n на производство измерений (без учета временных задержек). Однако в выражении (4) не учитывается зависимость результатов операции от свойства автономности реализуемого метода ГПР.

Автономность метода ГПР – это свойство процесса определения исходных астрономо-геодезических данных (ИАГД), характеризующее зависимость качества результатов процес-

са ГПР (в первую очередь качества целевого эффекта) от внешней информации [4], необходимой для обеспечения требуемой точности геодезических определений.

Исходную геодезическую информацию для решения задачи ГПР можно разделить на внешнюю и внутреннюю. Внешняя информация – это информация, получаемая от внешних источников и систем (кодовые и фазовые измерения от радионавигационных систем, данные геодезических каталогов, сигналы точного времени, азимутальные и зенитальные измерения светил и т.д.) [4]. Внутренняя информация – данные измерений, получаемые без привлечения внешних систем (длины линий, углы, составляющие скорости и ускорения и т.п.) [4].

Учтем влияние внешней и внутренней информации на результат операции ГПР, разложив погрешность $\mu_{\text{гир}}$ определения азимута при одном измерении на составляющие погрешности $\mu_{\text{внут}}$ и $\mu_{\text{внеш}}$, обусловленные наличием внутренней и внешней информации:

$$m_N = \sqrt{\mu_{\text{внеш}}^2 + \mu_{\text{внут}}^2} \frac{K_n K_N}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\tau_n}{\tau_n}}. \quad (5)$$

Выражение (5) определяет функциональную зависимость целевого эффекта m_N от уровня автономности метода ГПР.

При применении метода гироскопического ориентирования (по способу точек реверсий) входной информацией является место Севера M_N и направление M на ориентируемый пункт. Тогда СКП $\mu_{\text{гир}}$ определения азимута при одном измерении составит

$$\mu_{\text{гир}} = \sqrt{\mu_{MN}^2 + \mu_M^2}, \quad (6)$$

где μ_{MN} – СКП определения места Севера M_N при одном измерении;

μ_M – СКП определения направления на ориентируемый пункт при одном измерении.

Место Севера M_N определяется как положение динамического равновесия N_0 , исправленное поправкой ΔN за нуль-пункт и приборной поправкой Δ [10]. Если не наступила необходимость калибровки гиротеодолита [10, 11, 12] (определения приборной поправки), то внешней информацией является поправка ΔN , так как она является функцией периода свободных колебаний чувствительного элемента и широты пункта установки прибора. В случае, когда есть возможность получения значения широты места наблюдения с достаточной точностью (скалывание с карты или определение широты места самим прибором и т.п.) все перечисленные величины являются внутренней информацией, т.е. для определения азимутов гироскопическим методом вся входная информация будет являться внутренней.

С учетом формулы (6) зависимость (5) целевого эффекта m_N от внешней и внутренней информации примет вид

$$m_N = \sqrt{\mu_{MN}^2 + \mu_M^2} \frac{K_n K_N}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\tau_n}{\tau_n}}. \quad (7)$$

При отсутствии необходимости учета автономности метода ГПР суммарную СКП $\mu_{\text{гир}}$ определения азимута не следует разлагать на составляющие и применять выражение (4).

Так как целью процесса ГПР является обеспечение к заданному сроку в любой точке удаленного района возможности определения координат объектов с точностью не хуже требуемой [4], качество результатов ГПР целесообразно характеризовать случайным вектором $\langle \hat{\epsilon}, \hat{\tau} \rangle$, где $\hat{\tau}$ – время, затрачиваемое на операцию ГПР; $\hat{\epsilon}$ – погрешность определения азимута (отклонение определенного по результатам измерений значения азимута от его истинного значения).

При реализации процесса ГПР гироскопическим методом погрешность $\hat{\varepsilon}$ определения азимута ГТК можно представить как модуль разности полученного (определенного) значения азимута \hat{a} направления и истинного значения a_0 азимута этого направления:

$$\hat{\varepsilon} = |\hat{a}(n, N) - a_0|. \quad (8)$$

Значения азимутов направлений определяют как среднее арифметическое значений азимутов, полученных по данным равноточных измерений (при условии, что каждым прибором выполнено равное число измерений):

$$\hat{a}(n, N) = \frac{\sum_{i=1}^{nN} \hat{a}_i}{nN}. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) следует, что

$$\hat{\varepsilon} = \left| \frac{\sum_{i=1}^{nN} \hat{a}_i}{nN} - a_0 \right|, \quad (10)$$

где a_0 – истинное (контрольное или эталонное) значение азимута этого направления.

В каждом i -м измерении полученный азимут a_i направления можно представить в виде суммы:

$$a_i = a_0 + \hat{\varepsilon}_i. \quad (11)$$

где $\hat{\varepsilon}_i$ – величина погрешности определения азимута при i -м измерении.

Значит, величина модуля погрешности определения азимута ГТК составит

$$\hat{\varepsilon} = \left| \frac{\sum_{i=1}^{nN} (a_0 + \hat{\varepsilon}_i)}{nN} - a_0 \right| = \left| \frac{\sum_{i=1}^{nN} \hat{\varepsilon}_i}{nN} \right|. \quad (12)$$

Значения погрешностей $\hat{\varepsilon}_i$ в каждом i -м измерении неизвестны (случайны). При проведении геодезических измерений следует полагать, что случайная погрешность геодезических определений, в том числе определения азимута ГТК, подчинена нормальному закону распределения (ЗР) [1, 2, 13]. Поскольку при моделировании ГПР достаточно абсолютного значения модуля погрешности определения азимута направления, для определения вероятности $P(\hat{\varepsilon} \leq \varepsilon^0)$ следует применить формулу плотности распределения модуля нормальной случайной величины:

$$\varphi_{\hat{\varepsilon}}(\varepsilon) = \frac{1}{m_N \sqrt{2\pi}} \left[\exp \frac{-(\varepsilon - M[\hat{\varepsilon}])^2}{2m_N^2} + \exp \frac{-(\varepsilon + M[\hat{\varepsilon}])^2}{2m_N^2} \right] \Delta(\varepsilon). \quad (13)$$

Тогда функцию распределения модуля нормальной случайной величины запишем в виде выражения

$$F_{\hat{\varepsilon}}(\varepsilon) = P(\hat{\varepsilon} \leq \varepsilon) = \frac{1}{2} \left[\Phi_1 \left(\frac{\varepsilon - M[\hat{\varepsilon}]}{\sqrt{2}m_N} \right) + \Phi_1 \left(\frac{\varepsilon + M[\hat{\varepsilon}]}{\sqrt{2}m_N} \right) \right] \Delta(\varepsilon), \quad (14)$$

где $\Delta(\varepsilon)$ – селектор луча $[0, \infty)$, $\Delta(\varepsilon)=1$ при $\varepsilon \geq 0$, $\Delta(\varepsilon)=0$ при $\varepsilon < 0$;
 Φ_1 – функция Лапласа.

Временные затраты на выполнение геодезических работ могут возрасти на величину времени τ_3 задержки. Обычно причинами временных задержек являются непредвиденные внешние факторы (внешние воздействия) и внутренние факторы (причины) задержек, обусловленные:

- неблагоприятными метеорологическими условиями;
- возможным противодействием противника;
- отказами техники (выход из строя предохранителей, разюстировка и т.д.);
- погрешностями (промахами) наблюдателей при проведении измерений.

В рамках модели ограничимся только рассмотрением задержек, обусловленных неблагоприятными погодными условиями и отказами измерительной техники, т.е.

$$\hat{\tau}_3 = \hat{\tau}_{\text{метео}} + \hat{\tau}_{\text{отказ}}, \quad (15)$$

где $\tau_{\text{метео}}$ – временная задержка, обусловленная неблагоприятными погодными условиями;
 $\tau_{\text{отказ}}$ – временная задержка, связанная с отказом приборов и ошибками наблюдателей.

Причины задержек носят случайный характер, как следствие, моменты времени появления задержек и их длительность будут также случайными величинами. Поскольку при хорошо организованном процессе ГПР чем временная задержка $\hat{\tau}_3$ больше, тем вероятность ее появления меньше, то для описания вероятного поведения случайной величины $\hat{\tau}_3$ целесообразно использовать экспоненциальный ЗР:

$$\varphi_{\hat{\tau}_3}(\tau) = \lambda e^{-\lambda(\tau-\tau')} \Delta(\tau-\tau'). \quad (16)$$

Здесь $\Delta(\tau-\tau')$ – селектор луча $[\tau', \infty)$,

$$\Delta(\tau-\tau') = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau < \tau' \\ 1 & \text{при } \tau \geq \tau' \end{cases},$$

где τ' – технологически необходимые затраты времени на априорные расчеты, проверку аппаратуры и т.п.;

λ – интенсивность появления временных задержек.

Величину λ можно определить как величину, обратную величине математического ожидания случайной величины $\hat{\tau}_3$. Тогда затраты операционного времени $\hat{\tau}$ на проведение операции ГПР определяются выражением

$$\hat{\tau} = \tau_n + \hat{\tau}_3 = n\tau_n + \hat{\tau}_3, \quad (17)$$

а закон распределения случайной величины $\hat{\tau}$ имеет следующий вид:

$$\varphi_{\hat{\tau}_3}(\tau) = \lambda e^{-\lambda(\tau-\tau'-\tau_n)} \Delta(\tau-\tau'-\tau_n), \quad (18)$$

где τ_n – затраты времени на производство всех необходимых измерений.

МОДЕЛЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ГИРОТЕОДОЛИТНЫХ РАБОТ

Поскольку в процессе ГПР в ходе операции расходуются все имеющиеся ресурсы, то имеет место эффект поглощения по ресурсам, в результате чего $\hat{\varepsilon} = \varepsilon(\hat{r}_n)$, $\hat{\tau} = \tau(\hat{r}_n)$, где \hat{r}_n – пре-

дельно допустимый расход ресурсов \hat{r} . Поэтому показателем качества результатов является вектор $\hat{Y}_{(2)} = \langle \hat{\varepsilon}, \hat{\tau} \rangle$ и операционный функционал имеет вид

$$\begin{cases} \varepsilon = 2,5m_N = 2,5K_n K_N \frac{\mu_N}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\tau_n}{\tau_n}}; \\ \hat{\tau} = \tau_n + \hat{\tau}_3. \end{cases} \quad (19)$$

В выражении (19) коэффициент 2,5 определен переходом от СКП m_N определения азимута направления к предельной погрешности ε определения азимута направления.

В теории эффективности ЦнП [3] доказано, что при исследовании систем и целенаправленных процессов их функционирования наиболее объективным показателем качества системы является показатель эффективности операции – вероятность выполнения задачи (достижения цели) $P_{\text{ДЦ}}$, стоящей перед системой (вероятность пригодности результатов операции).

Значение показателя эффективности процесса выполнения гиротеодолитных работ – вероятности $P_{\text{ДЦ}}$ достижения цели операции – определяется следующим выражением:

$$P_{\text{ДЦ}} = P\left[\left(\hat{\varepsilon} \leq \varepsilon^\delta\right) \cap \left(\hat{\tau} \leq \tau^\delta\right)\right], \quad (20)$$

где ε^δ – директивные (максимально допустимые) значения величины модуля погрешности;
 τ^δ – директивные затраты времени на определение ИАГД (проведение операции ГПР).

Для проведения прикидочных расчетов и определения оценки сверху значений $P_{\text{ДЦ}}$, определяемой выражением (20), в рамках модели примем допущение, что случайные величины $\hat{\varepsilon}$ и $\hat{\tau}$ взаимно независимы. В этом случае выражение (20) примет вид

$$\tilde{P}_{\text{ДЦ}} = F_{\hat{\varepsilon}}(\varepsilon^\delta) F_{\hat{\tau}}(\tau^\delta), \quad (21)$$

где $\tilde{P}_{\text{ДЦ}}$ – оценка значения показателя $P_{\text{ДЦ}}$ эффективности.

Учитывая формулу (18) функция распределения $F_{\hat{\tau}}(\tau^\delta)$ будет определяться выражением

$$F_{\hat{\tau}}(\tau^\delta) = P(\hat{\tau} \leq \tau^\delta) = (1 - e^{-\lambda(\tau^\delta - \tau' - \tau_n)}) \Delta(\tau - \tau' - \tau_n). \quad (22)$$

Подставив выражения (14) и (21) в (20), получим:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{\text{ДЦ}} = \tilde{P}_{\text{ДЦ}}(\varepsilon^\delta, \tau^\delta) &= F_{\hat{\varepsilon}}(\varepsilon^\delta) F_{\hat{\tau}}(\tau^\delta) = \frac{1}{2} \left(1 - e^{-\lambda(\tau^\delta - \tau' - \tau_n)}\right) \times \\ &\times \left[\Phi_1\left(\frac{\varepsilon^\delta - M[\hat{\varepsilon}]}{\sqrt{2m_N}}\right) + \Phi_1\left(\frac{\varepsilon^\delta + M[\hat{\varepsilon}]}{\sqrt{2m_N}}\right) \right] \Delta(\varepsilon^\delta) \Delta(\tau^\delta - \tau' - \tau_n). \end{aligned} \quad (23)$$

Выражение (23) позволяет получить оценку сверху значения показателя эффективности (ПЭ) $P_{\text{ДЦ}}$ и является моделью ПЭ процесса ГПР. Визуализация зависимости (23) представлена на рис. 1.

Моделирование ЦнП ГПР выполнено для гиротеодолитного комплекта, состоящего из двух приборов ($N=2$) с СКП определения азимутов направлений при одном измерении $\mu_N=10''$, время проведения одного измерения принято равным одному часу, интенсивность появления задержек $\lambda=0,5$.

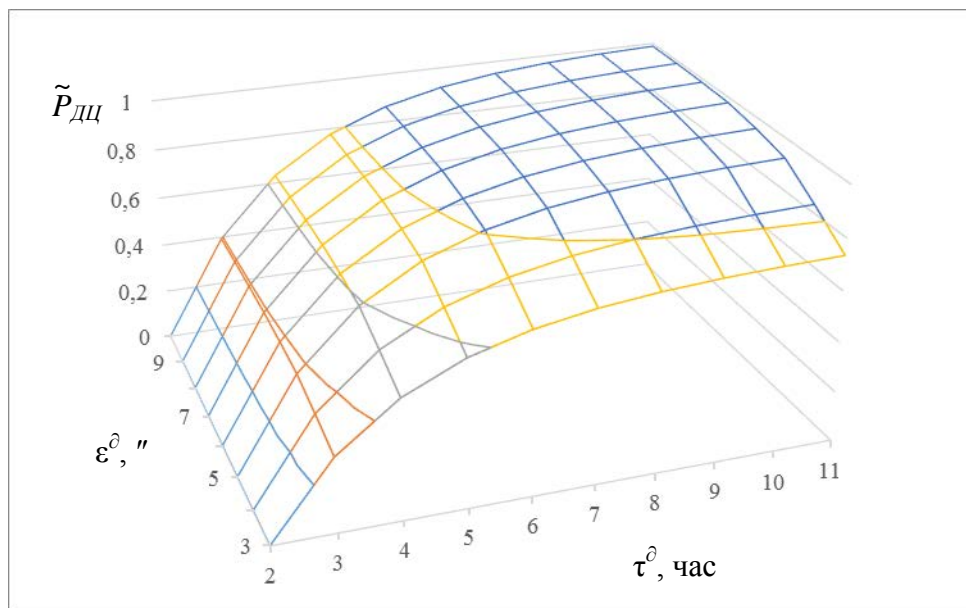


Рис. 1. Зависимости показателя $\tilde{R}_{ДЦ}$ эффективности процесса выполнения гиротеодолитных работ от требований, предъявляемых к его результатам

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обоснован вектор показателей качества результатов гиротеодолитных работ, компонентами которого являются: показатель виртуального качества целевого эффекта гиротеодолитных работ и показатель затрат времени на проведение работ. Все обоснованные показатели, в отличие от традиционно применяемых в практике проектирования геодезических работ, носят вероятностный характер. Это позволяет учесть при оценивании методов ГПР и проектировании ГПР влияние случайных факторов.

Обоснован операционный функционал, связывающий показатель целевого эффекта с затратами ресурсов. Указанный подход позволяет осуществить формализованный выбор метода ГПР, обеспечивающий удовлетворение предъявляемых к его качеству требований. Выполненное моделирование наглядно доказывает работоспособность обоснованного в статье математического аппарата.

Представлена зависимость целевого эффекта от свойства автономности метода ГПР, что позволяет использовать разработанный математический аппарат для поддержки принятия решения на ГПР в условиях автономности (в арктическом регионе или любом другом автономном районе).

Список используемых источников

1. Астапович А.В. Теория математической обработки измерений: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Ч. 1: Ошибки измерений. – 191 с.
2. Голубев В.В. Геодезия. Теория математической обработки геодезических измерений: учебник для вузов. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2016. – 422 с.
3. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.
4. Подход к оцениванию качества геодезического обеспечения удаленного района / И.В. Чернов, В.И. Якунин, В.Ф. Алексеев, А.В. Прокофьев // Труды Военно-космической

академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – Вып. 668. – С. 103–110.

5. *Большаков В.Д.* Теория ошибок наблюдений. – М.: Недра, 1983. – 289 с.

6. Оценка достижимой точности определения азимута на коротком базисе с использованием спутниковых и геодезических средств / А.В. Шолохов, Н.И. Котов, С.Б. Беркович, А.Ю. Махаев // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 6. – С. 2–8.

7. *Чернов И.В.* Модель интегрированной спутниково-гироскопической системы оперативного определения высокоточного азимута // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78, № 7. – С. 2–8.

8. *Чернов, И.В.* Повышение точности определения азимутов с использованием гиротеодолитных комплектов / И.В. Чернов, А.В. Кокорев, В.Д. Сенин, Е.И. Литинский // Информация и космос. – 2018. – № 2. – С. 101–104.

9. *Алексеев В.Ф., Левадный Ю.В., Чернов И.В.* Обоснование эмпирического коэффициента понижения точности гироскопических наблюдений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С. 132–138.

10. *Воронков Н.Н.* Гироскопическое ориентирование: учебник. – М.: ВИА им. В.В. Куйбышева, 1968. – 342 с.

11. *Гусеница Я.Н., Малахов А.В., Новиков А.Н.* Научно-методический подход к комплексному оцениванию эффективности метрологического обеспечения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 7. – С. 330–342.

12. *Чернов И.В.* Методика определения приборной поправки гиротеодолита с заданной точностью // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – Вып. 671. – С. 192–200.

13. *Гаусс К.Ф.* Избранные геодезические сочинения / под общ. ред С.Г. Судакова. – М.: Изд-во геодезической литературы, 1957. – Т.1: Способ наименьших квадратов. – 152 с.

И.В. Абашева*;
М.А. Еремеев**,
доктор техн. наук, профессор;
А.А. Криулин**,
кандидат техн. наук;
В.С. Нефедов**,
кандидат техн. наук;
Г.Ю. Потерпеев**,
кандидат техн. наук;

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

**МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К ЗАДАЧАМ ОБНАРУЖЕНИЯ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В публикации рассматривается подход к обнаружению вредоносного программного обеспечения на основе применения алгоритмов машинного обучения к выборкам различных программ. В рамках подхода формируются признаки вредоносных программ и рассматриваются различные алгоритмы классификации. В результате приводится количественная оценка применения каждого алгоритма, определяются весовые коэффициенты признаков вредоносных программ.

Ключевые слова: машинное обучение, распознавание образов, поиск вредоносного программного обеспечения.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях внедрения вычислительной техники во многие сферы человеческой деятельности возрастает потребность в обеспечении целостности, доступности и конфиденциальности информационных процессов, протекающих в информационно-коммуникационных сетях организаций различного уровня. Инструментом большинства современных компьютерных инцидентов в области информационной безопасности является вредоносное программное обеспечение (ВПО). Создание вредоносного программного обеспечения вирусописателями, с одной стороны, и своевременное обнаружение и нейтрализация таких программ специалистами информационной безопасности, с другой – представляет собой непрерывный, постоянно эволюционирующий процесс. При этом баланс сил между защитными средствами и вредоносными программами никогда не находился в состоянии равновесия. Мощная эпидемия неизвестного ВПО сменяется его полной нейтрализацией и разработкой обновлений и дополнений средств защиты. Непрерывность этого процесса является причиной, по которой необходимо в режиме реального времени поддерживать на высоком уровне требования безопасности, предъявляемые к современным информационным системам. Недостатки существующих методов обнаружения вредоносных программ [1] обуславливают необходимость в применении современных математических методов с целью повышения эффективности работы систем защиты.

Анализ публикаций в области применения классических алгоритмов теории машинного обучения отражает отсутствие системного подхода в решении задачи обнаружения вредоносных программ. За границами исследований остаются вопросы, связанные с влиянием применения методов противодействия средствам обнаружения вторжений, обоснованием выбора математических моделей, отбором качественных признаков и т.д.

ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ К ЗАДАЧАМ ОБНАРУЖЕНИЯ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Началом исследований в области применения машинного обучения можно считать публикацию коллектива научных сотрудников американского колумбийского университета [2]. В рамках исследования авторы использовали несколько алгоритмов для идентификации вредоносных программ по некоторым признакам. Стоит отметить, что в работе [2] предложено небольшое количество эвристических признаков, не обоснован их выбор, отсутствует обоснование параметров для алгоритмов или выбор непосредственно самих алгоритмов. К работам в этой области также можно отнести публикации [3–9]. Недостатками этих работ является отсутствие обоснования математической модели для принятия решения о классификации программы и выбранных признаков, небольшое количество эвристических признаков для классификации, не приводится определение наиболее значимых признаков.

В рамках статьи рассматривается подход по применению алгоритмов машинного обучения для решения задачи распознавания образов двух классов объектов – легитимные программы и вредоносные. Определим множество объектов объемом 1898 программ, состоящее из подмножества известных $x^{\text{ИП}}$ легитимных и вредоносных программ и подмножества неизвестных $x^{\text{НП}}$ легитимных и вредоносных программ. Существует целевая функция вида $u^*: X \rightarrow Y$, значения которой известны только на конечном подмножестве $x^{\text{ИП}}$ и неизвестны для подмножества $x^{\text{НП}}$.

Необходимо построить решающую функцию $l: X \rightarrow Y$, которая приближала бы целевую функцию $u^*(x)$ на все множество X , включая подмножество $x^{\text{НП}}$. В рамках теории машинного обучения решающую функцию l будем называть моделью алгоритма классификации или алгоритмом машинного обучения.

В качестве образцов программ для формирования выборки X были взяты исполняемые файлы из операционной системы Windows и исполняемые файлы с интегратора VirusTotal.

Обозначим признаком f объекта из множества X характеристику исполняемого файла $f: X \rightarrow D_{\langle f \rangle}$, где $D_{\langle f \rangle}$ – вектор признаков объекта. Из возможных типов признакового описания объекта [10] выделим типы, подходящие к исполняемым файлам:

- $D_{\langle f \rangle} = \{0, 1\}$ – вектор бинарных признаков;
- $D_{\langle f \rangle}$ – вектор количественных признаков.

В рамках исследования в качестве количественных признаков выбраны: число импортируемых функций – f_1 , значение энтропии исполняемого файла – f_2 , размер файла – f_3 , размер исполняемого кода – f_4 , размер инициализированных данных – f_5 , число директорий данных – f_6 , размер секции ресурсов – f_7 , число секций – f_8 , число машинных инструкций «XOR» – f_9 , «CALL» – f_{10} , «JMP» – f_{11} , «MOV» – f_{12} , «PUSH» – f_{13} , «RETN» – f_{14} и другие. К бинарным признакам относятся: наличие нескольких исполняемых секций – f_{15} , отсутствие контрольной суммы – f_{16} , наличие неучтенных данных (overlay) – f_{17} , несоответствие времени сборки программы версии компоновщика и сведениям из RICH данных – f_{18} , наличие подозрительных API функций – f_{19} , отсутствие функций из стандартных библиотек – f_{20} и др. В табл. 1 и 2 приведены основные дескриптивные характеристики выборки вредоносных и легитимных программ: среднее значение (mean), стандартное отклонение (std), максимальное (max) и минимальное (min) значения.

Запишем совокупность признаковых описаний всех объектов выборки в виде таблицы размера $m \times n$ – матрицы объектов-признаков:

$$F = \|f_i(x_i)\|_{m \times n} = \begin{pmatrix} f_1(x_1) & & f_n(x_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ f_1(x_m) & & f_n(x_m) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

которая отражает исходные данные.

В задачах машинного обучения по числовым признакам $f_i: X \rightarrow R$, $i = 1, \dots, n$ применяются линейные модели алгоритмов вида $l = \{g(x, \theta)\}$, $l \in L$; $\theta \in \Theta$ с вектором параметров [10]:

$$g(x, \theta) = \text{sign} \sum_{i=1}^n \theta_i f_i(x), \quad (2)$$

где g – некоторая функция алгоритма $g : X \times \Theta \rightarrow Y$;
 Θ – множество допустимых значений параметра Θ алгоритма.

Таблица 1

Значения характеристик признаков для легитимного ПО

| Дескриптивные хар-ки выборки | f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 | f_6 | f_8 | f_{10} | f_{11} |
|------------------------------|--------|--------|----------|----------|----------|-------|-------|----------|----------|
| mean | 95.357 | 5.965 | 13838.71 | 97332.87 | 44767.89 | 7.68 | 4.03 | 33.9 | 25.6 |
| std | 71.297 | 0.877 | 15537.54 | 1.20e+05 | 81557.60 | 1.590 | 0.918 | 15.06 | 14.80 |
| max | 540 | 7.5937 | 776192 | 648704 | 679936 | 10 | 12 | 119 | 152 |
| min | 0 | 0.8309 | 2048 | 0 | 1536 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Таблица 2

Значения характеристик признаков для вредоносного ПО

| Дескриптивные хар-ки выборки | f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 | f_6 | f_8 | f_{10} | f_{11} |
|------------------------------|---------|--------|-----------|----------|----------|-------|-------|----------|----------|
| mean | 117.799 | 6.410 | 546386.06 | 46243.2 | 408077.5 | 4.35 | 4.77 | 32.0 | 13.1 |
| std | 117.91 | 1.107 | 858928.5 | 8.75e+06 | 988987.7 | 1.47 | 1.72 | 31.1 | 15.34 |
| max | 600 | 8.0000 | 13370880 | 26848874 | 13362176 | 9 | 20 | 134 | 136 |
| min | 0 | 0.4834 | 5651 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

ВЫБОР АЛГОРИТМА КЛАСИФИКАЦИИ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Определим для нашей задачи множество l решающих алгоритмов вида (2):

- метод ближайших соседей;
- метод опорных векторов;
- деревья решений;
- случайный лес;
- наивный Байес;
- логистическая регрессия;
- нейронная сеть.

Параметры алгоритмов и их значения по-разному отражаются на качестве классификации. Для алгоритмов из множества l необходимо определить значения параметров θ из всего множества Θ допустимых значений. Например, для работы метода ближайших соседей важными параметрами могут быть количество соседей для классификации, выбор параметрической метрики (Минковского, Чебышева, Евклида, Манхэттена) и другие параметры.

Процесс подбора параметров θ для модели $l = g(x, \theta)$ алгоритма классификации по обучающей выборке $X(x_i^{\text{ИП}}, y_i^{\text{ИП}})_{i=1}$ является процессом обучения $\mu = l(X)$ алгоритма классификации и может быть выполнен перебором по сетке GridSearch [11].

Разобьем выборку объектов X^l на две непересекающиеся подвыборки: $X^l = X_n^m \cup X_n^k$ одним из методов скользящего контроля [10]. Обучающая подвыборка $X_n^m \in X^l$ имеет длину $m=1518$, а контрольная подвыборка $X_n^k \in X^l$ имеет длину $k=380$. Для оценки репрезентативности получившихся подвыборок в табл. 3 и 4 приведены их основные дескриптивные характеристики.

Как видно из табл. 3 и 4, значения основных показателей для обучающей и контрольной выборок практически совпадают, что говорит о качественном разбиении выборки объектов X^l методом кросс-валидации.

Таблица 3

Статистические характеристики обучающей подвыборки

| Дескриптивные хар-ки выборки | f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 | f_6 | f_8 | f_{10} | f_{11} |
|------------------------------|--------|-------|----------|-----------|-----------|-------|-------|----------|----------|
| mean | 106.64 | 6.175 | 3.33e+05 | 3.197e+05 | 2.257e+05 | 6.03 | 4.4 | 33.0 | 19.1 |
| std | 98.4 | 1.00 | 6.50e+05 | 6.92e+06 | 7.47e+05 | 2.25 | 1.39 | 24.754 | 16.1 |
| max | 600.0 | 8.00 | 1.33e+07 | 2.68e+08 | 1.36e+07 | 10.0 | 13.0 | 132.0 | 152 |
| min | 0 | 0.483 | 2.04e+03 | 0 | 0 | 1.00 | 1.0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 39.00 | 5.80 | 5.30e+04 | 1.74e+04 | 9.72e+03 | 4.00 | 4.00 | 15.00 | 7.00 |
| 0,50 | 89.50 | 6.31 | 1.50e+05 | 6.29e+04 | 4.14e+04 | 7.0 | 4.00 | 31.0 | 17.0 |
| 0,75 | 136.00 | 6.62 | 3.02e+05 | 1.41e+05 | 1.22e+05 | 8.00 | 5.00 | 45.00 | 28.7 |

Как правило, на разнородных выборках различные алгоритмы показывают схожие результаты, но с разной степенью точности. После тренировки алгоритмов на обучающей выборке выполняется контрольная проверка результатов классификации на тестовой выборке. Для оценки точности классификации для каждого алгоритма l рассчитывается матрица ошибок, основными показателями в которой являются:

1) число истинно положительных решений (true positive), т.е. если ВПО отнесено к классу вредоносных программ;

2) число истинно отрицательных решений (true negative), т.е. если ВПО не отнесено к классу легитимных программ;

3) число ложно положительных решений (false positive), т.е. если ПО отнесено к классу вредоносных программ;

4) число ложно отрицательных решений (false negative), т.е. если ДПО отнесено к классу легитимных программ.

На основе матрицы ошибок определяются показатели качества классификации, такие как точность, полнота, чувствительность. Качество бинарной классификации также может оцениваться более комплексными показателями, например средним гармоническим или F -мерой, коэффициентом корреляции Мэттьюса и др. Для дальнейшего анализа качества работы алгоритмов l из множества воспользуемся показателями чувствительности и специфичности:

1) чувствительность $TPR = TP / TP + FN$ – число правильно классифицированного ВПО от общего числа вредоносных программ;

Таблица 4

Статистические характеристики контрольной подвыборки

| Дескриптивные хар-ки выборки | f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 | f_6 | f_8 | f_{10} | f_{11} |
|------------------------------|--------|-------|----------|----------|-----------|-------|-------|----------|----------|
| mean | 106.32 | 6.236 | 3.79e+05 | 1.27e+05 | 2.292e+05 | 5.98 | 4.36 | 33.03 | 20.4 |
| std | 96.7 | 1.09 | 6.48e+05 | 2.06e+06 | 6.247e+05 | 2.29 | 1.55 | 23.48 | 16.9 |
| max | 499.0 | 7.99 | 3.81e+07 | 2.35e+08 | 8.47e+07 | 9.0 | 16.0 | 134.0 | 111 |
| min | 0 | 1.397 | 2.48e+03 | 0 | 0 | 1.00 | 1.0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 37.00 | 5.87 | 5.97e+04 | 1.72e+04 | 1.07e+03 | 4.00 | 4.00 | 16.00 | 7.00 |
| 0,50 | 87.50 | 6.34 | 1.68e+05 | 6.14e+04 | 5.19e+04 | 7.0 | 4.00 | 32.0 | 18.0 |
| 0,75 | 148.00 | 6.71 | 3.71e+05 | 1.35e+05 | 1.28e+05 | 8.00 | 5.00 | 44.00 | 31.0 |

2) специфичность $FPR = FP / FP + TN$ – число неправильно классифицированного ВПО от общего числа легитимных программ.

На основе полученных показателей качества бинарной классификации для каждого алгоритма l построим ROC-кривую. На рис. 1 приведены графики ROC-кривых для каждого алгоритма. ROC-кривая для идеальной модели алгоритма будет проходить через левый верхний угол графика на рис. 1, где доля правильно классифицированного ВПО составляет 100%, а доля неправильно классифицированного ВПО равна нулю.

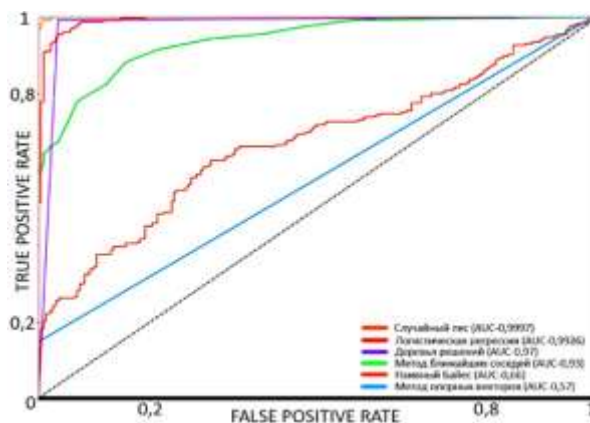


Рис. 1. Графики ROC-кривой для множества алгоритмов

Для сравнения моделей алгоритмов применяется количественный показатель площади под ROC-кривой – AUC. Наиболее пригодным алгоритмом для классификации данной выборки будет считаться тот, значение AUC показателя которого будет стремиться к единице. Непригодность алгоритма машинного обучения для данной выборки будет характеризовать показатель AUC, значение которого приблизительно равно 0,5. Из анализа графиков ROC-кривой, показанных на рис. 1, следует, что наиболее пригодным алгоритмом для принятия решений классификации является «случайный лес».

Важным этапом в классификации программного обеспечения алгоритмами машинного обучения является определение наиболее значимых признаков для принятия решения. Вектор значимых признаков выполняется путем определения весового коэффициента каждого признака из матрицы F файлов-признаков. В понятиях теории вычислительного обучения вектор $Y <r>$ значимых (управляемых) признаков $f_i(x_i)$ объектов выборки составляют те, которые обеспечивают наибольший информативный прирост. Для определения наибольшего информативного прироста существуют различные методы [10]. Как отмечено в [10], для отбора признаков, обеспечивающих наибольший информативный прирост на практике, используют метод дисперсионного анализа. С помощью дисперсионного анализа определяется наличие статистически значимой взаимосвязи между каждым признаком $f_i(x_i)$ и зависимой переменной y_i , определяющей класс объекта из множества X. При этом дисперсионный анализ признаков $f_i(x_i)$ может быть выполнен методом Фишера с разложением совокупной дисперсии всех значений признака f_i на внутригрупповую и межгрупповую дисперсии или с использованием корреляционной матрицы.

На рис. 2 показано графическое отображение корреляционной матрицы для признаков $f_i(x_i)$, обладающих наибольшей зависимостью на переменную y_i (на рисунке обозначена как категория).

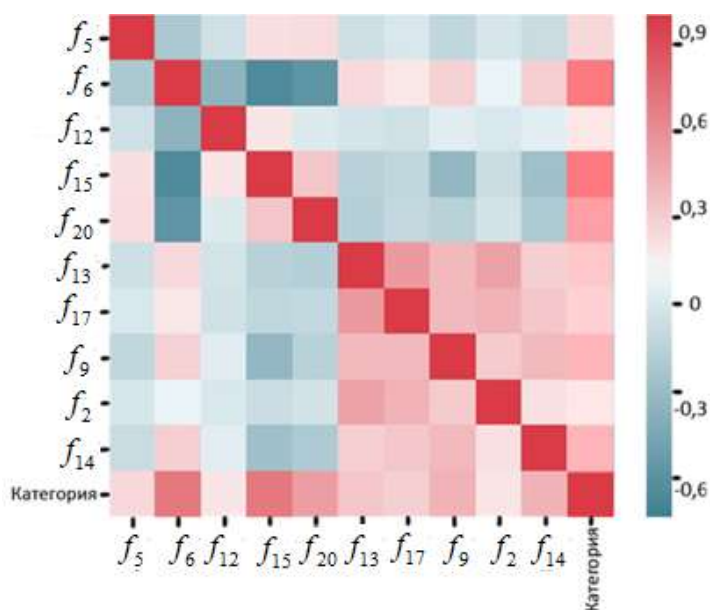


Рис. 2. Графическое отображение корреляционной матрицы признаков

Стоит отметить, что для алгоритма «случайный лес», который оказался наиболее пригодным для классификации объектов из данной выборки, вектор значимых признаков рассчитывается на основе показателя информационного прироста:

$$IG(f) = S_0 - \sum_{i=1}^q \frac{|N_i|}{N} S_i, \quad (3)$$

где f – признак из матрицы F;

q – число классов после разбиения всей выборки по признаку;
 N_i – число элементов выборки, у которых признак f имеет i -тое значение;
 S – информационная энтропия, определяемая по формуле Шеннона.

Наиболее высокие значения IG информационного прироста для признаков из матрицы F , полученные на основе применения алгоритма «случайный лес», представлены диаграммой на рис. 3.

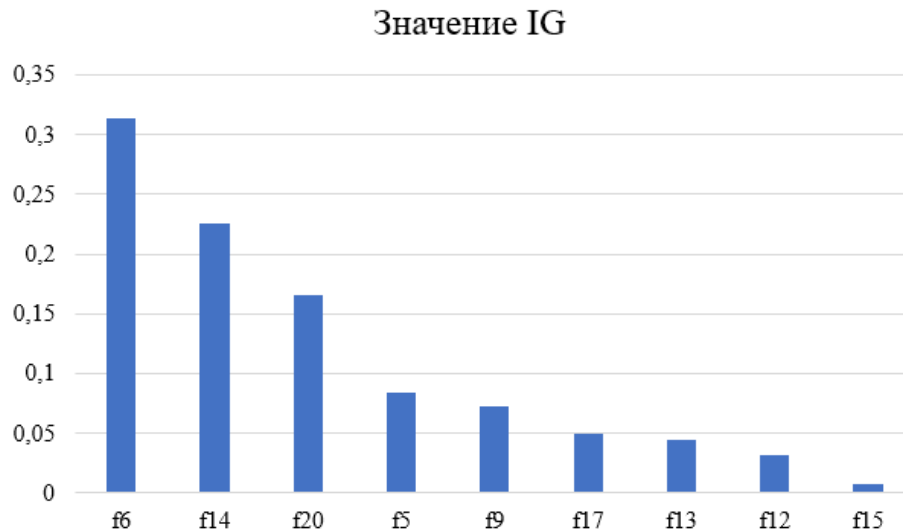


Рис. 3. Диаграмма значений информационного прироста признаков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сравнения наиболее значимых признаков, полученных с использованием корреляционной матрицы и на основе информационного прироста, видно, что практически все они совпадают, что говорит об адекватности признаков для обнаружения вредоносного программного обеспечения. Из анализа рис. 2 и 3 можно заметить, что наиболее значимыми признаками оказались число директорий данных исполняемого файла, число инструкций «RETN» и отсутствие в импорте исполняемого файла функций из стандартных библиотек.

Реализация рассмотренного в статье подхода выполнена с использованием библиотек машинного обучения на языке высокого уровня Python. Предложенный подход к обнаружению вредоносного программного обеспечения на основе применения алгоритмов машинного обучения может быть использован как часть системы по обнаружению и предотвращению вторжений.

Список используемых источников

1. Климентьев К.Е. Компьютерные вирусы и антивирусы: взгляд программиста. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 656 с.
2. Data Mining Methods for Detection of New Malicious Executables / M.G. Schultz, E. Eskin, E. Zadok, S.J. Stolfo // In Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy. – Oakland, CA, 2001. – P. 38–49.
3. J. Yont Attributes of Malicious Files. – SANS Institute InfoSec Reading Room, 2013. – 28 p.
4. Y. Liao PE-Header-Based Malware Study and Detection. – Department of Computer Science The University of Georgia, Athens, 2015. – 4 p.

5. PE-Miner: Mining Structural Information to Detect Malicious Executables in Realtime / Shafiq M., Zubair and Tabish, S. Momina and Mirza, Fauzan and Farooq, Muddassar // In Proceedings of the 12th International Symposium on Recent Advances in Intrusion Detection, RAID '09. – Saint-Malo, France, 2009. – P. 121–141.

6. Комашинский Д.В., Котенко И.В., Шоров А.В. Подход к обнаружению вредоносного программного обеспечения на основе позиционно-зависимой информации // Труды СПИИРАН. – 2009. – №10. – С. 132–147

7. An intelligent pe-malware detection system based on association mining / Ye Y., Wang D., Li T., Ye D., Jiang Q.J. // Comput. Virol. – 2008. – 4 (4). – P. 323–334.

8. Wang T.-Y., Wu C.-H., Hsieh C.-C. Detecting unknown malicious executables using portable executable headers // In: INC, IMS and IDC, 2009. NCM'09. Fifth International Joint Conference on. IEEE, 2009. – P. 278–284.

9. Walenstein A., Hefner D.J., Wichers J. Header information in malware families and impact on automated classifiers. In: Malicious and Unwanted Software (MALWARE), 2010 // 5th International Conference on. IEEE, 2010. – P. 15–22.

10. Воронцов К.В. Вычислительные методы обучения по прецедентам. – М.: МГУ, 2011. – 135 с.

И.А. Соловьев;
М.В. Соловьева;
Н.А. Трофимова

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДОСТУПА К УДАЛЕННЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ РЕСУРСАМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СКВОЗНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА SAML

В публикации представлены результаты анализа особенностей процедур применения SAML-стандарта, спецификации и потенциальных дефектов XMLDSig-стандарта с выявлением факторов, характеризующих уязвимость SAML-протокола. На основании полученных результатов определена комплексная модель безопасности SSO-инфраструктуры и дано обоснование модели реализации XSW-угроз, оригинальным моделям XSW-нарушителей различных типов, а также событию успешности XSW-атаки на процедуру применения протокола SAML.

Ключевые слова: язык разметки SAML, сквозная аутентификация, сценарии «единого входа», XML-документ, SAML-протокол, XSW-уязвимости, XSW-атака, модель XSW-угроз и XSW-нарушителя.

ВВЕДЕНИЕ

Динамичное внедрение сервисных концепций SaaS, PaaS, IaaS (Software/Platform/Infrastructure as a Service) в сферу облачных услуг управления политиками доступа, а также технологий строгой аутентификации веб-приложений создает значительную нагрузку на соответствующие IT-подразделения организаций. Использование облачных приложений в корпоративном окружении, как правило, не предусматривает централизованных инструментов управления доступом к веб-сервисам и механизмов их эффективного масштабирования. Это, в свою очередь, приводит к появлению специфичных угроз информационной безопасности (ИБ) в процессе работы с удаленными информационными ресурсами (ИР). В складывающихся условиях в качестве дополнительного периметра безопасности предлагается использовать учетные записи пользователей, а для работы с таким периметром – технологии, основанные на стандартах применения сквозной аутентификации.

Язык разметки SAML (Security Assertion Markup Language) – открытый стандарт на основе XML для обмена данными аутентификации и авторизации в форме утверждений безопасности, обеспечивающий возможность использовать их формат вне конкретного протокола в различных сервисах. SAML позволяет использовать корпоративные учетные записи пользователей в облачных приложениях за счет синхронизации с системами хранения учетных записей на базе MS SQL или Active Directory и является важнейшим компонентом для разработки сценариев единого входа (Single Sign-On, SSO). SAML-утверждения применяются в качестве маркеров безопасности в сценариях WS-Security на базе протокола SOAP (Simple Object Access Protocol), в SSO на основе архитектурного стиля REST (Representational State Transfer), где наиболее важным является профиль Browser SSO, определяющий использование SAML веб-браузером [1].

Вместе с тем, благодаря гибкости и широкой поддержке новых сценариев применения SAML для организации сквозной аутентификации, SSO-инфраструктуры могут также стать единой «точкой входа» при проведении компьютерных атак нарушителем. Принимая во внимание тот факт, что стандарт SAML 2.0 используется в Единой системе идентификации и аутентификации (ЕСИА) для обеспечения санкционированного доступа участников информационного взаимодействия к информации, содержащейся в государственных (муниципаль-

ных) информационных системах или предоставляемой веб-сервисами государственных услуг [2], анализ возможностей безопасного применения конструкций языка SAML для реализации сценариев «единого входа» представляется исключительно актуальной задачей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕДУР ПРИМЕНЕНИЯ SAML

Для поддержки совместимости протоколов (в особенности SOAP) в XML-документах используется расширяемая модель контейнера – XML-схема, описывающая структуру документа и взаимосвязь элементов, обеспечивающая добавление необязательных элементов и/или атрибутов. В таких расширяемых документах, считающихся правильными (*well-formed*),

допустима конструкция `<xs:any>`, называемая групповым символом (*wildcard*). Данная конструкция связывает универсальный URI-идентификатор IP с именем XML-элемента (атрибута), позволяя избежать конфликта имен. Таким образом, XML-документ может содержать дополнительные элементы, не декларируемые в основной XML-схеме. Благодаря этому можно четко определять точки расширения документов, а XML-процессоры (обработчики), реализуя функцию нестрогой проверки их допустимости, могут игнорировать не определенные для них расширения. Для этого элементу (обозначенному как *any*), назначается атрибут *processContents*, определяющий уровень гибкости его проверки XML-процессором. Значение `<lax>` данного атрибута указывает валидатору XML-схемы на проверку в отношении представленного пространства имен и, если информация о XML-схеме отсутствует, содержимое считается действительным. Если *processContents = skip*, XML-процессор не проверяет данный элемент.

Семантика XML-документа предполагает наличие механизма замещения соответствующих типов данных в условиях априорно неопределенного и динамически дополняемого содержимого документа в процессе информационного взаимодействия различных объектов (серверов, приложений).

Стандарт SAML 2.0 определяет основанный на XML каркас для обмена информацией, относящейся к безопасности, в частности, при реализации аутентификации. Такая информация представлена в форме SAML-утверждений, которым приложения, выполняющиеся в разных доменах безопасности, могут доверять [3]. Стандарт SAML определяет строгий синтаксис и правила для запроса, создания, взаимодействия и использования утверждений, а также механизм подтверждения (XMLDSig) для реализации сквозной аутентификации.

Модель SAML-аутентификации (рис. 1) включает в себя поставщика удостоверений (*identity provider, IdP*), который выдает подтвержденные SAML-утверждения (*saml-assertions*), в роли такого поставщика может выступать, например, *SafeNet Authentication Service*, и полагающуюся сторону (*relying party, RP*), то есть поставщика услуг, который принимает эти утверждения (например, *Google Apps, Office 365* или любое другое облачное приложение, поддерживающее SAML). SAML-утверждение представляет собой элемент XML-документа, содержащий подписанные издателем (*issuing authority*) заявления (*claims*), в виде высказываний, содержащих данные об атрибутах аутентификации и авторизации объекта. Данные токены безопасности, являющиеся делегированной IdP аутентификацией пользователей и авторизацией приложений, с информацией о полномочиях объекта, заинтересованного в доступе к целевому ресурсу RP, поставщики услуг используют в технологиях контроля доступа.

Поскольку SAML-утверждения содержат критические данные об объекте аутентификации, их обоснованность должна быть подтверждена со стороны IdP. Это достигается представлением поставщиком удостоверений их цифровых подписей XMLDSig-стандарта для безопасности уровня сообщений. На транспортном уровне ИБ обеспечивается применением механизмов SSL 3.0/TLS.

Стандарт XMLDSig описывает порядок и правила подписи XML-документа в целом (обволакивающая подпись) и/или его элементов (окутанная подпись) [4]. Его применение определяется необходимостью подтверждения полномочий взаимодействующих объектов и сохранения целостности получаемых сообщений, проходящих через несколько посредников, где один XML-документ может быть подписан несколькими подписями, что, например, не поддерживается при использовании протоколов HTTPS (SSL).

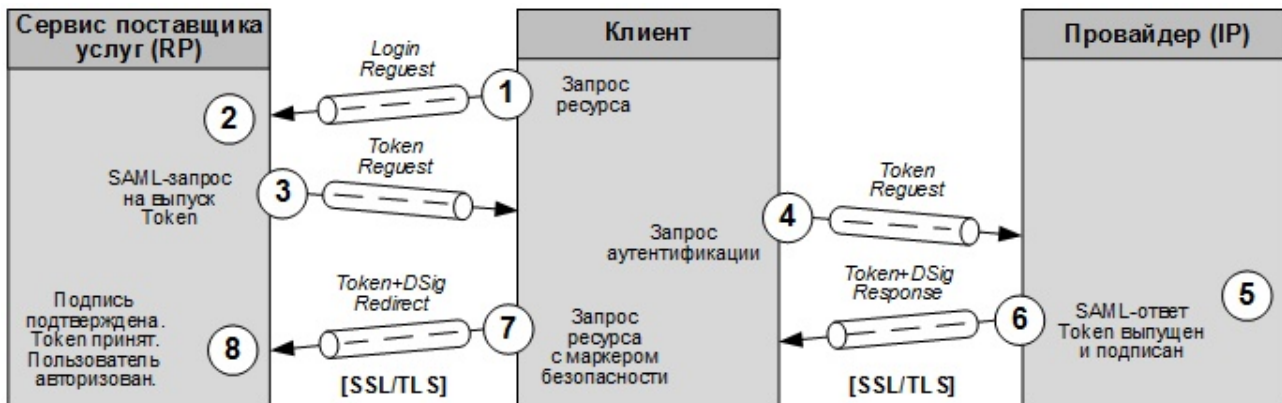


Рис. 1. Модель SAML-аутентификации

В SOAP-средах SAML-утверждение инкапсулируется в заголовок (Header), содержащий атрибуты (безопасности или маршрутизации) сообщения, и удостоверяется с помощью окутанной подписи, которая ссылается только на отдельные его элементы, например элемент Body, содержащий запрос на использование веб-ресурса (или нескольких локальных, глобальных IP) с параметрами, которые будут обрабатываться веб-сервисом.

В средах, основанных на REST, SAML-утверждение инкапсулируется в обволакивающий элемент, то есть помещается в корневой элемент *R* и также удостоверяется с помощью окутанной подписи.

Таким образом, спецификация SAML требует [3], чтобы либо элемент *saml-assertion*, либо элемент его предка, ссылались на элемент *Signature* с окутанной подписью XMLDSig-стандарта. Кроме того, необходимо использовать Id-ссылки, так как в XML-документе подписи связаны с локальными объектами данных через идентификаторы. Пример использования SAML-утверждений в средах, основанных на SOAP/REST, представлен на рис. 2.

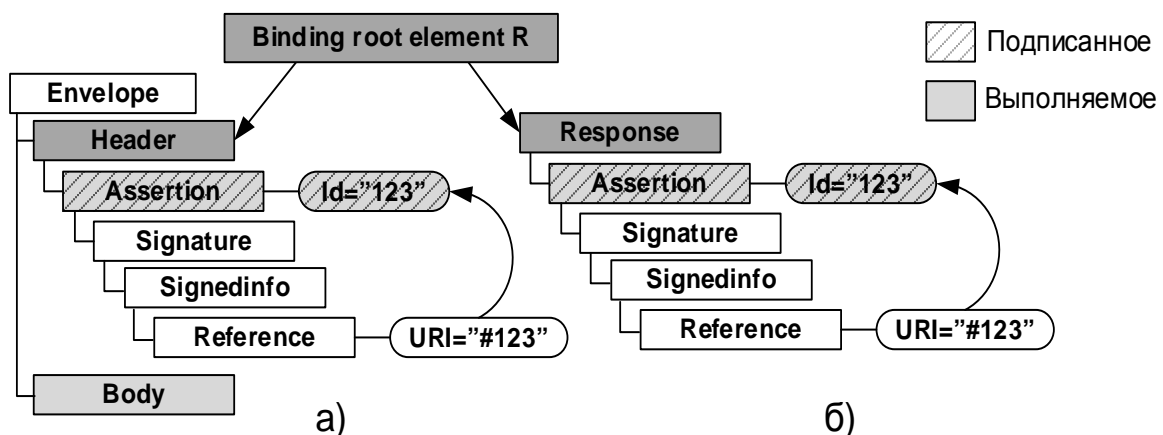


Рис. 2. Пример использования SAML-утверждений в SOAP (а) и REST (б) средах

Подтверждение подписью SAML-утверждения в XML-документе реализуется элементом *Signature*, типовая структура которого представлена на рис. 3.

Каждый подписанный к использованию ресурс представлен элементом `reference` в элементе SAML-утверждения `SignedInfo`. Хэш-значение ресурса размещается в элементе `DigestValue` с указанием используемого алгоритма хеширования в элементе (`DigestMethod`) и URI-ссылкой на него, хранимой в `reference URI`. Элемент `transforms` определяет последовательность шагов необходимых преобразований данных перед подсчетом их хэш-суммы. Таким образом, `SignedInfo` – это набор значений хэшей и URI, подписанных к использованию ИР.

Элемент `SignedInfo` приводится к каноническому виду методом преобразований, представленным в элементе `CanonicalizationMethod` и защищается цифровой подписью (ЭЦП) с использованием асимметричного шифрования. В элементе `KeyInfo` содержится соответствующая ключевая информация подписи, используемая второй стороной информационного обмена. Значение ЭЦП в формате base64-строки размещается в элементе `SignatureValue`.

```

<Signature ID?>
  <SignedInfo> / потомок 1 уровня - описание подписи
    <CanonicalizationMethod/>
    <SignatureMethod/>
    (<Reference URI?> / потомок 2 уровня - указатель на подписанный элемент
      (<Transforms>)? / потомок 3 уровня - вид преобразования перед подсчетом
        хеша
        <DigestMethod> / потомок 3 уровня - алгоритм хеширования
        <DigestValue> / потомок 3 уровня - хэш-значение подписанного элемента
    </Reference>)+ / конец списка подписанных элементов
  </SignedInfo>
  <SignatureValue> / потомок 1 уровня - значение подписи
  (<KeyInfo>)? / потомок 1 уровня - описание ключа клиента
  (<Object ID?>)* / дополнительный элемент
</Signature>

```

Рис. 3. Структура данных элемента XML-Signature, где "?" – ноль или одно вхождение, "+" – одно или несколько вхождений, "" – ноль или более вхождений*

Следовательно, XML-подписи являются двухпроходными. На первом этапе формируются подписи всех локальных объектов данных с размещением в элементе `SignedInfo`, далее его значение шифруется XML-процессором с использованием закрытого ключа, а результат шифрования размещается в элементе `SignatureValue`. При этом функцией элемента `SignatureValue` является подтверждение легитимности выданных удостоверяющим центром (УЦ) SAML-утверждений безопасности (корректности их ЭЦП).

АНАЛИЗ СПЕЦИФИКИ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ СТАНДАРТА XMLDSIG

В соответствии с приведенным описанием процедуры применения SAML определим особенности XMLDSig-стандарта, используемого для удостоверения SAML-утверждений.

1. Объектом подписания может служить не весь XML-документ, а только его часть (определенный элемент), например, согласно OASIS Standard 200401, подписываемым объектом является тело (элемент `Body`) SOAP-сообщения.

2. Различные элементы (части) XML-документа могут быть подписаны несколькими различными исполнителями.

3. XML-подпись может находиться на разных уровнях по отношению к подписываемому объекту: на одном уровне, внутри подписываемого элемента, а подписываемый элемент может находиться внутри структуры XML-подписи.

4. В структуре XML-подписи может находиться URI-идентификатор ИР, связанный с локальным объектом данных посредством Id-ссылки, а также несколько пар URI-Id для их однозначного сопоставления.

5. Для проверки действительности ЭЦП SAML-утверждений безопасности необходим и имеется доступ к объекту (объектам) подписания, при этом элемент SignatureValue (подпись всего saml-assertion) реализует подтверждение легитимности утверждений со стороны УЦ.

Как видно из приведенных особенностей XMLDSig-стандарта, данный механизм не указывает на то, где подписанный элемент находится внутри XML-документа, не определяя его позицию относительно других элементов, что не позволяет валидатору XML-процессора достоверно определять в теле всего документа расположение исполняемого элемента, соответствующего подписанному (Reference) в удостоверяющем его SAML-утверждении. В связи с этим происходит абсолютизация относительных URI. Кроме этого, так как в XML-документе в одном элементе Signature Id-значение может комбинироваться с другими элементами и их идентификаторами, возникают коллизии, нарушающие ограничение на уникальность идентификатора.

В связи с неопределенностью расположения подписанного исполняемого элемента в теле XML-документа и отсутствием уникальности идентификатора (возможность повторного его использования в документе) возникает ситуация допустимости внедрения нарушителем вставки (запроса с недеклалируемыми параметрами на использование ИР) с деструктивным содержанием, с подтвержденной подписью, указывающей обработчику на ее легитимность.

Таким образом, вариативность одного XML-документа, равнозначная для обработчиков, приводящая к изменению структуры исполняемых элементов, открывает возможности для проведения XSW-атак (XML Signature Wrapping) посредством модификации схемы XML-документа (перемещение подписанных элементов в другую часть XML-дерева и вставки новых недеклалируемого содержания). XSW-уязвимости представляют собой обширный класс (Web Services Protocol Manipulation/SOAP Manipulation/XML Entity Linking в Mitre CAPEC CVE), определяющий девять различных категорий атак. Поэтому для разработки эффективных технологий безопасного применения SAML необходима разработка соответствующей модели нарушителя.

ПОДХОД К АНАЛИЗУ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕДУРЫ ПРИМЕНЕНИЯ SAML

Успешность проведения атак на реализацию SAML 2.0 посредством эксплуатации XSW-уязвимостей, обусловленных особенностями структуры XML-документа и XMLDSig-стандарта для удостоверения SAML-утверждений, будем оценивать путем определения возможностей нарушителя по успешному деструктивному воздействию. Для этого сформируем модель угроз на базе описания используемых данных, поставщика идентификационных данных (УЦ, осуществляющего подтверждение заявлений клиента в SAML-утверждениях, IdP) и поставщика услуг (полагающейся стороны, принимающей утверждения, RP) и определим модель нарушителя ИБ процедуры применения SAML.

Модель данных. Входными данными является XML-документ, где SAML-утверждение может быть представлено в качестве отдельного документа *A* либо более крупного XML-документа *D* (например, полным SOAP-сообщением или ответом SAML authentication). Предполагаем, что *A* подписан как автономный либо как часть документа *D*.

Модель IdP. Определим IdP-провайдера как сущность, которая выпускает подписанные SAML-утверждения, и для выполнения безопасной аутентификации с каждым клиентом из базы данных (БД) db_{IdP} имеет контроль над одним закрытым ключом, используемым для реализации процедуры подписи.

Кроме того, так как у каждой сущности в инфраструктуре открытых ключей (PKI) есть свой ключ для однозначной идентификации, IdP контролирует частный закрытый ключ под-

писи sk , где открытый ключ pk является доверенным для множества $RP = \{RP_1, \dots, RP_n\}$ либо непосредственно, либо с помощью PKI, где участники PKI «понимают» действительность токена, выданного данным IdP им или доверенному окружению. Это достигается путем предустановки публичной части ключей IdP в браузер, или же сервер домена, у которого есть публичная часть ключа IdP-инфраструктуры, в которой он и его клиенты работают, основывается на действительности токена клиента. Для этого может использоваться множество $\{pk_1, \dots, pk_r\}$, в котором каждый открытый ключ определяет доверенный домен в рамках RP. При этом некоторые компании (Salesforce) могут работать с несколькими IdP, по одному для каждой области, в том числе в области клиентов национальных доменов.

После получения запроса от клиента, зарегистрированного в db_{IdP} и его успешной аутентификации, IdP может выдать подписанный XML-документ D , где подписанная часть содержит запрошенное SAML-утверждение A .

Модель RP. Исходя из логики обработки XML-документов, RP-обработчик состоит из криптографического XML-модуля подтверждения (проверки) подписи RP_{sig} и логического SAML-модуля обработки атрибутов безопасности RP_{claims} . Оба модуля, в силу своего функционального предназначения, работают с различными элементами таких документов и, следовательно, отличаются алгоритмами их обработки.

Для обработки SAML-заявления RP ищет элемент утверждения в подписанном XML-документе D , осуществляет его разбор и анализ. Модуль RP_{sig} обеспечивает работу с несколькими доверенными открытыми ключами IdP из множества $\{pk_1, \dots, pk_r\}$.

На первом этапе RP_{sig} анализирует элемент подписи. Он применяет описанный в [4] метод для извлечения подписанных частей документа, использует описанные в Transforms преобразования к этим частям и сравнивает вычисленные значения хэша с хранящимися в DigestValue. Если эти значения совпадают, проверка подписи выполняется по всему элементу SignedInfo с одним из доверенных ключей множества $\{pk_1, \dots, pk_r\}$. Затем RP_{sig} сообщает результат проверки подписи, вместе со всем документом D , в RP_{claims} .

На втором этапе модуль RP_{claims} работает с БД клиентов db_{RP} и проверяет SAML-заявления в отношении этой БД. Если клиент содержится в db_{RP} , связанные с ним права предоставляются заявителю. В качестве альтернативы RP_{claims} может опираться на данные авторизации, содержащиеся в db_{IdP} , тогда связанные с этим клиентом права доступа будут содержаться в SAML-утверждении IdP. Если результаты обработки RP_{claims} утверждений безопасности в отношении заявленных прав доступа подтверждены (приняты как удостоверенные RP_{sig}), RP_{claims} направит их в RP_{work} . На основании этого модуль обработки запросов приложения RP_{work} предоставит запрошенный IP.

Существуют варианты возможных реализаций RP_{claims} , обусловленные выбором порядка обработки SAML-утверждений в связи с неопределенностью их размещения в теле XML-документа относительно обрабатываемой RP_{sig} подтверждающей их подписи (связывание посредством ссылок Id). Например, могут использоваться заявления из первого утверждения, которое открывается (закрывается) во время разбора, или аналогично в отношении последнего утверждения (открытого или закрытого), или выдается сообщение об ошибке при чтении более одного элемента SAML-утверждения, определяющего общее состояние процесса аутентификации пользователя.

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ SSO-ИНФРАСТРУКТУРЫ

Модель реализации XSW-угроз. IdP или другой поставщик идентичности (эмитент) выдает маркер ответа в отношении клиента (пользователя), как правило, содержащий несколько утверждений (например, о правах доступа или времени истечения срока их действия), то есть создает SAML-утверждение, определяющее общее состояние аутентификации пользователя на IdP (эмитенте), включая утверждение, подтверждающее права доступа клиента к ресурсам RP.

Для успешной реализации XSW-атаки требуется доступ к такому произвольному подписанному SAML-сообщению. Это может быть одно утверждение A или целый документ D со встроенным утверждением, при этом срок его службы может быть истекшим. Используя несогласованность работы модулей RP_{sig} и RP_{claims} , возникающую за счет неопределенностей во внутреннем интерфейсе их взаимодействия, появляется возможность модифицировать его путем внедрения вредоносных элементов, например деструктивного утверждения A' , таким образом, что обработчик RP_{sig} осуществит успешную проверку подлинной XML-подписи, подтверждая целостность и подлинность исходного содержимого SAML-сообщения. В свою очередь, RP_{claims} принудительно обработает фиктивный элемент.

На рис. 4 показан пример переноса легитимного элемента Body в новый корневой элемент (Wrapper), используемый для проверки подписи, и вставка вредоносного элемента Body, который обрабатывается логикой приложения.

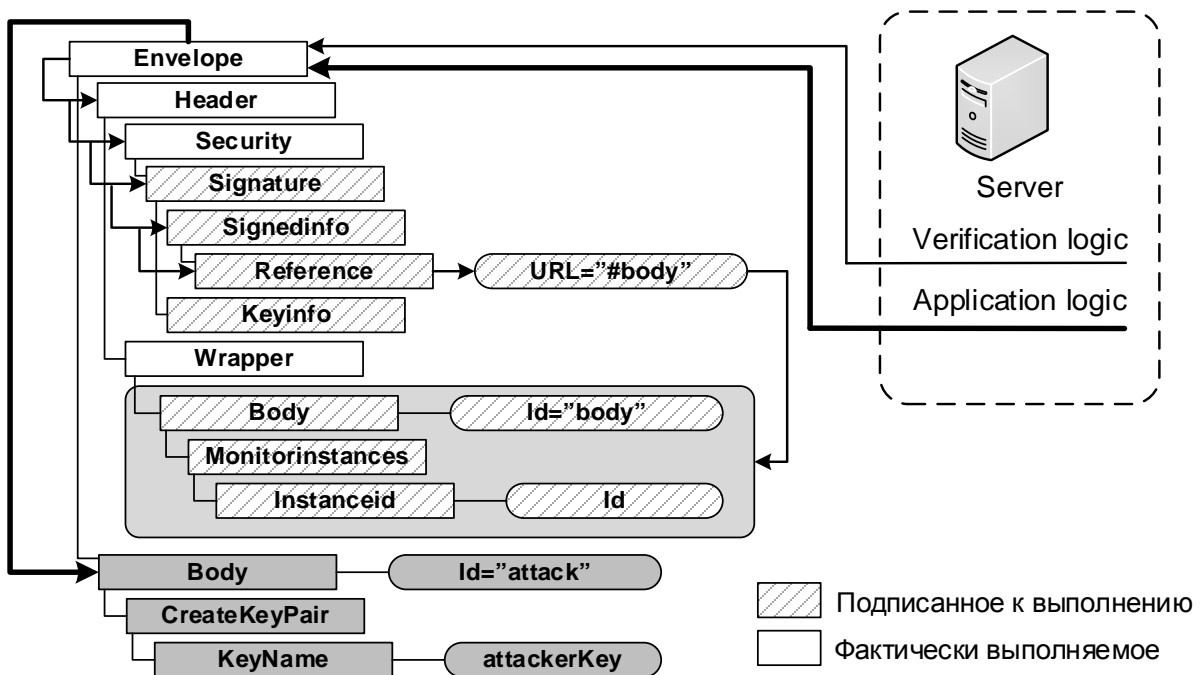


Рис. 4. Логика работы модулей приложения RP_{sig} и RP_{claims} в условиях переноса легитимного и вставки фиктивного элемента Body

Следовательно, при применении XSW-атаки на SAML-утверждения обеспечивается доступ к легитимному (подписанному) SAML-сообщению и, используя точки расширения такого XML-документа, XSW-техникой производится его модификация путем введения фиктивных элементов с вредоносной нагрузкой, а также перемещение исходного исполняемого содержимого в пределах окутанной подписи.

За счет того, что в приложении RP модули верификации подписи RP_{sig} и обработки заявлений безопасности RP_{claims} используют различные части сообщения, получая к ним безусловный доступ для обработки, RP_{sig} осуществит успешную проверку целостности и подлинности исходного содержимого SAML-сообщения, а RP_{claims} , основываясь на выводах RP_{sig} , примет к обработке вредоносный элемент исполнения.

Таким образом, при реализации нарушителем XSW-атаки наступление события, определяющего принятие решения RP_{work} о предоставлении запрошенного IP клиенту, зависит не от вывода модуля проверки подписи RP_{sig} , а от результата обработки RP_{claims} фиктивных, имеющих деструктивное содержание элементов, но подтвержденных модулем проверки подписи RP_{sig} .

Классификация и модели XSW-нарушителей. Разработанные модели используемых данных, поставщика идентификационных данных IdP, услуг RP, угроз безопасности процедуры применения SAML позволили определить два нижеприведенных типа XSW-нарушителя.

1. Нарушитель типа Adv_{acc} – для получения SAML-утверждения регистрируется как IdP-пользователь, далее в процессе штатного взаимодействия (заявляя о себе по предмету S), получает действительное подписанное SAML-утверждение A (в том числе, как часть более крупного документа D), а затем добавляет дополнительные заявления по любому другому предмету S' и отправляет измененный документ $D'(A')$ конкретному RP.

2. Нарушитель типа Adv_{intc} – получает SAML-утверждения из сетей общего пользования (социальных сетей, ГКС Интернет и пр.). При невозможности анализа зашифрованного сетевого трафика он получает доступ к передаваемым данным из незащищенных сетей (сниффинг), анализируя прокси или кэш браузера в офлайн-режиме.

Введем утверждение – событие, характеризующее успешность проведения нарушителем XSW-атаки, наступает в случае, если после получения документа D' , RP основывает свои решения по аутентификации и авторизации клиента на требованиях безопасности A' .

Модель взаимодействия элементов SAML-инфраструктуры и место в ней XSW-нарушителей различных типов представлены на рис. 5.

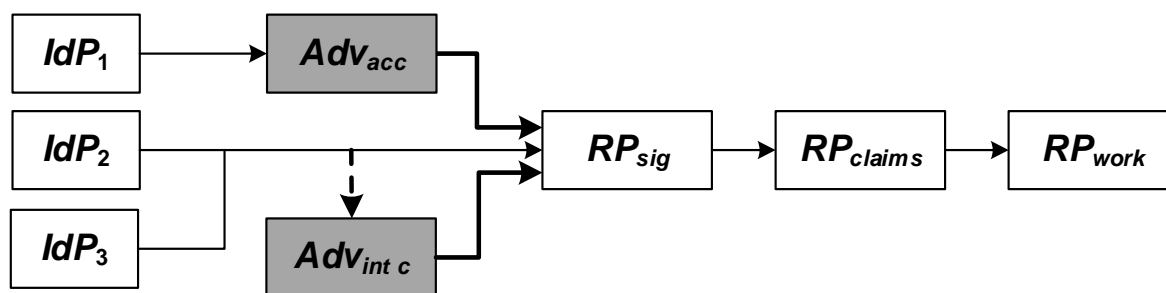


Рис. 5. Структурно-функциональная модель взаимодействия элементов SAML-инфраструктуры в условиях воздействий XSW-нарушителей различных типов

При проведении успешной XSW-атаки на конкретного RP нарушитель получает доступ к домену как доверенный участник информационного взаимодействия для конкретного публичного ключа pk в пределах данного RP. При этом Adv_{acc} имеет возможность осуществить это для всех pk , где он имеет право зарегистрироваться в качестве клиента в соответствующем IdP, контролирующем пару $(sk; pk)$, а Adv_{intc} может достичь этого для всех pk , где он может найти хотя бы одно подписанное SAML-утверждение A , подтвержденное с помощью соответствующего pk .

Таким образом, успешный результат достигается XSW-нарушителем за счет нижеследующих факторов, совместно характеризующих эксплуатируемые им уязвимости процедуры применения протокола SAML.

1) Комплексная подпись SAML-сообщений. Применяемый XMLDSig-стандарт наряду с хэшем документа в целом (приобщенная к документу обволакивающая подпись) оперирует множеством подписываемых элементов, при этом позиции их окутанной подписи и подписанного содержания в теле XML-документа являются переменными. Связывание этих подписей и содержания не является позиционным, а осуществляется исключительно ссылочным механизмом на основе идентификатора Id. Кроме того, механизм комплексной подписи реализован на фоне имеющейся возможности перемещения элементов содержимого SAML-сообщения в пределах окутанной подписи за счет точек расширения XML-документа.

2) Несогласованность внутреннего интерфейса RP. Большинство SAML-инфраструктур рассматривают RP (веб-приложение, службу, IP), работающий с SAML-утверждениями, как единый блок, предполагая совместное общее состояние для всех задач. Однако логически

этот блок разделен на криптографический модуль проверки подписи SAML-заявлений (RP_{sig}), логический модуль обработки заявлений (RP_{claims}), содержащихся в утверждении SAML, а также модуль, реализующий логику обработки запросов приложения (RP_{work}). Эти модули, в силу последовательной работы с различными частями документа и функционала, имеют разные интерпретации результатов обработки подписанных SAML-сообщений, а именно:

– RP_{sig} , определяя факт подлинности подписи и наличия подписанного элемента SAML-заявления (исключительно качественная оценка) без указания его позиции в теле XML-документа и опосредованно количество легитимных (подтвержденных) элементов (например, «первый» – имеется, подписан, подпись подлинная, вывод – «удостоверен» и так далее), представляет эти выраженные Boolean-значениями выводы модулю RP_{claims} для последующего разбора утверждения;

– RP_{claims} , осуществляя проверку элементов SAML-утверждения на соответствие XML-схеме и отсутствие конфликта имен, но при этом нестрогую проверку их допустимости, производит в определенном заранее заданном порядке обработку заявлений безопасности, содержащихся в этих утверждениях (полагаясь исключительно на непозиционные и опосредованные Boolean-подтверждения модуля RP_{sig}), и при отсутствии событий ошибки в отношении предоставляемых заявителю прав (режимов) доступа к ресурсу RP направляет к исполнению модулю приложения RP_{work} запрос клиента.

Дополнительным фактором, определяющим уязвимость SAML-процедуры, является изначальная безусловная заданность последовательности разбора SAML-утверждений модулем RP_{claims} в соответствии с выбранной стратегией и возможностями реализующих его скриптов (Java, C++) в рамках конкретного поставщика услуг.

В качестве примера, подтверждающего действительность выявленной SAML-уязвимости, следует привести сообщение [5] об успешной реализации XSW-атаки на веб-сервис Amazon, используемый клиентами для управления серверами. Нарушитель, получив хотя бы один SOAP-запрос от клиентов Amazon, имеет возможность, используя XSW, выполнять любые действия на их серверах. Сценарий XSW-атаки будет нестандартным, поскольку в сервисе Amazon реализована проверка имен элементов SOAP-сообщения, например Body во всем документе должен иметь определенное значение Id. Однако в XML- и SAML-обработчиках сервиса имеются описанные в данной статье особенности, которые используют нарушители – XML-обработчик для проверки подписи берет первый элемент Body, а SAML-обработчик, имея подтверждение его корректности, направляет в приложение второй, хотя по стандарту в SOAP может быть только один Body. Таким образом, сервис Amazon может быть успешно атакован XSW-техникой за счет использования двух Body – действительного с корректной подписью клиента и фиктивного с командами нарушителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований особенностей структуры XML-документа и XMLDSig- стандарта, модельного описания используемых данных, поставщиков идентификационных данных и услуг выявлены факторы, определяющие уязвимости процедуры применения SAML, что позволило установить наличие специфичных угроз ИБ в отношении SAML-инфраструктур, включая модель нарушителя различных типов и событие, характеризующее успешность проведения XSW-атак. Указанные особенности и факторы в совокупности позволяют сделать вывод об уязвимости процедуры применения SAML перед XSW-воздействием, которая заложена логикой ее реализации, как на уровне базовых библиотек поддержки стандартов XML-документа и XMLDSig, так и различных вариантов реализации SAML-обработчиков приложений.

По результатам анализа процедуры применения SAML установлена несогласованность внутреннего интерфейса и неоднозначность логики взаимодействия между криптографическим и некриптографическим модулями обработки SAML-сообщений, что в конечном счете является основным условием возможности проведения XSW-атак на SAML-инфраструктуры.

Таким образом, определение способов повышения безопасности применения процедуры SAML и различных контрмер противодействия XSW-атаке требует от специалистов по ИБ учитывать уязвимости в базовых библиотеках обеспечения функционирования SAML-инфраструктуры. При этом сложность структуры и обработки XML-документов затрудняет предотвращение таких атак, поскольку наличие уязвимости хотя бы в одной библиотеке, например в библиотеке XML-Schema, уже может обеспечить успешность XSW-воздействия.

Наряду с этим вариативность SAML-сообщений, стратегий, реализаций модулей их обработки на стороне различных поставщиков услуг задает наличие множества векторов XSW-атак, что определяет сложность противодействия им. В этой ситуации оценка корректности конфигурации безопасности SAML-инфраструктур становится весьма трудоемкой и, вследствие этого, подверженной потенциальным ошибкам.

Указанные проблемы с учетом широкого использования стандарта SAML для организации сквозной аутентификации при реализации сценариев «единого входа» глобальными поставщиками услуг (Amazon, AWS и др.), а также веб-сервисами государственных информационных систем, включенных в единые национальные системы идентификации и аутентификации, требуют проведения дальнейших исследований по определению множества векторов XSW-атак на такие SSO-структуры и, соответственно, выработки практических рекомендаций по реализации эффективных контрмер противодействия атакам данного класса.

Список используемых источников

1. Formal Analysis of SAML 2.0 Web Browser Single Sign-On: Breaking the SAML-based Single Sign-On for Google Apps / A. Armando, R. Carbone, L. Compagna, J. Cue Llar and M. Tobarra. – URL: <http://archiv.infsec.ethz.ch/education/as10/secsem/papers/saml-ss0-08.pdf> (дата обращения: 20.03.2020).
2. Методические рекомендации по использованию Единой системы идентификации и аутентификации. – URL: <http://digital.gov.ru/ru/documents/6186/> (дата обращения: 15.03.2020).
3. Assertions and Protocol for the OASIS Security Assertion Markup Language (SAML) V2.0. OASIS Standard, 15.03.2005 / S. Cantor, J. Kemp, R. Philpott and E. Maler. – URL: <http://docs.oasis-open.org/security/saml/v2.0/saml-core-2.0-os.pdf> (дата обращения: 04.03.2020).
4. XML Signature Syntax and Processing (Second Edition), 2008 / D. Eastlake, J. Reagle, D. Solo, F. Hirsch and T. Roessler. – URL: <http://www.w3.org/TR/xmlsig-core/> (дата обращения: 08.04.2020).
5. Автоматизация обхода проверки подписи в XML (XML Signature Wrapping). – URL: <http://xaker.ru/2018/01/04/easy-hack-170/> (дата обращения: 21.04.2020).

А.А. Абдурахимов,
доктор техн. наук, доцент;
П.С. Гончаров,
кандидат техн. наук, доцент;
А.М. Денисов,
кандидат техн. наук, доцент;
А.В. Кухтин

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОГО ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Представлена обобщенная математическая модель процесса функционирования бортового обеспечивающего комплекса космического аппарата в условиях воздействия факторов загрязнения околоземного космического пространства. Отличительной особенностью модели является ее многоуровневая агрегативная структура. Математическая модель позволяет выполнять прогнозирование параметров космического аппарата в условиях воздействия частиц космического мусора и наличия неопределенности в исходных данных.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовой обеспечивающий комплекс, математическая модель, космический мусор, техногенное загрязнение.

ВВЕДЕНИЕ

Техногенное загрязнение околоземного космического пространства (ОКП) является неизбежным фактором, сопровождающим космическую деятельность. По данным подразделений NASA и космического командования США, количество космических объектов (КО) размером более 10 см, находящихся в ОКП в настоящее время, приближается к 20000 [1], однако наибольшую опасность для КА во всех областях ОКП представляют некаталогизированные частицы космического мусора (ЧКМ), параметры орбитального движения которых невозможно определить существующими системами контроля космического пространства [2].

Наиболее уязвимыми к воздействию мелкодисперсных частиц являются солнечные батареи и радиационные теплообменники КА. В меньшей степени они представляют опасность для оптических датчиков системы управления движением и оптико-электронных целевых систем КА в первую очередь из-за наличия бленд, существенно ограничивающих возможные ракурсы полета частиц. Перечисленные элементы КА в большинстве своем входят в состав бортового обеспечивающего комплекса, который наряду с бортовым специальным комплексом непосредственно определяет качество выполнения целевой задачи КА.

К настоящему времени разработано значительное количество моделей и программных комплексов, позволяющих оценить техническое состояние КА, функционирующих в условиях воздействия вредных факторов ОКП. Проблемным вопросом в данной предметной области является то, что математические модели (ММ) и программно-моделирующие комплексы, как правило, имеют узкоспециализированный детальный либо общий поверхностный характер. Данная публикация посвящена дальнейшему развитию научно-методического аппарата оценивания результатов воздействия ЧКМ на КА путем проработки комплексных подходов к моделированию, позволяющего создавать ММ процессов функционирования КА и его бортовых систем, обладающие необходимой адекватностью, простотой и гибкостью при использовании на практике.

СТРУКТУРА И ПОДХОД К СОЗДАНИЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В состав математической модели входят:

- структурно-логическая формализованная система показателей и критериев оценивания качества процессов функционирования бортового специального комплекса КА (КА в целом) и бортового обеспечивающего комплекса КА;
- система исходных данных, включающая необходимые для моделирования параметры (начальные параметры орбиты КА, массогабаритные характеристики, оптико-геометрическую модель КА и т.д.);
- математические модели процессов воздействия ЧКМ на уязвимые элементы КА;
- математические модели процессов функционирования бортовых систем КА (в том числе процессов управления ими), включающие математические модели процессов движения центра масс КА и углового движения КА, процесса преобразования, накопления и использования электрической энергии, теплового режима.

Структурная схема модели представлена на рис. 1.

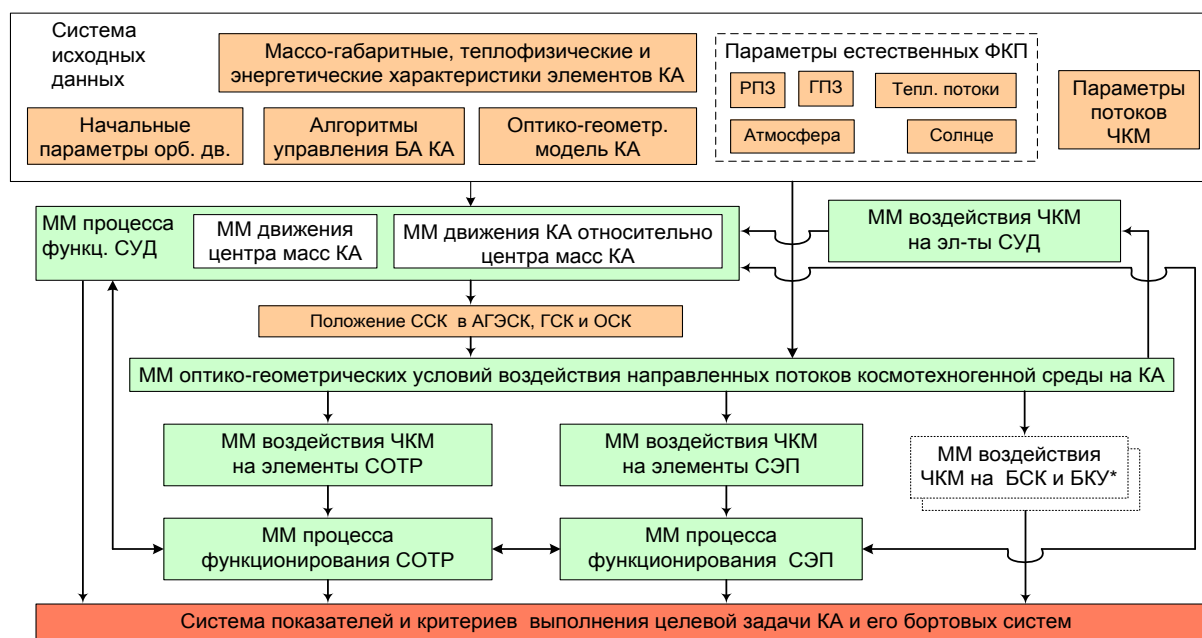


Рис. 1. Общая структурная схема математической модели

В основе обобщенной математической модели бортового обеспечивающего комплекса КА, предназначенной для исследования процесса функционирования КА в условиях воздействия ЧКМ, лежит подход, описанный ниже.

Отправной точкой (базисом) для разработки математической модели, определяющей ее содержание и необходимую детализацию, является построенная с учетом целевых задач КА и задач исследования система показателей и критериев качества оценивания процесса функционирования КА [3, 4].

Так, успешное функционирование типового КА в формализованной форме описывается как одновременное выполнение следующих условий:

1) нахождение КА в заданных областях ОКП $\hat{L}_3(t) \in \{L_3(t)\}^n$ и поддержание необходимых параметров ориентации и стабилизации КА в периоды выполнения целевых задач, сеансов управления и передачи специнформации $\hat{\alpha}_6(t) \in \{\alpha_6(t)\}^n$, где $\hat{L}_3(t)$ – координаты центра масс КА в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК),

$$\hat{L}_3(t) = \langle \hat{x}_{\gamma_{KA}}(t), \hat{y}_{\gamma_{KA}}(t), \hat{z}_{\gamma_{KA}}(t) \rangle; \hat{\alpha}_6(t) - \text{параметры ориентации и стабилизации КА,}$$

$$\hat{\alpha}_6(t) = \left\langle \begin{matrix} \hat{g}_{KA}(t), \hat{\psi}_{KA}(t), \hat{\gamma}_{KA}(t), \\ \hat{g}_{KA}(t), \hat{\psi}_{KA}(t), \hat{\gamma}_{KA}(t) \end{matrix} \right\rangle; \{L_3(t)\}^d, \{\alpha_6(t)\}^d - \text{множества допустимых значений пара-}$$

метров движения КА;

2) обеспечение на заданном уровне параметров электроснабжения бортовой целевой аппаратуры, которое в целом может быть охарактеризовано выполнением на каждом шаге моделирования критерия $\hat{E}_{\text{сэс}}(t) > E_{\text{сэс}}^{\text{min}}$, где $\hat{E}_{\text{сэс}}(t)$ – текущий запас энергии аккумуляторных батарей, $E_{\text{сэс}}^{\text{min}}$ – энергия аккумуляторных батарей, соответствующая предельной глубине их разряда;

3) обеспечение теплового режима аппаратуры бортовой целевой аппаратуры $\hat{T}_{\langle n \rangle}(t) \in \{T_{\langle n \rangle}(t)\}^d$, где $T_{\langle n \rangle}(t)$ – температуры объектов регулирования (критичных к тепловому режиму элементов бортовой аппаратуры), $\{T_{\langle n \rangle}(t)\}^d$ – множество допустимых температур объектов регулирования;

4) обеспечение минимального уровня основных параметров бортовой целевой аппаратуры в условиях воздействия ЧКМ, которое может быть охарактеризовано допустимыми коэффициентами деградации ее характеристик $k_{\langle m \rangle}^d \in \{k_{\langle m \rangle}^d\}^d$ (где m – количество характеристик) либо пороговым количеством попаданий частиц в i -й элемент $v_i \leq v_i^{\text{max}}$, $i = 1 \dots l$.

Под бортовой целевой аппаратурой подразумевается бортовой специальный комплекс и часть аппаратуры БКУ, непосредственно обеспечивающая его работу.

Условия воздействия ЧКМ зависят от программы (траектории) полета КА и описываются множеством $\lambda_{\langle 4 \rangle}(L_3(t)) = \{\bar{V}_{\text{cp}}, d_{\text{cp}}, \rho_{\text{cp}}, f_{\text{cp}}\}$, составляющими которого являются вектор скорости движения частиц в АГЭСК, средние значения их диаметра и плотности, а также флюенса частиц в потоке в окрестности точки $L_{\langle 3 \rangle}(t)$.

Описанные выше условия оцениваются на каждом шаге моделирования и являются верхним (задающим) уровнем в системе показателей и критериев оценивания качества. По факту одновременного выполнения данных условий и по условию работоспособности непосредственно целевого комплекса КА определяется факт успешного выполнения целевой задачи.

Состав исходных данных для моделирования представлен на рис. 1.

Рассматриваемая модель по своей сущности представляет собой агрегативную модель бортового обеспечивающего комплекса, бортового комплекса управления и конструкции КА, основанную на множествах типовых агрегатов – энергопреобразующих элементов, которым присущ типовой набор параметров, характерный практически для любого блока аппаратуры или элемента бортовой обеспечивающей системы КА, в качестве примеров которых можно привести следующие:

- параметры, характеризующие условия функционирования бортовой аппаратуры (допустимые температурные режимы, режимы энергоснабжения и движения);
- параметры, характеризующие целевую функцию агрегата (или его передаточную функцию);
- сопряженные между собой режимы энергопотребления и выделения тепловой энергии;
- оптические коэффициенты внешней поверхности, площадь теплообмена;
- коэффициенты теплопроводности и теплопередачи.

Моделирование конкретных элементов КА осуществляется путем «настройки» агрегата, т.е. задания соответствующих характерных параметров. Например, если в моделируемом

элементе не используется теплоноситель, то параметр «расход теплоносителя» принимает нулевое значение.

Данная модель используется в качестве исходной при построении математических моделей процессов функционирования бортовых систем КА в условиях воздействия ЧКМ, более подробно описанных ниже.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Математическая модель движения космического аппарата. Математическая модель движения КА (центра масс и относительно центра масс) является основным компонентом в обобщенной математической модели процесса функционирования как бортового обеспечивающего комплекса, так и КА в целом, поскольку с ее помощью производится определение ряда ключевых выходных параметров КА либо исходных данных для их расчетов, в частности:

- координат центра КА (или параметров его орбиты), параметров ориентации и стабилизации КА в заданные моменты времени (выполнение целевых задач, сеансы связи и пр.);
- параметров ориентации отдельных элементов КА в целях определения выходных характеристик бортовых обеспечивающих систем.

Для моделирования движения центра масс КА целесообразно использовать типовую модель возмущенного движения, основанную на прямом численном решении дифференциальных уравнений движения, а в качестве основной системы координат (СК) принять АГЭСК, начало которой совпадает с центром Земли, оси направлены следующим образом: X – в точку весеннего равноденствия, Z – по оси вращения Земли, Y – дополняет систему координат до правой [5]. В зависимости от специфики решаемых задач в ряде случаев более выгодным является использование других систем, например гринвичской системы координат.

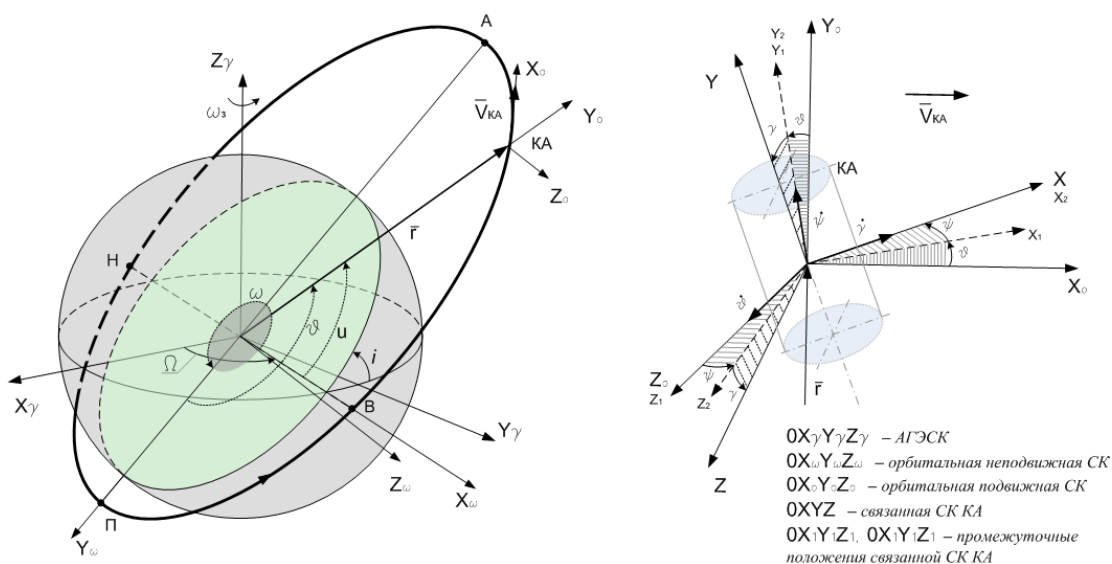


Рис. 2. Космический аппарат в АГЭСК и ее связь с другими системами координат, используемыми при моделировании

Наиболее часто, как и в моделировании орбитального движения, вместе с АГЭСК применяются орбитальная неподвижная система координат (ОНСК), орбитальная подвижная си-

стема координат (ОПСК) и связанная система координат (ССК). Иллюстрация их взаимного положения представлена на рис. 2 [5, 6].

Переход от одной СК к другой (условно от СК1 к СК2 для последовательности поворотов относительно осей X, Y, Z на углы $\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$ соответственно) описывается соотношением

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = A_k \times A_j \times A_i \times \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix},$$

где

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix}, \quad A_j = \begin{bmatrix} \cos\alpha_j & 0 & \sin\alpha_j \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_j & 0 & \cos\alpha_j \end{bmatrix}, \quad A_k = \begin{bmatrix} \cos\alpha_k & -\sin\alpha_k & 0 \\ \sin\alpha_k & \cos\alpha_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

При другом порядке поворотов осей меняется последовательность умножения исходного вектора на матрицы преобразования координат, например для Y, Z, X это будет $A_i \times A_k \times A_j$.

В общем случае уравнение возмущенного движения КА в АГЭСК имеет вид

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu \cdot \vec{r}}{r^3} + \vec{j}_B + \vec{j}_{\text{СУД}}, \quad (1)$$

где μ – гравитационная постоянная Земли, $\mu=396800,4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$;

\vec{r} – радиус-вектор центра масс КА;

\vec{j}_B – возмущающее ускорение, обусловленное как нецентральностью гравитационного поля Земли, притяжением Солнца, Луны и планет, так и всеми силами негравитационной природы, действующими на КА – аэродинамическими, электродинамическими, и пр.);

$\vec{j}_{\text{СУД}}$ – возмущающее ускорение, вызванное управляющими воздействиями исполнительных органов системы управления движением с текущей суммарной силой тяги $\vec{P}_{\text{СУД}}$, $\vec{j}_{\text{СУД}} = \vec{P}_{\text{СУД}} / m_{\text{КА}}$.

Данная модель обладает, с одной стороны, достаточной простотой и прозрачностью, с другой стороны, легко масштабируется в плане усложнения и улучшения точностных характеристик расчетов путем добавления новых составляющих в выражение для определения \vec{j}_B .

Движение КА относительно центра масс КА описывается системой дифференциальных уравнений, связывающих угловые скорости, угловые ускорения, моменты инерции относительно осей координат, соответствующих каналам управления КА и суммы моментов сил, действующих на КА относительно данных осей [6]:

$$\begin{cases} J_{x_c} \dot{\omega}_{x_c} + (J_{z_c} - J_{y_c}) \omega_{y_c} \omega_{z_c} = M_{x_c}^{\Sigma}; \\ J_{y_c} \dot{\omega}_{y_c} + (J_{x_c} - J_{z_c}) \omega_{x_c} \omega_{z_c} = M_{y_c}^{\Sigma}; \\ J_{z_c} \dot{\omega}_{z_c} + (J_{y_c} - J_{x_c}) \omega_{x_c} \omega_{y_c} = M_{z_c}^{\Sigma}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\omega_{x_c}, \omega_{y_c}, \omega_{z_c}$ – проекции на оси ССК вектора угловой скорости КА, $\omega_{x_c} = \dot{\gamma} + \dot{\psi} \sin \vartheta$,
 $\omega_{y_c} = \dot{\psi} \cos \vartheta \cos \gamma + \dot{\vartheta} \sin \gamma$, $\omega_{z_c} = \dot{\vartheta} \cos \gamma - \dot{\psi} \cos \vartheta \sin \gamma$;

$M_{x_c}^{\Sigma}, M_{y_c}^{\Sigma}, M_{z_c}^{\Sigma}$ – проекции на оси ССК вектора момента сил, действующего на КА и представляющего собой сумму возмущающего и управляющего моментов;

$J_{x_c}, J_{y_c}, J_{z_c}$ – моменты инерции КА относительно осей связанной системы координат.

Формирование управляющих моментов, действующих на КА, осуществляется системой управления движения КА на основании обработки информации датчиков по каналам тангажа ϑ , рыскания ψ и крена γ , создающих наряду с другой аппаратурой БКУ канал обратной связи.

В общем случае влияние ЧКМ на функционирование СУД проявляется как искажение сигнала с оптических и оптико-электронных датчиков, приводящее к возникновению ошибки ориентации КА, характеризуемой коэффициентами нарушения ориентации $k_{0<3>}$, что приводит в первую очередь к ухудшению качества функционирования БСК, СЭС и СОТР (условия 2, 3 и 4, описанные в предыдущем подразделе).

Учитывая тенденции развития датчиковой аппаратуры и алгоритмов работы СУД, в дальнейшем влияние ЧКМ на функционирование СУД будет все чаще характеризоваться пороговыми (ступенчатыми) законами выхода из строя внешних ее элементов для всех существенных диапазонов параметров воздействия ЧКМ, а не только для деструктивных. Это связано с широким внедрением в состав СУД сложных оптико-электронных приборов, например блоков определения координат звезд, при повреждении входной апертуры которых СУД с большой вероятностью будет переходить на аварийные режимы работы с исключением обработки сигнала с поврежденного датчика.

В качестве исходных данных для моделирования движения КА используются:

– начальные координаты и проекции вектора скорости центра масс КА в АГЭСК

$L_6^H(t) = \langle x_{\gamma KA}^H, y_{\gamma KA}^H, z_{\gamma KA}^H, V_{\gamma KA}^H, V_{\gamma KA}^H, V_{\gamma KA}^H \rangle$, а также значения углов ориентации и угловых скоростей КА относительно осей ОПСК $\alpha_6^H(t) = \langle \vartheta_{KA}^H, \psi_{KA}^H, \gamma_{KA}^H, \dot{\vartheta}_{KA}^H, \dot{\psi}_{KA}^H, \dot{\gamma}_{KA}^H \rangle$;

– начальные масса и моменты инерции КА.

Моделирование движения КА осуществляется путем совместного численного решения дифференциальных уравнений (1) и (2). На каждом шаге моделирования производится:

– расчет $L_{(6)}(t_i)$ и $\alpha_{(6)}(t_i)$, используемых в качестве исходных данных для моделирования других бортовых систем КА и начальных условий следующего шага моделирования;

– определение управляющих сил и моментов на следующем шаге в соответствии с заданными законами управления движением КА;

– контроль условий выполнения целевой задачи по параметрам $\{L_3(t)\}^d, \{\alpha_6(t)\}^d$.

Математические модели условий воздействия потоков космической среды. КА функционирует в условиях многоакурсного воздействия потоков космической среды, к которым относятся как потоки естественного происхождения, так и потоки ЧКМ. При этом происходит взаимное экранирование элементов КА и образование довольно сложных совместных зон освещенности и затенения на поверхностях элементов КА.

При решении частных задач в статической постановке для определения характеристик зон затенения целесообразно использовать классические методы аналитической геометрии, однако при создании универсальных динамических моделей это приводит к чрезмерному усложнению расчетных алгоритмов, зачастую не позволяющему завершить практическую программную реализацию модели.

Для разрешения данной проблемной ситуации предлагается использовать проекционный метод определения функции затенения, сущность которого заключается в отображении элементарных участков поверхности конструкции КА, представленных координатами их условных центров или элементарных точек (ЭТ) на плоскость, перпендикулярную направлению движению потока с замещением «дальних» проекций «ближними» при совпадении их координат на проекционной плоскости [7]. При этом оптико-геометрической модели КА $X_{(n)}^{ОГМ}$, как правило, задаваемой в виде совокупности типовых пространственных фигур (усеченные конус и призма, сфера, параллелепипед, параболоид вращения), сопоставляется функция типа

$$F_T = \{i_D, i_{DE}, x_{ЭТ}, y_{ЭТ}, z_{ЭТ}, f_{Ts}, \dots, f_{TKM}\}, \quad (3)$$

где i_D, i_{DE} – общий идентификатор ЭТ и идентификатор элемента КА соответственно, $i_D, i_{DE} \in \mathbb{Z}$;
 $x_{ЭТ}, y_{ЭТ}, z_{ЭТ}$ – координаты ЭТ в ССК;
 f_{Ts}, f_{TKM} – частные функции затенения ЭТ при воздействии потоков солнечного излучения и ЧКМ, $f_T = 1$, когда на ЭТ воздействует поток, в обратном случае $f_T = 0$.

В выражении (3) для краткости и наглядности изложения не показаны все частные функции затенения. Исходными данными для определения F_T являются ракурсы воздействия потоков в АГЭСК, в частности, для ЧКМ это будут данные, полученные с помощью одной из моделей техногенной среды в ОКП, например отечественной модели SDPA [2].

Наиболее простым способом практической реализации метода является преобразование координат ЭТ, заданных в ССК КА, в координаты в условной проекционной системе координат, ось $Z_{пр}$ которой сориентирована по направлению распространения потока (в общем случае процедура выполняется за два поворота осей СК). В этом случае ближайшая к источнику потока точка поверхности КА будет иметь наименьшее значение координаты $Z_{пр}$. При программной реализации моделей для решения задач определения функций освещенности и затенения могут быть использованы возможности современных программных средств (например, OpenGL, 3DMax и пр.).

Для мелкодисперсных ЧКМ результаты воздействия достаточно хорошо характеризуются безразмерными коэффициентами деградации ключевых характеристик уязвимых элементов, которые определяются как

$$k_{x_i}^d(\lambda_{(4)}) = \frac{x_i^{KM}(\lambda_{(4)}) - x_i^0}{x_i^{ПП} - x_i^0}, \quad k_{x_i}^d(\lambda_{(4)}) \in [0, 1], \quad (4)$$

где x_i^0, x_i^{KM} – величины i -й характеристики до и после воздействия;
 $x_i^{ПП}$ – предельно достигаемое значение характеристики;
 $\lambda_{(4)}$ – множество характеристик воздействия.

Методологические подходы к определению характеристик элементов КА в условиях воздействия неблагоприятных факторов детально рассмотрены в работе [8].

Для таких условий воздействия, когда ЧКМ могут пробивать элементы конструкции КА (как правило, $d \geq 1$ мм, флюенс потока $v \ll 1$ м⁻²), моделирование результатов воздействия целесообразно проводить с помощью упрощенной процедуры путем расчета точек пересечения траектории частицы с поверхностями элементов КА и выбора первой или последующих точек пересечения по пути движения частицы в соответствии с правилом, представленным при описании проекционного метода и условием пробития элементов конструкции.

Условие пробития в данном случае характеризуется зависимостью [9]

$$V_{ПСП} = k_{согл} \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_{п}} \left(580 \frac{b_{п}}{d_c \cdot \cos \alpha} + 120 \right)} \quad (5)$$

где $V_{ПСП}$ – величины i -й характеристики до и после воздействия;
 $\rho_c, \rho_{п}, d_c$, – плотности материала ЧКМ и оболочки, диаметр ЧКМ и оболочки соответственно;
 $b_{п}$ – эмпирический коэффициент согласования расчетных и экспериментальных данных.

Для герметичных элементов критерием нарушения работоспособности будет нарушение герметичности, для возникновения которого достаточно неполного пробития конструкции

или образования в окрестности удара ЧКМ трещины, которая может возникнуть как в результате воздействия частицы, так и при последующем термомеханическом нагружении конструкции элемента. При этом критичная скорость ЧКМ может быть существенно ниже и в ряде случаев при моделировании целесообразно принимать в качестве критерия нарушения работоспособности факт попадания ЧКМ без учета ее скорости. Данный подход целесообразно использовать и для незащищенных элементов бортовой аппаратуры.

Количество попаданий ЧКМ v_i далее используется для оценивания работоспособности отдельных критичных элементов КА по критерию $v_i \leq v_i^{\max}$.

Математическая модель процесса функционирования системы электроснабжения.

Основой математической модели процесса функционирования системы электропитания КА является уравнение текущего баланса электрической энергии

$$E_{AB}(t) = E_{AB}^0 + \sum_{i=1}^n \int_{t_{30i}}^{t_{3ki}} \eta_3(t) N_{AB}^3(t) dt - \sum_{j=1}^m \int_{t_{p0j}}^{t_{pkj}} \eta_p^{-1}(t) N_{AB}^p(t) dt, \quad (6)$$

- где $E_{AB}^0, E_{AB}(t)$ – начальная и текущая энергия аккумуляторной батареи;
 $N_{AB}^3(t), N_{AB}^p(t)$ – текущие электрические мощности, расходуемая на заряд и генерируемая АБ при разряде;
 $\eta_3(t), \eta_p(t)$ – КПД процессов заряда и разряда соответственно;
 n, m – количество участков заряда и разряда, в общем случае соотносятся с освещенными и теневыми участками орбиты.

Текущие мощности заряда и разряда АБ в общем случае определяются выражениями $N_{AB}^3(t) = N_{CB}(t) - N_{BA}(t) - N_{PBH}(t) - N_{\Delta U}(t)$ и $N_{AB}^p(t) = N_{BA}(t) - N_{CB}(t) + N_{\Delta U}(t)$, где $N_{CB}(t), N_{BA}(t), N_{PBH}(t), N_{\Delta U}(t)$ – генерируемая солнечной батареей, потребляемая бортовой аппаратурой, рассеиваемые балластной нагрузкой и бортовой кабельной сетью мощности соответственно.

Электрическая мощность, генерируемая солнечной батареей (СБ), определяется выражением

$$N_{CB}(t) = k_{рез} k_{зап} (1 - k_d^{KM}(t)) e^{-k_d T_{сac}} k_s(t, L_6(t), \alpha_6(t), k_o) q_s S_{CB} \eta_{CB} \cos \alpha(t, L_6(t), \alpha_6(t), k_o) \quad (7)$$

- где $k_{рез}, k_{зап}$ – коэффициенты резервирования и заполнения фотоэлектрическими преобразователями СБ соответственно;
 $k_d, k_d^{KM}(t)$ – коэффициенты деградации мощности СБ в результате воздействия естественных факторов и ЧКМ;
 q_s – солнечная постоянная, $q_s = 1367$ Вт/м²;
 S_{CB} – площадь СБ;
 η_{CB} – КПД СБ;
 k_s – коэффициент освещенности СБ.

Коэффициент освещенности СБ $k_s = 1$ во всех случаях, кроме тех, при которых КА находится на теневой стороне орбиты и/или $\alpha(t) \geq \pi/2$, т.е. выполняется условие

$$u_t = \left(\left(\sqrt{(n_{\gamma z}^s y_{\gamma KA} - n_{\gamma y}^s z_{\gamma KA})^2 + (n_{\gamma x}^s z_{\gamma KA} - n_{\gamma z}^s x_{\gamma KA})^2 + (n_{\gamma y}^s x_{\gamma KA} - n_{\gamma x}^s y_{\gamma KA})^2} < R_3 \right) \wedge \left(n_{\gamma x}^s x_{\gamma KA} + n_{\gamma y}^s y_{\gamma KA} + n_{\gamma z}^s z_{\gamma KA} < 0 \right) \vee \left(n_{\gamma x}^s n_{\gamma x}^{CB} + n_{\gamma y}^s n_{\gamma y}^{CB} + n_{\gamma z}^s n_{\gamma z}^{CB} < 0 \right) \right), \quad (8)$$

$$\cos \alpha = n_{\gamma x}^s n_{\gamma x}^{CB} + n_{\gamma y}^s n_{\gamma y}^{CB} + n_{\gamma z}^s n_{\gamma z}^{CB}. \quad (9)$$

В этом случае коэффициент освещенности СБ $k_s = 0$.

В выражениях (8) и (9) $n_{\gamma x}^s, n_{\gamma y}^s, n_{\gamma z}^s$ и $n_{\gamma x}^{CB}, n_{\gamma y}^{CB}, n_{\gamma z}^{CB}$ – координаты ортов вектора направления на Солнце и нормали к плоскости СБ в АГЭСК соответственно; R_3 – радиус Земли.

При моделировании на каждом шаге численного интегрирования производится контроль выполнения условия превышения текущей энергии аккумуляторной батареи над величиной, характеризующей предельную глубину разряда $\hat{E}_{\text{сэс}}(t) > E_{\text{сэс}}^{\text{min}}$.

Математическая модель процесса функционирования системы обеспечения теплового режима. При решении прикладных задач, перечисленных выше, для моделирования тепловых режимов КА целесообразно использовать метод узлов, сущность которого заключается в представлении элементов КА в виде совокупности изотермических элементов, взаимодействующих между собой посредством тепловых потоков. При этом процесс функционирования СОТР описывается системой дифференциальных уравнений типа

$$c\dot{T}_i = \sum_{r \neq i}^{m_1} \frac{T_r - T_i}{R_{ir}} + \varepsilon \sigma \left(\sum_{j \neq i}^{m_2} \varepsilon \left(1 + (1 - \varepsilon)^2 \right) S_{ij} T_j^4 - (1 - \varepsilon(1 - \varepsilon)) S_i T_i^4 \right) + Q_{li} - Q_{ei}, \quad (10)$$

где ε – степень черноты поверхности элементов КА;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴;

c, T_i, S_i – средняя теплоемкость, температура и площадь поверхности излучения i -го элемента;

S_{ij} – площадь, через которую происходит лучистый теплообмен между i -м и j -м элементами (определяется с учетом затенения и взаимной ориентации элементов);

T_r, T_j – средние температуры элементов, с которыми происходит кондуктивный и лучистый теплообмен i -го элемента соответственно;

Q_{li} – тепловой поток, выделяемый в i -м элементе, $Q_{li} = (1 - \eta) N_{эли}$;

Q_{ei} – тепловой поток, исходящий в ОКП;

R_{ir} – термическое сопротивление между i -м и r -м элементами.

В выражении (10) учтен только один цикл переотражения между элементами (допущение дает погрешность в определении величины суммарного теплового потока не более 5–7%), в соответствии с законом Кирхгофа принято $A_{i(j,r)} = \varepsilon_{i(j,r)}$, ввиду того что температуры блоков бортовой аппаратуры находятся в достаточно узком диапазоне.

Особенностью устройства современных КА является то, что они, как правило, имеют негерметичную конструкцию на основе сотовых панелей с тепловыми трубами. Блоки бортовой аппаратуры крепятся непосредственно на панелях, в качестве термической связи выступает либо узел крепления (термоплата), либо тепловая труба, проходящая как через блок аппаратуры, так и через радиационный теплообменник, выполненный как одно целое с сотовой панелью.

Для простого узла крепления термическое сопротивление определяется как $R_{ir} = (\alpha_{ir} S_{ir})^{-1}$, где α_{ir} , S_{ir} – коэффициент теплоотдачи и площадь контакта между i -м и r -м элементами соответственно.

Термическое сопротивление тепловой трубы рассчитывается из выражения $R_{ir} = (k_{TTr} S_{TTr})^{-1}$, где S_{TTr} – площадь поперечного сечения парового канала; k_{TTr} – коэффициент осевой теплопередачи. В качестве разности температур принимается перепад температур ΔT_{TTr} между зонами испарения и конденсации в тепловой трубе [10].

Внешний тепловой поток вычисляется в соответствии с общей зависимостью [10,11]

$$Q_{ei} = Q_{Si} + Q_{СОБi} + Q_{ОТРi} + Q_{МОЛi} + Q_{РЕКi} - Q_{ИЗЛi}. \quad (11)$$

Здесь Q_{Si} – поток прямого солнечного излучения, поглощаемый i -м внешним

элементом КА, $Q_{Si} = A_{si}^d q_s S_{Ti} \cos \varphi_i (L_6(t), \alpha_6(t))$, где S_{Ti} , φ_i , A_{si}^d – площадь элемента, угол падения, коэффициент поглощения солнечного излучения соответственно;

$Q_{СОБi}$ – поток собственного теплового излучения Земли, поглощаемого i -м внешним элементом КА,

$$Q_{СОБi} = 0,25 \varepsilon_i^d q_s S_{Ti} (1 - A_3) \varphi_{1i} (L_6(t), \alpha_6(t)),$$

где $A_3, \varphi_{1i}, \varepsilon_i^d$ – среднее альбедо Земли, локальный угловой коэффициент и степень черноты поверхности соответственно;

$Q_{ОТРi}$ – поток солнечного излучения, отраженного от поверхности Земли, поглощаемого i -м внешним элементом КА,

$$Q_{ОТРi} = A_{si}^d q_s S_{Ti} A_3 \varphi_{2i} (L_6(t), \alpha_6(t)),$$

где φ_{2i} – локальный комбинированный угловой коэффициент;

$Q_{МОЛi}, Q_{РЕКi}$ – молекулярный атмосферный поток и поток рекомбинации соответственно;

$Q_{ИЗЛi}$ – собственный излучаемый тепловой поток i -го элемента,

$$Q_{ИЗЛi} = \varepsilon_i^d \eta_{pi} \sigma T_i^4 S_{Ti},$$

где η_{pi} – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения температуры, $\eta_{pi} \in (0, 1]$.

Оптические коэффициенты A_{si}^d и ε_i^d с учетом деградации в результате воздействия ЧКМ определяются в соответствии с выражением (4).

Для определения локального и локального комбинированного угловых коэффициентов существуют достаточно точные аналитические выражения, приведенные в [12].

Очевидно, что нарушение ориентации КА, которое может возникнуть в результате воздействия ЧКМ на элементы СУД, окажет влияние на функционирование СОТР за счет изменения внешних тепловых потоков, что учтено в модели функционирования СОТР через значения коэффициентов $\varphi_{1i} (L_6(t), \alpha_6(t))$ в слагаемых выражения (11).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

С помощью представленной математической модели можно определять широкий спектр показателей качества процессов функционирования как КА в целом, так и его отдельных систем и элементов в условиях воздействия ЧКМ.

Учитывая то, что ряд параметров, характеризующих исходные данные и результаты применения КА, как правило, носят случайный характер, в роли комплексного показателя оценивания качества процесса функционирования КА целесообразно использовать вероятность успешного выполнения целевой задачи в условиях воздействия ЧКМ, определяемую с учетом выполненной ранее формализации целевой задачи с помощью выражения

$$P_{КА} = P(\hat{F}), \quad (12)$$

где

$$\hat{F} = \left(\prod_{i=1}^n \hat{x}_i(t) = 1 \right) \wedge \left(\hat{E}_{СЭС}(t) > E_{СЭС}^{\min} \right) \wedge \left(\hat{L}_3(t) \in \{L_3(t)\}^n \right) \wedge \left(\hat{\alpha}_6(t) \in \{\alpha_6(t)\}^n \right) \wedge \left(\hat{T}_{(i)}(t) \in \{T_{(i)}(t)\} \right).$$

В зависимости от того, к какому классу условий эксплуатации КА будет отнесено воздействие ЧКМ (нормальным или нештатным), данный показатель будет характеризовать либо надежность, либо стойкость КА.

Для расчета $P_{КА}$ хорошо подходит метод статистического имитационного моделирования (СИМ), главным преимуществом которого является возможность моделировать стохастические объекты практически любой сложности с высокой степенью адекватности.

Для реализации метода СИМ на основе представленной математической модели функционирования элементов КА и существующих между ними связей строится так называемая «имитационная модель» процесса функционирования КА, отображающая его в формализованном виде с помощью алгоритмического описания. Влияние случайных факторов на процессы функционирования БС имитируется путем моделирования случайных объектов с обусловленным характером протекания процесса вероятностными характеристиками.

При оценке показателей эффективности рассматриваемых в работе средств основными случайными параметрами являются:

- параметры воздействия ЧКМ;
- температура выхода из строя ОР СОТР;
- нагрузка на СЭС.

Получение оценки $P_{КА}$ методом СИМ осуществляется по результатам численного эксперимента как отношение числа испытаний, при которых произошло выполнение условия F , к общему числу испытаний, т.е. $P_{КА} = m/n$.

Кроме того, использование СИМ позволяет оценивать частные показатели качества процессов функционирования бортового обеспечивающего комплекса КА, например:

$$\begin{aligned} P_{СЭС} &= P\left(\hat{E}_{СЭС}(t) > E_{СЭС}^{\min}\right) = m_{СЭС}/n; \\ P_{СОТР} &= P\left(\hat{T}_{(l)}(t) \in \{T_{(l)}^n(t)\}\right) = m_{СОТР}/n; \\ P_{СУД} &= P\left(\left(\hat{L}_{(3)}(t) \in \{L_{(3)}^n(t)\}^n\right) \wedge \left(\alpha_{(6)}(t) \in \{\alpha_{(6)}^n(t)\}^n\right)\right) = \frac{m_{СУД}}{n}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $m_{СЭС}$, $m_{СОТР}$, $m_{СУД}$ – количество испытаний с положительным исходом для СЭС, СОТР и СУД соответственно.

Для определения требуемого количества испытаний используется формула [13]

$$n_{\min} = \left(\frac{\sigma_p}{\varepsilon} t_{\beta}(\beta)\right)^2, \quad (14)$$

- где σ_p – среднеквадратичное отклонение величины P ;
 ε – доверительный интервал, характеризующий требуемую точность оценки p ;
 $t_{\beta}(\beta)$ – распределение Лапласа для доверительной вероятности β .

Формула (14) применяется рекурсивно, так как до начала моделирования σ_p априорно неизвестно. Практическим приемом, позволяющим определять необходимое количество статистических испытаний для их конкретных параметров, является применение при программной реализации модели цикла типа WHILE...DO с расчетом текущих значений σ_p и n_{\min} условием выхода из цикла $n \geq n_{\min}$.

Особенностью КА является техническое многообразие его элементов и большое число режимов их функционирования, поэтому минимальный временной шаг моделирования для отдельных процессов может меняться в широком диапазоне от долей до десятков секунд.

Имитационное моделирование всех составляющих процесса функционирования КА с минимальным шагом приводит к неоправданным затратам вычислительных ресурсов, с учетом

высокой мощности множества значений варьируемых параметров эта задача может оказаться невыполнимой.

Решением проблемы может быть увязка моделируемых процессов путем использования:

- базовой (задающей) шкалы системного времени, выбор временного шага которой производится исходя из условия $\Delta t_0 = \min(\{\Delta t\}_{<n>})$, где $\{\Delta t\}_{<n>}$ – множество потребных шагов моделирования процессов функционирования бортовых систем (элементов);
- множеств параметров состояния элементов КА, включающих время последнего пересчета параметров в базовой шкале времени и шаг моделирования для конкретной группы элементов.

В ходе моделирования на каждом шаге базовой шкалы системного времени для множеств параметров состояния производится сравнение разности текущего времени и времени последнего расчета, и в случае ее превышения над потребным временным шагом моделирования запускается процедура пересчета множества параметров состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель является комплексной и позволяет учитывать не только влияние воздействия ЧКМ на отдельные уязвимые элементы, но и оценивать параметры функционирования КА в целом с учетом взаимовлияния нарушения функционирования бортовых систем, в первую очередь через комплекс условий функционирования бортового специального комплекса, определяющих качество выполнения целевой задачи.

Применяемый к моделированию подход позволяет использовать разные уровни масштабирования внутренней структуры КА, от крупного, когда в качестве элемента рассматривается отсек КА, до детального, при котором элементу сопоставляется блок бортовой аппаратуры.

Математическую модель целесообразно использовать для решения таких задач, как:

- исследование влияния факторов техногенного загрязнения ОКП на показатели, характеризующие работоспособность КА, его бортовых систем и комплексов;
- разработка научно-обоснованных технических требований к бортовым комплексам, системам и элементам КА;
- подтверждение заявленных тактико-технических характеристик перспективных КА;
- обоснование рационального состава и параметров перспективных КА (модель в данном случае используется в качестве основы соответствующих методик).

Список используемых источников

1. LEGEND: 3D/OD Evolutionary Model. – URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/modeling/legend.html> (дата обращения: 18.03.2020).
2. Космический мусор: в 2 кн. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – Кн. 1: Методы наблюдения и модели космического мусора / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – 248 с.
3. Показатели и критерии оценивания качества при формировании обобщенных требований к унифицированным космическим платформам / А.М. Денисов, С.Н. Краснощек, В.Ф. Пинегин, Д.В. Скворцов // Информатика и космос. – 2018. – № 1. – С. 163–166.
4. *Абдурахимов А.А., Скворцов Д.В.* Методологические основы обеспечения живучести космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 640. – С. 7–19.
5. Основы теории полета летательных аппаратов: учебник / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Богачев, С.А. Васьков и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 242 с.

6. Системы управления космических аппаратов: курс лекций / В.В. Бурмистров, А.А. Лукашевский, А.М. Ричняк, И.В. Фоминов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 190 с.

7. *Езерский В.В., Денисов А.М.* Проекционный метод определения функции затенения уязвимых элементов космического аппарата при воздействии потоков частиц космотехногенной среды // Военно-космическая деятельность России – истоки, состояние, перспективы: труды научно-практической конференции, СПб., 28 – 31 марта 2005 г. – СПб., 2005. – Т. 2. – С. 209–213.

8. *Абдурахимов А.А.* Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований деградации уязвимых элементов космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 122–131.

9. Расчетно-экспериментальная методика определения параметров ударного взаимодействия частиц космического мусора с конструкцией космического аппарата / П.С. Гончаров, А.М. Денисов, М.А. Светлорусов, Н.М. Тимофеев // Современные проблемы механики и ее преподавание в вузе: труды всероссийской научно-методической конференции, СПб., 14 – 15 октября 2014 г. – СПб., 2015. – Т. 2. – С. 66–69.

10. *Чеботарев В.Е., Косенко В.Е.* Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие. – Красноярск: СибГАУ, 2014. – 190 с.

11. *Ермолаев В.И., Езерский В.В., Полетаев Б.И.* Бортовое оборудование космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 507 с.

12. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / под ред. акад. Г.И. Петрова. – М.: Машиностроение, 1971. – 380 с.

13. Статистические модели и методы: учеб. пособие. – Оренбург: ОрГУ, 2004. – 138 с.

А.А. Абдурахимов,
доктор техн. наук, доцент;
М.С. Карев,
кандидат техн. наук;
С.Н. Краснощеков,
кандидат военных наук;
Д.В. Скворцов,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПРИЛОЖЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ К КОРПУСУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, ОСНАЩЕННОГО СИЛОВЫМ ГИРОСКОПИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ

Представлен подход к определению места приложения возмущающей силы на корпусе (внешних элементах) космических аппаратов различного назначения. Используется ограниченный набор исходных данных, которые могут быть получены путем телеметрических измерений. На основании полученных результатов дано обоснование возможности локализации места приложения внешней силы.

Ключевые слова: космический аппарат, техническое состояние, сила, момент силы.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных отечественных космических аппаратов (КА) представляют собой дорогостоящие сложные технические системы, нормальное функционирование которых обеспечивается рядом бортовых систем (БС). Возникновение любой нештатной ситуации требует выполнения тщательного анализа для выявления причин с целью парирования нештатной ситуации и недопущения ее повторения с аналогичными изделиями. Подобный анализ осложняется недоступностью находящегося в космическом пространстве КА для применения любых методов диагностики и анализа неисправностей, требующих наличия самого изделия или его элемента, в том числе визуального осмотра. Это же обстоятельство значительно ограничивает возможность ремонта неисправного элемента. Несмотря на активное развитие концепции «обслуживаемого космоса», в которой технологии орбитального обслуживания и ремонта, неразрывно связанные с технологией создания КА на базе модульных унифицированных платформ и унифицированных элементов бортовых систем, рассматриваются как наиболее вероятный путь для продолжения расширения космической деятельности и преодоления существующих технических ограничений, внедрение и техническая реализация ее элементов возможны только в долгосрочной перспективе. Основным способом преодоления нештатных ситуаций на настоящий момент является изменение режимов функционирования КА, его бортовых систем или отдельных элементов, в основном за счет коррекции бортового программного обеспечения (ПО).

Определение причин возникновения нештатных ситуаций (НШС), как правило, является нетривиальной задачей, требующей разработки частных математических моделей на каждый конкретный случай с последующим их агрегированием, что связано с ограниченностью исходных данных для анализа. Единственным доступным источником исходных данных, как правило, являются данные телеметрических измерений (ТМИ), номенклатура и дискретность которых различны даже в пределах серии однотипных КА, что тоже затрудняет разработку универсального научно-методического аппарата диагностирования технического состояния КА и анализа причин неисправностей. Тем не менее разработка адаптируемых моделей типовых нештатных ситуаций – актуальная научная задача, решение которой позволит каче-

ственно оценивать причины и последствия их возникновения и своевременно принимать меры по предотвращению или снижению тяжести последствий.

Настоящая работа посвящена исследованию одного из типовых сценариев развития нештатных ситуаций с КА в случае разгерметизации его внешних элементов – герметичных отсеков, трубопроводов гидравлических систем топливных баков и т.п. Возникающая при истечении газов и жидкостей реактивная сила способна привести к изменению параметров движения центра масс и к созданию возмущающего момента, который может изменить не только положение КА относительно центра масс, но и положение центра масс КА в пространстве. С учетом наличия исполнительных органов управления угловым движением, наиболее распространенным из которых для тяжелых КА является силовой гироскопический комплекс (СГК), изменения углового положения корпуса аппарата, как правило, не происходит. В этом случае оценить модуль и направление внешней возмущающей силы возможно в результате анализа ТМИ параметров СГК, что позволяет локализовать место возникновения негерметичности.

Для разработки представленной в статье методики наиболее перспективными, на наш взгляд, являются данные ТМИ участков сброса кинетического момента (СКМ) СГК, так как на них отключена система магнитной стабилизации.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИЛОЖЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ

В качестве исходных данных для проведения анализа НШС используются результаты ТМИ углов СГК во времени, которые представлены в виде матрицы

$$S = [t_1 \ \beta_1 \ \dots \ t_4 \ \beta_4] \in M_{m,n}(F), \quad (n = 8), \quad (1)$$

где t_i – вектор-столбец, элементами которого являются значения времени замера i -го угла СГК;

β_i – вектор-столбец, элементами которого являются значения i -го угла СГК, $i = 1(1)4$;

m – количество измерений.

Считается, что измерения углов β_i проводились одновременно ($t_i = t \ \forall i = 1(1)4$). Выделив из матрицы S подматрицы [2] (k) участков сброса кинетического момента (СКМ), получим

$$S_{СКМ}^i = S\{t_i\}\{1 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8\} \in M_{m,5}(F), \quad i = 1(1)k, \quad (2)$$

где k – количество участков СКМ;

m – количество измерений углов СГК на (k) участках СКМ.

Таким образом, для каждого ($i = 1(1)k$) участка СКМ определяется вектор-столбец временных измерений вида

$$T_{СКМ}^i = S_{СКМ}^i\{t_i\}\{1\}, \quad (3)$$

и матрица углов СГК вида

$$B_i = S_{СКМ}^i\{t_i\}\{2 \ 3 \ 4 \ 5\} = [\{\beta_j\}] \in M_{m,4}(F), \quad j = 1(1)4, \quad (4)$$

где m – количество измерений углов СГК на i -м участке СКМ.

Примем скорость изменения углового положения подвижной системы силового гироскопического привода (ПС СГК) $\dot{\beta}(t) \ \forall i = 1(1)4$ как отношение [1] разности значений угла $\beta_i(t)$ к разности значения аргумента (t):

$$\dot{\beta}(t) \approx \frac{\beta(t+\Delta t) - \beta(t)}{\Delta t}. \quad (5)$$

Тогда для каждого ($i = 1(1)k$) участка СКМ определим матрицу скорости изменения углов SGK:

$$\dot{B}_i = \left\{ \left\{ \dot{\beta}_j \right\} \right\} \in M_{mn}(F), j = 1(1)n, n = 4. \quad (6)$$

На каждом участке СКМ (при стабилизации КА в конце участка) суммарный момент четырех составляющих: внешнего воздействия ($M_{\text{ВВ}}$), управляющих ракетных двигателей ($M_{\text{УРД}}$), момента ($M_{\text{СГК}}$) и кинетического момента SGK ($M_{\text{СГК+КА}}$), равен нулю:

$$\int_{t_n}^{t_m} M_{\text{ВВ}} dt + \int_{t_n}^{t_m} (M_{\text{УРД}} + M_{\text{СГК}} + M_{\text{СГК+КА}}) dt = 0, \quad (7)$$

где t_n, t_m – время начала и конца участка СКМ.

Тогда суммарный момент внешнего воздействия (ВВ) НШС на каждом участке СКМ определяется выражением

$$\int_{t_n}^{t_m} M_{\text{ВВ}} dt = - \int_{t_n}^{t_m} (M_{\text{УРД}} + M_{\text{СГК}} + M_{\text{СГК+КА}}) dt. \quad (8)$$

Для расчета суммарного момента ($M_{\text{УРД}}$) управляющих ракетных двигателей на каждом участке СКМ, зная количество и время включения УРД, определяются:

– суммарный вектор тяги в связанной системе координат (ССК), создаваемый УРД на участке СКМ:

$$P = \begin{bmatrix} P_x & 0 & 0 \\ 0 & P_y & 0 \\ 0 & 0 & P_z \end{bmatrix} \in M_{m,n}(F), (m = 3, n = 3), \quad (9)$$

– вектор плеча суммарного вектора тяги УРД:

$$L = [L_x \ L_y \ L_z]^T \in M_{m,n}(F), (m = 3, n = 3). \quad (10)$$

Тогда интегральный кинетический момент, создаваемый УРД в ССК на участке СКМ, вычисляется следующим образом:

$$M_{\text{УРД}} = P \cdot L \in M_{m,n}(F), (m = 3, n = 1). \quad (11)$$

Для расчета момента SGK ($M_{\text{СГК}}$) и гироскопического момента SGK совместно с КА ($M_{\text{СГК+КА}}$) введем матрицу значений кинетического момента SGK:

$$H = [\{H_i\}]^T = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4]^T \in M_{m,n}(F), (i = 1(1)m, m = 4, n = 1). \quad (12)$$

Для учета влияния угла установки SGK (α) определим матрицу

$$A = \text{sint}\left(\frac{\pi}{2} \cdot [-1 \ 0]^T + \alpha \cdot [1 \ -1]^T\right) \in M_{m,n}(F), (m = 2, n = 1), \quad (13)$$

для чего введем следующий операнд:

$$\text{sint}(C \in M_{m,n}(F)) = [(\sin(c_{ij}))_{ij}] \in M_{m,n}(F). \quad (14)$$

Тогда для расчета момента SGK будем использовать матрицу

$$A_M = [A^T \ 1]^T \in M_{m,n}(F), (m = 3, n = 1), \quad (15)$$

а для суммарного кинетического момента SGK матрицу

$$A_K = [-A^T \ 1]^T \in M_{m,n}(F), (m = 3, n = 1). \quad (16)$$

Введем дополнительные матрицы:

$$A_n = [0 \ 0], A_{ed} = [1 \ 1],$$

$$B^1 = [B \ B \ B]^T, A^1 = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Для расчета момента СГК ($M_{СГК}$) определим элементы матрицы A^1 :

$$A_{11} = \begin{bmatrix} A_n \\ A_n \end{bmatrix}, A_{12} = \begin{bmatrix} A_{ed} \\ A_n \end{bmatrix} \cdot \pi, A_{21} = A_{ed} \cdot \frac{3\pi}{2}, A_{22} = A_{ed} \cdot \frac{\pi}{2}. \quad (18)$$

Введем операнд cost :

$$\text{cost}(C \in M_{m,n}(F)) = [(\cos(c_{ij}))_{ij}] \in M_{m,n}(F). \quad (19)$$

Тогда момент СГК ($M_{СГК}$) определяется выражением

$$M_{СГК} = A_M \circ (\text{cost}(A^1 + B^1) * (H \circ \dot{B})) \in M_{m,n}(F), \quad (m = 3, n = 1). \quad (20)$$

Произведение Адамара (\circ) [2] соответствует операции поэлементного умножения «*» в MATLAB [3].

Гироскопический момент системы СГК совместно с КА ($M_{СГК+КА}$) определяется следующим выражением:

$$M_{СГК+КА} = K_s \times \omega, \quad (21)$$

где ω – угловая скорость КА, $\omega = [0 \ 0 \ \omega_z]^T \in M_{m,n}(F), (m = 3, n = 1)$.

Кинетический момент системы КА совместно с СГК определяется выражением

$$K_s = J \cdot \omega + K_{СГК}, \quad (22)$$

где J – расчетный тензорный вектор КА, $J = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \in M_{m,n}(F), (m = 3, n = 3)$.

Для расчета суммарного кинетического момента СГК ($K_{СГК}$) переопределим блоки матрицы A^1 :

$$A_{11} = \begin{bmatrix} A_n \\ A_n \end{bmatrix}, A_{12} = \begin{bmatrix} A_{ed} \\ A_n \end{bmatrix} \cdot \pi, A_{21} = A_{ed} \cdot \frac{\pi}{2}, A_{22} = A_{ed} * \frac{3\pi}{2}. \quad (23)$$

Тогда

$$K_{СГК} = A_K \circ (\text{sint}(A^1 + B^1) \cdot H) \in M_{m,n}(F), \quad (m = 3, n = 1). \quad (24)$$

Расчет интегралов моментов производится на временных интервалах участков СКМ:

$$\Delta t_i = [t_n, t_m]_i, \quad i = 1(1)k, \quad (25)$$

где t_n, t_m – время начала и конца участка СКМ;

k – количество участков СКМ.

В результате получим матрицу ($M_{ВВ}$), элементами которой являются интегралы моментов внешнего воздействия для каждого участка СКМ в ССК:

$$M_{ВВ} = \left[\left(\int_{t_n}^{t_m} M_{ВВ} dt \right) \right] = [(M_{ВВ}^x \ M_{ВВ}^y \ M_{ВВ}^z)_i] \in M_{k,p}(F), \quad i = 1(1)k, j = 1(1)p, p = 3. \quad (26)$$

Моменты ВВ могут изменять свое направление в результате изменения возмущающей реактивной силы, однако точка приложения возмущающей силы для рассматриваемой неисправности остается постоянной. В этом случае векторные произведения моментов в разные интервалы времени совпадают по направлению (коллинеарны) с плечом приложенной возмущающей силы.

Сформируем из матрицы $M_{\text{ВВ}}$ матрицу пар моментов ВВ:

$$M_{\text{ВВ}} = [M_1 \ M_2] \in M_{m,n}(F), \quad m = C_k^2, \quad n = 2, \quad (27)$$

где M_1, M_2 – вектор-столбцы моментов ВВ, M_1 и $M_2 \in M_{m,n}(F), m = C_k^2, n = 3$;

C_k^2 – число пар сочетаний из k элементов;

k – количество участков СКМ.

Определим матрицу векторов приложения силы ВВ в ССК из выражения

$$R = [R_x \ R_y \ R_z] = M_1 \times M_2 \in M_{m,n}(F), \quad m = C_k^2, \quad n = 3. \quad (28)$$

По R определим матрицу углов ориентации векторов приложения силы ВВ в ССК (рис. 1):

$$F = [F^1 \ F^2] \in M_{m,n}(F), \quad m = C_k^2, \quad n = 2, \quad (29)$$

$$F^1 = [\phi_i^1] = \arctgt\left(\frac{R_z}{R_x}\right), \quad F^2 = [\phi_i^2] = \arctgt\left(\frac{R_y}{\sqrt{R_x^2 + R_z^2}}\right), \quad i = 1(1)m,$$

для чего введен операнд $\arctgt(C \in M_{m,n}(F)) = [(\arctg(c_{ij}))_{ij}] \in M_{m,n}(F)$.

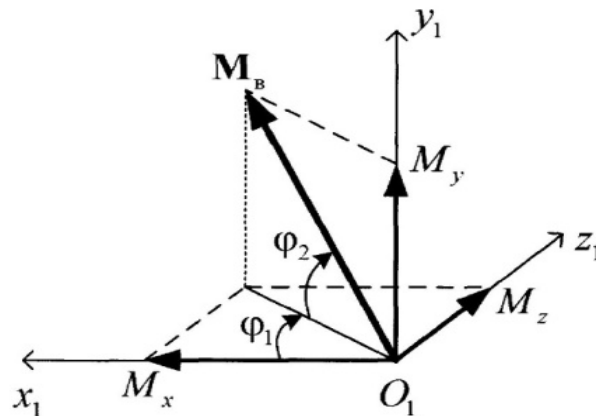


Рис. 1. Расположение углов ориентации вектора приложения силы ВВ

Как правило, количество интервалов СКМ лежит в интервале $3 \leq N \leq 4$, а количество сочетаний пар по количеству интервалов СКМ в интервале $3 \leq C_k^2 \leq 8$, что можно определить как «малая выборка». В этом случае для выявления выбросов («выскакивающих вариантов») применим метод, основанный на оценке различий «крайних вариантов» [4] исследуемой совокупности.

Сначала определим выбросы по углу φ^1 . Для матрицы F определим множество индексов строк $\alpha = \{\alpha_i\} = \{1, 2, \dots, N\}$ и столбцов $\beta = \{1, 2\}$, где $N = C_k^n$, ($n = 2, k$ – количество участков СКМ). Преобразуем матрицу F так, что вектор F^1 будет представлять собой вариационный ряд, т.е. элементы в нем располагаются в порядке возрастания. Определим выскакивающие варианты, для чего воспользуемся методикой [4] расчета (табл. 1) критериев для оценки наибольших и наименьших вариантов вариационного ряда, при этом $N = C_k^n$, ($n = 2, k$ – количество участков СКМ).

Верхний ряд отношений в табл. 1 предназначен для оценки выскакивающих наибольших вариантов, нижний ряд – для наименьших вариантов.

Выделим подматрицу выбросов $F_v^1 = F(\alpha_v, \beta_v)$, ($\alpha_v \subseteq \{\alpha_i\}, \beta_v = \beta$), где $\{\alpha_i\}$ – множество индексов матрицы F , соответствующих выскакивающим вариантам. Исключаем выскакивающие варианты из матрицы F .

Определяем дополнение $\alpha_{\bar{v}}$ к множеству индексов α , исключив из него множество α_v :

$$\alpha_{\bar{v}} = \alpha \setminus \alpha_v. \quad (30)$$

В результате определяем матрицу $F_v^1 = F[F_v^1 \ F_v^2] = F(\alpha_{\bar{v}}, \beta_{\bar{v}})$, ($\alpha_{\bar{v}} \subseteq (\alpha \setminus \alpha_v)$, $\beta_{\bar{v}} = \beta$), представляющую собой подматрицу, полученную из F , после удаления строк с номерами из α_v . Далее по той же схеме проводим исключение выбросов по углу φ^2 на векторе $F_v^2 = [\varphi_i^2]$, в результате получим окончательную матрицу $F_{\bar{v}}$.

Таблица 1

Критерии для исключения выскакивающих значений

| Кол-во вариантов | Уровень достоверности | | | | | |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | 95% | | | 99% | | |
| | Отношения | | | | | |
| n | $\frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_1}$ | $\frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_2}$ | $\frac{X_n - X_{n-2}}{X_n - X_1}$ | $\frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_1}$ | $\frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_2}$ | $\frac{X_n - X_{n-2}}{X_n - X_1}$ |
| | $\frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1}$ | $\frac{X_2 - X_1}{X_n - X_2}$ | $\frac{X_3 - X_1}{X_n - X_1}$ | $\frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1}$ | $\frac{X_2 - X_1}{X_n - X_2}$ | $\frac{X_3 - X_1}{X_n - X_1}$ |
| 3 | 0,941 | 1,000 | 1,000 | 0,988 | 1,000 | 1,000 |
| 4 | 0,765 | 0,955 | 0,967 | 0,889 | 0,991 | 0,992 |
| 5 | 0,642 | 0,807 | 0,845 | 0,780 | 0,916 | 0,929 |
| 6 | 0,560 | 0,689 | 0,736 | 0,698 | 0,805 | 0,836 |
| 7 | 0,507 | 0,610 | 0,661 | 0,637 | 0,740 | 0,778 |
| 8 | 0,468 | 0,554 | 0,607 | 0,590 | 0,683 | 0,710 |

Объединив матрицы $R = [R_x \ R_y \ R_z]$ и $F_{\bar{v}}$, получим блочную матрицу $V_{\text{ВВ}}$, элементами которой являются координаты $[R_x \ R_y \ R_z]$ и углы $[F_v^1 \ F_v^2]$ вектора приложения силы ВВ в ССК:

$$V_{\text{ВВ}} = [R \ F_{\bar{v}}]. \quad (31)$$

Проведем численное исследование. Рассмотрим применение предложенной методики для локализации места возникновения негерметичности. Методика реализована средствами MATLAB [3]. Все исходные параметры, используемые при моделировании, представлены в табл. 2. Результаты моделирования приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 2

Исходные данные для моделирования

| Наименование | Значение | | Ед.изм. |
|--|---------------------------|-------------|---------|
| Набор данных с результатами измерений углов СГК за весь период развития НШС $S = [t_1 \ \beta_1 \dots t_4 \ \beta_4] \in M_{m,n}(F)$, (m – количество измерений, $n = 8$) | Имя файла: "Data_НШС.mat" | | – |
| | Количество записей | 1163 | |
| | время начала | время конца | |
| | 3:20:00 | 4:00:00 | |

Окончание табл. 2

| Наименование | | Значение | | | Ед.изм. |
|---|------------------------|----------|---------|---------|---------|
| Количество участков СКМ | | 4 | | | – |
| Временные интервалы СКМ | СКМ ₁ | 3:29:38 | 3:30:06 | | ч:м:с |
| | СКМ ₂ | 3:35:14 | 3:36:23 | | |
| | СКМ ₃ | 3:46:51 | 3:47:54 | | |
| | СКМ ₄ | 3:59:08 | 4:00:00 | | |
| Суммарный импульс тяги в ССК, создаваемый УРД на участках СКМ $P = [P_x \ P_y \ P_z]$ | СКМ ₁ | 51.5444 | 50.0188 | 51.0094 | Н |
| | СКМ ₂ | 30.3203 | 32.9689 | 37.2761 | |
| | СКМ ₃ | 23.7211 | 29.6633 | 37.0977 | |
| | СКМ ₄ | 18.5489 | 26.0968 | 34.9575 | |
| Вектор плеча суммарного вектора тяги УРД $L = \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix}$ | 3.16 | | | м | |
| | 1.98 | | | | |
| | 3.16 | | | | |
| Угловая скорость КА $\omega = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z \end{bmatrix}$ | 0 | | | рад/с | |
| | 0 | | | | |
| | 1.012*10 ⁻³ | | | | |
| Расчетный тензорный вектор КА $J = \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix}$ | 43353 | | | кг·м·м | |
| | 14691 | | | | |
| | 50041 | | | | |
| Кинетический момент СГК $H = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4],$ $H_i = H \ \forall i = 1(1)4$ | 94 | | | Н·м·с | |
| Угол установки СГК α | 25 | | | град. | |

Таблица 3

Результаты моделирования до исключения выбросов

| Индекс | $V_{ВВ}$ – до исключения выбросов | | | | |
|--------|-----------------------------------|--------|--------|-------------|-------------|
| | R | | | φ^1 | φ^2 |
| 1 | 0,1212 | 0,9370 | 0,3276 | 69,70 | 69,55 |
| 2 | -0,4669 | 0,5181 | 0,7166 | 123,09 | 31,21 |
| 3 | -0,4828 | 0,4959 | 0,7218 | 123,78 | 29,73 |
| 4 | -0,5228 | 0,2342 | 0,8196 | 122,53 | 13,54 |
| 5 | -0,4443 | 0,4001 | 0,8015 | 119,00 | 23,59 |
| 6 | -0,4774 | 0,4816 | 0,7350 | 123,00 | 28,79 |

Таблица 4

Результаты моделирования после исключения выбросов

| Индекс | $V_{ВВ}$ – после исключения выбросов | | | | |
|--------|--------------------------------------|--------|--------|-------------|-------------|
| | R | | | φ^1 | φ^2 |
| 2 | -0,4669 | 0,5181 | 0,7166 | 123,09 | 31,21 |
| 3 | -0,4828 | 0,4959 | 0,7218 | 123,78 | 29,73 |
| 5 | -0,4443 | 0,4001 | 0,8015 | 119,00 | 23,59 |
| 6 | -0,4774 | 0,4816 | 0,7350 | 123,00 | 28,79 |

На рис. 2 и 3 показаны векторы приложения силы VV до и после исключения выбросов. Пересечения найденных векторов с поверхностью корпуса КА будут определять возможные области приложения возмущающей силы, возникшей в результате разгерметизации элементов КА.

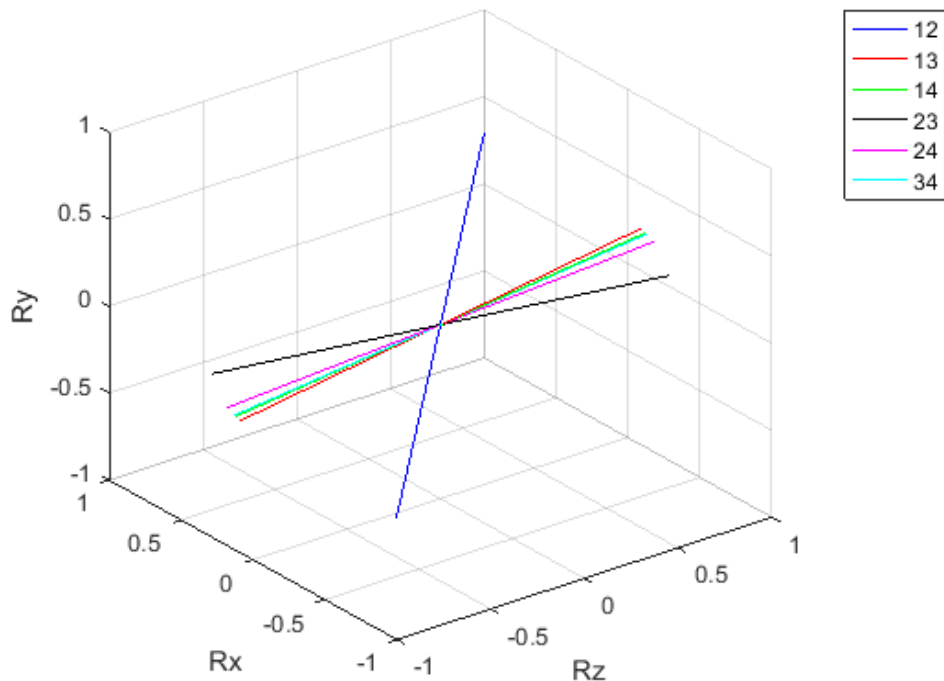


Рис. 2. Направления вектора приложения силы VV до исключения выбросов

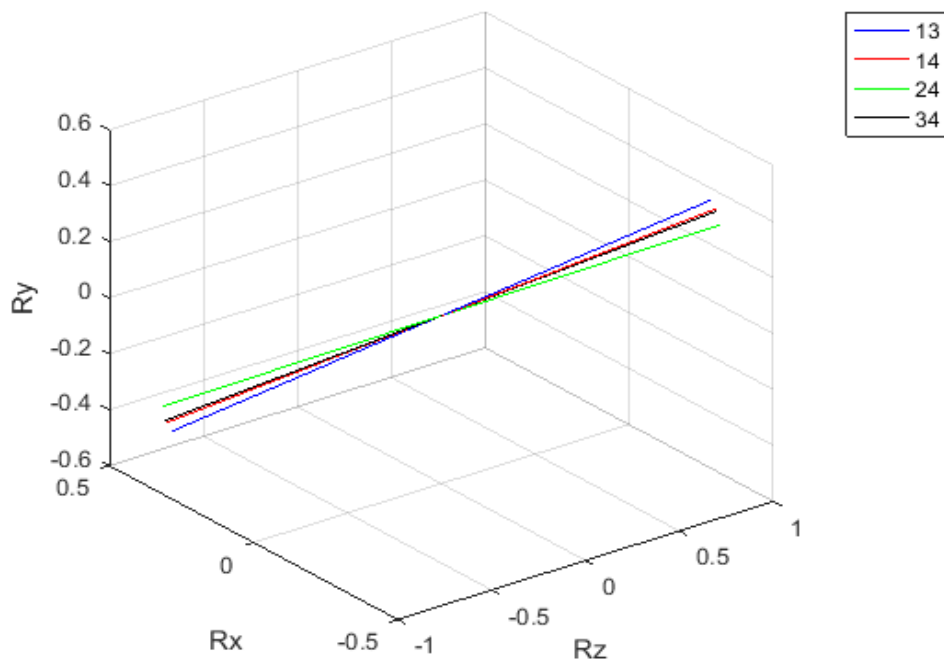


Рис. 3. Направления вектора приложения силы VV после исключения выбросов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана методика, позволяющая приближенно оценить место возникновения возмущающей силы, приложенной к корпусу КА. В условиях орбитального функционирования возникновение такой силы может быть обусловлено различными причинами разгерметизации внешних элементов КА. В том числе возникновение реактивной силы может быть результатом истечения газов либо теплоносителя в окружающее пространство.

Результаты численного моделирования позволяют сделать вывод о том, что исходные данные в части ТМИ параметров SGK необходимо фильтровать, исключая некорректные значения. Методика прошла апробацию при анализе причин возникновения нештатной ситуации с КА при разгерметизации герметичного элемента и показала сходимость результатов с данными экспериментального моделирования.

Результаты исследований могут быть использованы в дальнейшем при работе рекламационных комиссий или межведомственных рабочих групп по анализу причин нештатных ситуаций с КА. Кроме того, модель может использоваться как элемент автономной интеллектуальной системы оценивания технического состояния КА.

Список используемых источников

1. *Бахвалов Н.С.* Численные методы. – М.: Наука, 1975. – Т.1. – 632 с.
2. *Хорн Р., Джонсон Ч.* Матричный анализ. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 667 с.
3. *Ануфриев И.Е., Смирнов Ф.Б., Смирнова Е.Н.* MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
4. *Ашмарин И.П., Васильев Н.Н., Амбросов В.А.* Быстрые методы статистической обработки и планирования экспериментов. – Л.: Издательство ленинградского университета, 1971. – 78 с.
5. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

Е.Н. Белихин

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ БОРТОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Исследуется зависимость точностных характеристик бортовых оптико-электронных средств (БОЭС) от характеристик разброса их параметров. Разработана упрощенная математическая модель связи погрешности БОЭС с отклонениями их параметров от расчетных значений, которая удовлетворяет требованиям по точности. Разработана методика распределения допусков на параметры БОЭС. Предложен показатель качества решения задачи распределения допусков на параметры БОЭС космических аппаратов (КА).

Ключевые слова: оптико-электронные средства, разброс параметров, распределение допусков.

ВВЕДЕНИЕ

К БОЭС КА предъявляются достаточно жесткие требования по точности [1]. Точность БОЭС характеризуется погрешностью определения углового положения наблюдаемого космического объекта (КО). Под погрешностью БОЭС понимается случайная величина, которая зависит от допусков на параметры БОЭС [2]. Задача распределения допусков формулируется как задача определения значений характеристик разброса параметров БОЭС, в качестве которых рассматривается дисперсия отклонений параметров БОЭС от номинальных значений.

В настоящее время существует ряд методик расчета параметров БОЭС [3, 4], однако они не учитывают случайные отклонения параметров от номинальных значений. Вследствие этого данные методики невозможно использовать для решения задачи распределения допусков на параметры БОЭС, следовательно необходимо разработать методику, которая позволит решить данную задачу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предполагается, что известен $\tilde{\mathbf{C}} = [t_{\text{экс}}, U_{\text{п}}, D, d]$ – вектор параметров БОЭС, отклонения которых $\Delta\tilde{\mathbf{C}}$ наиболее существенно влияют на погрешность определения параметров движения КО, $t_{\text{экс}}$ – время экспозиции, $U_{\text{п}}$ – пороговое напряжение на пикселе матричного приемника оптического излучения; D – диаметр входного зрачка; d – линейный размер пикселя. Кроме того, заданы $\mathbf{M}_{\Delta\tilde{\mathbf{C}}}, \mathbf{K}_{\Delta\tilde{\mathbf{C}}}$ – математическое ожидание и диагональная корреляционная матрица m -мерного вектора отклонений параметров БОЭС от расчетных значений: $\mathbf{K}_{\Delta\tilde{\mathbf{C}}_i} = \mathbf{D}_{\Delta\tilde{\mathbf{C}}_i} = (\Delta\tilde{\mathbf{C}}_i/3)^2, i=1..m$ и $\mathbf{M}_{\Delta\mathbf{P}_{\text{исх}}}, \mathbf{K}_{\Delta\mathbf{P}_{\text{исх}}}$ – математическое ожидание и корреляционная матрица n -мерного вектора погрешности БОЭС $\Delta\mathbf{P}_{\text{исх}}$, элементы которого не связаны линейной зависимостью. Вектор погрешности БОЭС распределен по нормальному закону. Требования к погрешности БОЭС заданы в виде вектора $\Delta\mathbf{P}_{\text{т}}$.

Необходимо определить дисперсии отклонений параметров БОЭС от номинальных значений $\mathbf{D}_{\Delta\tilde{\mathbf{C}}_i}, i=1..m$, при которых погрешность БОЭС удовлетворяет заданным требованиям по точности.

Для решения данной задачи необходимо воспользоваться моделью связи случайных параметров системы с погрешностью определения координат изображения КО. Двумерная си-

стема координат, в которой определяются координаты изображения КО, а также погрешность БОЭС $\Delta P = [\Delta x \ \Delta y]^T$ представлены на рис. 1.

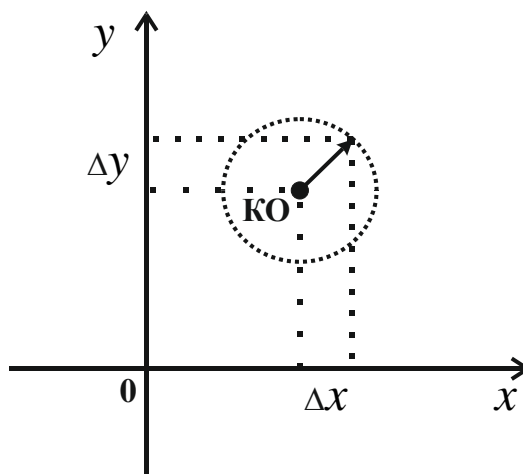


Рис. 1. Система координат, связанная с БОЭС

Подходящей моделью является математическая модель, которая предложена в работе [2]. В общем виде данную модель можно представить в виде зависимости

$$\Delta P_{\text{исх}} = F(\mathbf{X}_0, \mathbf{U}, \Delta \tilde{C}), \quad (1)$$

где \mathbf{X}_0 – вектор координат центра изображения КО, $\mathbf{X}_0 = [x_0 \ y_0]^T$;

\mathbf{U} – вектор-функция алгоритма определения координат изображения КО.

Однако данная математическая модель является слишком сложной, определить требуемые характеристики разброса параметров БОЭС с ее помощью можно только методом подбора, а для этого понадобится слишком много времени. Следовательно, необходимо разработать упрощенную модель, на основе которой будет возможно аналитическое решение данной задачи.

ПОСТРОЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Предлагается использовать линейную статистическую модель

$$\Delta P_M = \mathbf{A} \Delta \tilde{C}, \quad (2)$$

где ΔP_M – n -мерный вектор погрешности БОЭС модели;

\mathbf{A} – матрица неизвестных коэффициентов модели, $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times m}$.

Из теории вероятности известно, что если две зависимые случайные величины имеют нормальные законы распределения, то связь между ними может быть только линейной. Поскольку погрешность БОЭС является результатом большого числа случайных составляющих, то закон ее распределения в соответствии с центральной предельной теоремой близок к нормальному. Случайные отклонения параметров БОЭС от их расчетных значений также являются результатом воздействия на них большого числа независимых возмущений и в соответствии с этой же теоремой законы их распределения могут быть аппроксимированы нормальным законом. В связи с описанным выше, а также с учетом предположения об отсутствии систематических составляющих в отклонениях параметров ($\mathbf{M}_{\Delta \tilde{C}_{\text{исх}}} = 0$) и погрешности БОЭС ($\mathbf{M}_{\Delta P} = 0$) линейная модель (2) отражает функциональную связь между векторами

ΔP и $\Delta \tilde{C}$ как близкую к реальной. Для полного определения этой зависимости необходимо найти матрицу коэффициентов A .

Необходимо, чтобы выполнялось условие равенства ковариационных матриц векторов $K_{\Delta P_M}$ и $K_{\Delta P_{исх}}$, т.е.

$$K_{\Delta P_M} = K_{\Delta P_{исх}}, \quad (3)$$

где $K_{\Delta P_M}$, $K_{\Delta P_{исх}}$ – ковариационные матрицы векторов ΔP_M и $\Delta P_{исх}$ соответственно, причем $K_{\Delta P_{исх}}$ получена по модели (1).

Уравнение (3) эквивалентно уравнению

$$AK_{\Delta \tilde{C}_{исх}} A^T = K_{\Delta P_{исх}}, \quad (4)$$

где верхний индекс «Т» обозначает операцию транспонирования матрицы; а символом $K_{\Delta \tilde{C}_{исх}}$ обозначена диагональная матрица, на главной диагонали которой стоят дисперсии $D_{\Delta \tilde{C}_{исх}}$, $i \in \overline{1, m}$.

Учитывая случайную природу векторов ΔP и $\Delta \tilde{C}$, в качестве матрицы коэффициентов A возьмем такое значение, которое обеспечивает минимум среднего квадрата разности векторов $\Delta P_{исх}$ и ΔP_M , т.е. функционала

$$J = M \left[|\Delta P_{исх} - \Delta P_M|^2 \right],$$

где M – оператор математического ожидания, и одновременно выполнение условия (4).

Иначе говоря,

$$A = \arg \min_{A \in R^{n \times m}} M \left[|\Delta \hat{P}_{исх} - \Delta \hat{P}_M|^2 \right]$$

при условии, что $AK_{\Delta \tilde{C}_{исх}} A^T = K_{\Delta P_{исх}}$. Решение этой оптимизационной задачи найдем методом неопределенных множителей Лагранжа.

Функцию Лагранжа представим следующим образом

$$L = M \left[(\Delta \hat{P}_{исх} - A \Delta \tilde{C}_{исх})^T (\Delta \hat{P}_{исх} - A \Delta \tilde{C}_{исх}) \right] + \text{tr} \mu (K_{\Delta \hat{P}_{исх}} - AK_{\Delta \tilde{C}_{исх}} A^T),$$

где μ – симметричная матрица неопределенных множителей Лагранжа размерности $p \times p$;

tr – след матрицы.

Раскрыв круглые скобки в первом слагаемом и применив оператор математического ожидания, получим

$$L = \text{tr} \left[K_{\Delta \hat{P}_{исх}} - AK_{\Delta \tilde{C}_{исх} \Delta \hat{P}_{исх}} - K_{\Delta \hat{P}_{исх} \Delta \tilde{C}_{исх}} A^T + AK_{\Delta \tilde{C}_{исх}} A^T + \mu (K_{\Delta \hat{P}_{исх}} - AK_{\Delta \tilde{C}_{исх}} A^T) \right],$$

где $K_{\Delta \tilde{C}_{исх} \Delta \hat{P}_{исх}}$ – взаимная ковариационная матрица векторов $\Delta \hat{P}_{исх}$ и $\Delta \tilde{C}_{исх}$, $K_{\Delta \tilde{C}_{исх} \Delta \hat{P}_{исх}} = K_{\Delta \hat{P}_{исх} \Delta \tilde{C}_{исх}}^T$.

Необходимые условия минимума функции Лагранжа найдем путем приравнивания к нулю первых производных от функции L по матрицам A и μ . Они имеют следующий вид:

$$\frac{\partial L}{\partial A} = -2K_{\Delta \hat{P}_{исх} \Delta \tilde{C}_{исх}} + 2AK_{\Delta \tilde{C}_{исх}} - 2\mu AK_{\Delta \tilde{C}_{исх}} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = \mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} - \mathbf{A} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}} \mathbf{A}^T = 0. \quad (6)$$

Из уравнения (4) найдем

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mu)^{-1} \mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1}; \quad (7)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица n -го порядка.

Подставив матрицу \mathbf{A} в уравнение (6), получим уравнение для определения матрицы неизвестных параметров μ :

$$\mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} = (\mathbf{I} - \mu)^{-1} \mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1} (\mathbf{I} - \mu)^{-1}. \quad (8)$$

Представим положительно определенную матрицу $\mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1}$ в следующем виде:

$$\mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1} = \mathbf{S} \mathbf{N} \mathbf{S}^T,$$

где \mathbf{N} – диагональная матрица, состоящая из собственных значений матрицы

$$\mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1};$$

\mathbf{S} – ортогональная матрица, столбцами которой являются собственные векторы этой матрицы.

Подставив это разложение в уравнение (8), получим

$$\mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} = (\mathbf{I} - \mu)^{-1} \mathbf{S} \mathbf{N} \mathbf{S}^T (\mathbf{I} - \mu)^{-1}. \quad (9)$$

Проделав ряд математических операций для определения матрицы неопределенных множителей Лагранжа μ , и последующей подстановки данной матрицы в (7), получаем выражение для определения матрицы параметров для модели (2):

$$\mathbf{A} = \mathbf{S} \mathbf{N}^{-\frac{1}{2}} (\mathbf{N}^{\frac{1}{2}} \mathbf{S}^T \mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} \mathbf{S} \mathbf{N}^{\frac{1}{2}})^{-\frac{1}{2}} \mathbf{N}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{S}^T \mathbf{K}_{\Delta \hat{p}_{исх}} \mathbf{K}_{\Delta \tilde{c}_{исх}}^{-1}. \quad (10)$$

Отличие приближенного значения дисперсии погрешности БОЭС, вычисленного по модели (2), от точного значения дисперсии (1) не превышает 1%.

Таким образом, задача построения математической модели связи вектора отклонений параметров БОЭС от их номинальных значений с вектором его погрешности решена. При этом проверена точность данной модели. На основе разработанной модели может быть получено решение основной задачи – определение характеристик разброса параметров БОЭС, при которых удовлетворяются требования к прибору по точности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ БОРТОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Разработанная математическая модель (2) удовлетворяет требованиям по простоте и точности. Однако высокая точность модели является условием необходимым, но недостаточным. Если число случайных параметров больше размерности вектора погрешности БОЭС, то для получения однозначного решения необходимо выбрать некоторый показатель качества решения задачи. При этом необходимо, чтобы в процессе формирования требований к характеристикам разброса параметров БОЭС была возможность изменять характеристики отдельных составных частей системы, обеспечивая при этом удовлетворение требований к БОЭС по точности.

Рассмотрим линейную статистическую модель (2). В соответствии с ней вектор точностных характеристик БОЭС $\mathbf{D}_{\Delta P_{исх}}$, состоящий из дисперсий погрешности БОЭС, может быть найден по формуле

$$\mathbf{D}_{\Delta \hat{P}_M} = \mathbf{A}_{KB} \mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_{исх}}, \quad (11)$$

где элементы $n \times m$ -матрицы \mathbf{A}_{KB} равны квадратам соответствующих элементов матрицы \mathbf{A} .

Задача определения требований к характеристикам разброса параметров БОЭС в простейшем случае сводится к определению такого значения вектора дисперсий $\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T}$ отклонений параметров БОЭС от их расчетных значений, при котором дисперсии погрешности БОЭС будут совпадать с требуемыми значениями, заданными в виде вектора $\mathbf{D}_{\Delta \hat{P}_T}$.

Другими словами, требования к БОЭС по точности будут выполнены, если вектор дисперсий отклонений параметров БОЭС от их расчетных значений удовлетворяет уравнению

$$\mathbf{D}_{\Delta \hat{P}_T} = \mathbf{A}_{KB} \mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T}. \quad (12)$$

Поскольку размерность m вектора $\Delta \tilde{C}_T$, больше размерности n вектора погрешности БОЭС $\Delta \hat{P}_T$, то получить однозначное решение уравнения (12) относительно вектора $\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T}$ в общем случае невозможно.

Кроме того, уравнение (12) является приближенным [в отличие от уравнения (11)]. Причем точность этой линейной аппроксимации реальной зависимости вектора $\mathbf{D}_{\Delta \hat{P}_T}$ от вектора $\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T}$ тем выше, чем меньше элементы вектора $\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T}$ отличаются от соответствующих элементов вектора $\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_{исх}}$, т.е. от дисперсий отклонений параметров БОЭС, от их расчетных значений, которые использовались при построении модели (1). С учетом этого замечания в качестве вектора $\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T}$, характеризующего разброс параметров БОЭС относительно их расчетных значений, при котором удовлетворяются требования, предъявляемые к системе по точности, возьмем

$$\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T} = \arg \min_{\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}}} (\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}} - \mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_{исх}})^T \mathbf{W}_D (\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}} - \mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_{исх}}) \quad (13)$$

при условии

$$\mathbf{D}_{\Delta \hat{P}_T} = \mathbf{A}_{KB} \mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T},$$

где \mathbf{W}_D – весовая матрица.

Минимизируя квадратичную форму $(\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}} - \mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_{исх}})^T \mathbf{W}_D (\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}} - \mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_{исх}})$, фактически выбираются такие БОЭС, характеристики разброса параметров которых незначительно отличались бы от уже существующих БОЭС. Следствием этого является снижение материальных затрат на доработку всего БОЭС или его отдельных частей. Весовую матрицу удобно взять в виде

$$\mathbf{W}_D = \text{diag}\{1/\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_{исх}}^2, j \in \overline{1, m}\}.$$

Такой вариант выбора весовой матрицы обеспечивает получение решения, оптимального с точки зрения минимума суммы квадратов относительных невязок элементов векторов $\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_T}$ и $\mathbf{D}_{\Delta \tilde{C}_{исх}}$.

Задача (12), (13) сводится к задаче поиска условного минимума положительно определенной квадратичной формы по векторному аргументу. В настоящее время существуют различ-

ные подходы к решению подобных задач [5]. Наиболее удобным в данном случае представляется метод неопределенных множителей Лагранжа [5].

В соответствии с этим методом составим функцию Лагранжа:

$$L = (\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}} - \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}})^T \mathbf{W}_D (\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}} - \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}}) + 2\mathbf{\Lambda}^T (\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_T} - \mathbf{A}_{кв} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}}),$$

где $\mathbf{\Lambda}$ – вектор неопределенных множителей Лагранжа размерности $n \times l$.

Опираясь на известные свойства матриц и операции с ними [7], преобразуем эту функцию к виду

$$L = \text{tr}\{(\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}} - \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}})(\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}} - \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}})^T \mathbf{W}_D\} + 2\mathbf{\Lambda}^T (\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_T} - \mathbf{A}_{кв} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}}) = \text{tr}\{\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}}^T \mathbf{W}_D\} + \\ + \text{tr}\{\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}}^T \mathbf{W}_D\} - 2\text{tr}\{\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}}^T \mathbf{W}_D\} + 2\mathbf{\Lambda}^T (\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_T} - \mathbf{A}_{кв} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}})$$

где $\text{tr}\{\cdot\}$ – след матрицы.

Найдем частные производные от функции L по векторам $\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}}$ и $\mathbf{\Lambda}$ и приравняем их к нулю:

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}}} \right|_{\Delta\tilde{C}=\Delta\tilde{C}_T} = 2\mathbf{W}_D \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_T} - 2\mathbf{W}_D \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}} - 2\mathbf{A}_{кв}^T \mathbf{\Lambda} = 0; \\ \left. \frac{\partial L}{\partial \mathbf{\Lambda}} \right|_{\Delta\tilde{C}=\Delta\tilde{C}_T} = 2(\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_T} - \mathbf{A}_{кв} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_T}) = 0.$$

Из первого уравнения найдем вектор $\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_T}$:

$$\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_T} = \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}} + \mathbf{W}_D^{-1} \mathbf{A}_{кв}^T \mathbf{\Lambda} \quad (14)$$

и подставим его во второе уравнение:

$$\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_T} - \mathbf{A}_{кв} (\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}} + \mathbf{W}_D^{-1} \mathbf{A}_{кв}^T \mathbf{\Lambda}) = 0.$$

После несложных преобразований получим выражение для вектора неопределенных множителей Лагранжа:

$$\mathbf{\Lambda} = (\mathbf{A}_{кв} \mathbf{W}_D^{-1} \mathbf{A}_{кв}^T)^{-1} (\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_T} - \mathbf{A}_{кв} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}}). \quad (15)$$

Подставив его в правую часть уравнения (14), определим значение вектора дисперсий отклонений параметров БОЭС от их расчетных значений:

$$\mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_T} = \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}} + \mathbf{W}_D^{-1} \mathbf{A}_{кв}^T (\mathbf{A}_{кв} \mathbf{W}_D^{-1} \mathbf{A}_{кв}^T)^{-1} (\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_T} - \mathbf{A}_{кв} \mathbf{D}_{\Delta\tilde{C}_{исх}}). \quad (16)$$

являющееся решением поставленной задачи (12), (13).

Полученные по формуле (16) требуемые характеристики разброса параметров БОЭС следует проверить на предмет выполнения требований к БОЭС по точности. Задача проверки может быть решена на основе исходной математической модели системы (1). Методом статистического моделирования на основе модели зависимости погрешности от параметров БОЭС (1) получим оценки точностных характеристик БОЭС. Представим их в виде вектора $\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_M}$, состоящего из оценок $\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_{Mj}}$, $j \in \overline{1, n}$ дисперсий погрешности БОЭС.

Скалярный показатель, характеризующий качество решения задачи, возьмем в следующем виде:

$$\delta = \frac{\|\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_M} - \mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_T}\|}{\|\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_T}\|} \cdot 100\%, \quad (17)$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора [8].

Следует отметить, что показатель (17) фактически характеризует качество решения задачи определения требований к характеристикам разброса параметров БОЭС по заданным требованиям к точности его функционирования.

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ БОРТОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Последовательность действий для решения задачи определения требований к характеристикам разброса параметров БОЭС по заданным требованиям к точности его функционирования может быть представлена следующим образом.

1) Построение линейной модели (2) связи вектора отклонений параметров БОЭС от их расчетных значений с вектором погрешности БОЭС на основе исходной модели (1).

2) Выбор весовой матрицы \mathbf{W}_D в зависимости от имеющейся информации о точностных и стоимостных характеристиках составных частей БОЭС.

3) Определение требований к характеристикам разброса параметров БОЭС в виде вектора $\mathbf{D}_{\Delta\hat{C}_T}$, состоящего из требуемых значений дисперсий отклонений параметров БОЭС от их расчетных значений.

4) Оценивание качества решения задачи определения требований к характеристикам разброса параметров БОЭС по заданным требованиям к точности ее функционирования на основе показателя (17).

Пользуясь разработанной методикой, можно определить требования к характеристикам разброса параметров БОЭС, при которых будут удовлетворены требования к точности БОЭС. Кроме того, методика позволяет оценить качество сформированных требований.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Дано:

1) вектор дисперсий отклонений параметров исходного БОЭС от расчетных значений:

$$\mathbf{D}_{\Delta\hat{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{\Delta\hat{f}_{\text{свс}}} \\ \mathbf{D}_{\Delta\hat{U}_E} \\ \mathbf{D}_{\Delta\hat{D}} \\ \mathbf{D}_{\Delta\hat{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,694(\text{мс}^2) \\ 0,444(\text{мВ}^2) \\ 0,187(\text{мм}^2) \\ 0,936(\text{нм}^2) \end{bmatrix};$$

2) вектор дисперсий погрешности исходного БОЭС:

$$\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_{\text{исх}}} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{\Delta y_{\text{исх}}} \\ \mathbf{D}_{\Delta x_{\text{исх}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1 (\text{угл.сек.}^2) \\ 0,08 (\text{угл.сек.}^2) \end{bmatrix};$$

3) требования к погрешности проектируемого БОЭС:

$$\mathbf{D}_{\Delta\hat{P}_T} = \begin{bmatrix} 0,063 (\text{угл.сек.}^2) \\ 0,053 (\text{угл.сек.}^2) \end{bmatrix}.$$

Найти дисперсии $\mathbf{D}_{\Delta\tilde{c}_T}$ отклонений параметров БОЭС от расчетных значений, при которых погрешность БОЭС удовлетворяет заданным требованиям.

Решение:

1) построение линейной модели (2), матрица коэффициентов \mathbf{A} для которой имеет следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -20,18 & -0,194 & 0,152 & -70,18 \\ -21,58 & 0,045 & -0,481 & 33,21 \end{bmatrix};$$

$$2) \text{ выбор весовой матрицы } \mathbf{W}_D = \text{diag}\{1/\mathbf{D}_{\Delta\tilde{c}_{исхi}}^2, i = \overline{1, m}\} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,2 \end{bmatrix};$$

3) определение требований к характеристикам разброса параметров БОЭС:

$$\mathbf{D}_{\Delta\tilde{c}_T} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{\Delta t_{свдТ}} \\ \mathbf{D}_{\Delta U_{свТ}} \\ \mathbf{D}_{\Delta D_T} \\ \mathbf{D}_{\Delta d_T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,423(\text{мс}^2) \\ 0,346(\text{мВ}^2) \\ 0,179(\text{мм}^2) \\ 0,403(\text{нм}^2) \end{bmatrix}.$$

При рассчитанных характеристиках разброса параметров достигается значение вектора погрешности БОЭС $\mathbf{D}_{\Delta\hat{p}_M} = \begin{bmatrix} 0,062 (\text{угл.сек.}^2) \\ 0,053 (\text{угл.сек.}^2) \end{bmatrix}$, которое удовлетворяет предъявленным требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к разработке упрощенной математической модели зависимости погрешности БОЭС от характеристик разброса их параметров. Модель удовлетворяет требованиям по простоте и точности. На основе полученной модели возможно решить задачу распределения допусков на параметры БОЭС.

В векторно-матричной форме получено решение задачи распределения допусков на параметры БОЭС с учетом соответствующих весовых коэффициентов.

Разработана методика распределения допусков на параметры БОЭС. Разработанная методика позволяет получить допуски на параметры БОЭС с минимальным отличием от исходных значений допусков. Это обеспечивается выбором соответствующей матрицы весовых коэффициентов. Кроме того, методика позволяет оценить, насколько качественно решена задача.

Список используемых источников

1. Минимальные технические характеристики звездного датчика ориентации, необходимые для достижения заданной погрешности / А.И. Захаров, М.Е. Прохоров, М.С. Тучин и др. // Асторофизический бюллетень. – 2013. – Т. 68, № 4. – С. 507–520.

2. Арсеньев В.Н., Балуев С.Ю., Белихин Е.Н. Модель бортового оптико-электронного средства для исследования зависимости его погрешности от значений параметров // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 24–29.

3. *Краснощеков С.Н., Пашков В.С., Половников В.И.* Оптико-электронные приборы с рядовой связью в задачах угломерных измерений в космосе / под ред. В.Ф. Фатеева. – МО РФ, 1998. – 94 с.
4. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
5. *Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.* Оптимизация в технике. – М.: Мир, 1986. – Кн. 1, 2. – 348 с.
6. *Арсеньев В.Н.* Методика обоснования требований к характеристикам разброса параметров системы управления летательного аппарата. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2002. – 68 с.
7. *Ланкастер П.* Теория матриц. – М.: Наука, 1978. – 280 с.
8. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1980. – 722 с.

Д.Г. Белянин,
кандидат техн. наук;
С.Ю. Герасименко;
С.Ю. Пирогов,
доктор техн. наук доцент;
В.В. Типаев,
кандидат техн. наук

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛАССА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ ВЫВЕДЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО ГРУЗА ЗА СЧЕТ МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ

В ходе анализа направлений развития современных ракет-носителей рассматриваются варианты изменения конструкции ракет с целью снижения стоимости пуска. На основе технико-экономической модели оценки стоимости пуска ракет-носителей тандемной схемы легкого, среднего и тяжелого классов описываются эффекты снижения стоимости пуска за счет повторного использования ракетного двигателя первой ступени.

Ключевые слова: удельная стоимость выведения, ракета-носитель, двигательная установка.

Начиная с 2011 года, современная космонавтика вступила в новую эпоху, когда идеи уменьшения стоимости пуска ракет-носителей за счет многократного использования возвращаемых элементов стали технически достижимыми. В настоящее время значительных успехов в решении задачи снижения удельной стоимости выведения полезного груза на околоземную орбиту добилась компания Илона Маска «SpaceX» [3].

В Российской Федерации в рамках Плана научной работы Вооруженных сил по заказу космических войск в последние годы проводятся системные исследования по обоснованию облика перспективных средств выведения, планируемых к созданию в рамках государственного оборонного заказа.

В частности, в НИР «Саксаул» авторами в ходе проведения исследований обнаружено, что в используемой математической модели многократное применение первой ступени РН позволяет в два раза уменьшить стоимость выведения полезной нагрузки [3]. В ходе исследований в рамках НИР «Диагностика-19» была проведена оценка влияния класса ракеты-носителя на снижение удельной стоимости выведения одного килограмма полезного груза за счет многократного применения двигательной установки первой ступени (рис. 1).

Таблица 1

**Технико-экономические показатели ракет-носителей легкого,
среднего и тяжелого классов**

| Параметр | Ангара-1.2 | Союз-5 | Протон-М |
|---|------------|--------|----------|
| Стартовая масса РН, кг | 171000 | 460000 | 705000 |
| Масса ПГ, выводимого на НОО, кг | 3000 | 14000 | 22000 |
| Стоимость РН (без стоимости КА, включает в себя цену подготовки к пуску), млн. руб. | 800 | 1400 | 2848 |
| Стоимость подготовки к каждому пуску РН (без цены топлива), включающая транспортирование, сборку в МИКе и т.д., млн. руб. | 100 | 212 | 710 |

Окончание табл. 1

| Параметр | Ангара-1.2 | Союз-5 | Протон-М |
|---|------------|--------|----------|
| Относительная стоимость каждого послепускового обслуживания ЖРД, % от стоимости двигателя | 9 | 9 | 9 |
| Цена 1 кг двигательной установки 1-й ступени, руб./кг | 109090 | 55329 | 89719 |
| Цена 1 кг двигательной установки 2-й ступени, руб./кг | 157692 | 80000 | 48672 |
| Цена 1 кг двигательной установки 3-й ступени, руб./кг | – | – | 48672 |
| Цена 1 кг баковых отсеков 1-й ст., руб./кг | 760 | 760 | 760 |
| Цена 1 кг баковых отсеков 2-й ст., руб./кг | 760 | 760 | 760 |
| Цена 1 кг баковых отсеков 3-й ст., руб./кг | – | – | 760 |
| Цена 1 кг небакковых отсеков 1-й ст., руб./кг | 1140 | 1140 | 1140 |
| Цена 1 кг небакковых отсеков 2-й ст., руб./кг | 1140 | 1140 | 1140 |
| Цена 1 кг небакковых отсеков 3-й ст., руб./кг | – | – | 1140 |
| Цена 1 кг окислителя, руб./кг | 9,2 | 9,2 | 90 |
| Цена 1 кг горючего, руб./кг | 44,5 | 44,5 | 90 |
| Относительная масса двигательной установки 1-й ст. | 0,012 | 0,021 | 0,009 |
| Относительная масса двигательной установки 2-й ст. | 0,003 | 0,0024 | 0,003 |
| Относительная масса двигательной установки 3-й ст. | – | – | 0,0008 |
| Относительная масса баковых отсеков 1-й ст. | 0,018 | 0,023 | 0,025 |
| Относительная масса баковых отсеков 2-й ст. | 0,008 | 0,0096 | 0,008 |
| Относительная масса баковых отсеков 3-й ст. | – | – | 0,0038 |
| Относительная масса небакковых отсеков 1-й ст. | 0,031 | 0,015 | 0,009 |
| Относительная масса небакковых отсеков 2-й ст. | 0,013 | 0,006 | 0,0037 |
| Относительная масса небакковых отсеков 3-й ст. | – | – | 0,0025 |
| Относительная масса горючего 1-й ст. | 0,211 | 0,191 | 0,153 |
| Относительная масса горючего 2-й ст. | 0,039 | 0,049 | 0,057 |
| Относительная масса горючего 3-й ст. | – | – | 0,0168 |
| Относительная масса окислителя 3-й ст. | 0,55 | 0,54 | 0,463 |
| Относительная масса окислителя 2-й ст. | 0,102 | 0,131 | 0,161 |
| Относительная масса окислителя 3-й ст. | – | – | 0,047 |

Исходными данными были определены технико-экономические параметры ракет-носителей легкого, среднего и тяжелого классов, взятые из открытых источников (табл. 1).

Математическая зависимость, описывающая влияние класса ракеты-носителя и кратность применения двигательной установки первой ступени на удельную стоимость выведения одного килограмма полезного груза на низкую околоземную орбиту, выведена с использованием массового уравнения ракет-носителей тандемной схемы с жидкостным ракетным двигателем [2]:

$$C = \frac{1}{k} (C_{дв1} m_{дв1} \left(\frac{a}{n} + b \right) + C_{б01} m_{б01} + C_{нб1} m_{нб1} \left(\frac{a}{n} + b \right) + C_{о2} m_{о1} + C_T m_{T1} + C_{дв2} m_{дв2} + C_{б02} m_{б02} + C_{нб2} m_{нб2} + C_{о2} m_{о2} + C_T m_{T2} + \frac{C_{пн}}{M_{РН}}),$$

- где
- C – стоимость запуска 1 кг полезного груза на низкую околоземную орбиту;
 - $M_{РН}$ – стартовая масса ракеты-носителя, кг;
 - $C_{пу}$ – цена пусковых услуг (без стоимости ракеты-носителя), руб.;
 - k – коэффициент конструктивного совершенства;
 - $C_{ду1}$ – цена 1 кг ДУ 1-й ступени, руб./кг;
 - $C_{ду2}$ – цена 1 кг ДУ 2-й ступени, руб./кг;
 - $C_{бо1}$ – цена 1 кг баковых отсеков 1-й ступени, руб./кг;
 - $C_{бо2}$ – цена 1 кг баковых отсеков 2-й ступени, руб./кг;
 - $C_{нб1}$ – цена 1 кг небактовых отсеков 1-й ступени, руб./кг;
 - $C_{нб2}$ – цена 1 кг небактовых отсеков 2-й ступени, руб./кг;
 - $C_{о2}$ – цена 1 кг кислорода, руб./кг;
 - $C_{т}$ – цена 1 кг керосина, руб./кг;
 - $m_{ду1}$ – относительная масса ДУ 1 (относительно полной массы РН);
 - $m_{ду2}$ – относительная масса ДУ 2;
 - $m_{бо1}$ – относительная масса баковых отсеков 1-й ступени;
 - $m_{бо2}$ – относительная масса баковых отсеков 2-й ступени;
 - $m_{нб1}$ – относительная масса небактовых отсеков 1-й ступени;
 - $m_{нб2}$ – относительная масса небактовых отсеков 2-й ступени;
 - $m_{т1}$ – относительная масса керосина 1-й ступени;
 - $m_{т2}$ – относительная масса керосина 2-й ступени;
 - $m_{о1}$ – относительная масса кислорода 1-й ступени;
 - $m_{о2}$ – относительная масса кислорода 2-й ступени;
 - b – коэффициент, учитывающий стоимость послеполетного обслуживания двигательной установки 1-й ступени;
 - n – количество пусков;
 - a – коэффициент, учитывающий ресурс двигательной установки (возможное количество пусков ЖРД 1-й ступени РН = 10): $a = 1$ при $n \leq 10$, $a = 2$ при $11 \leq n \leq 20$, $a = 3$ при $21 \leq n \leq 30$ и т.д.

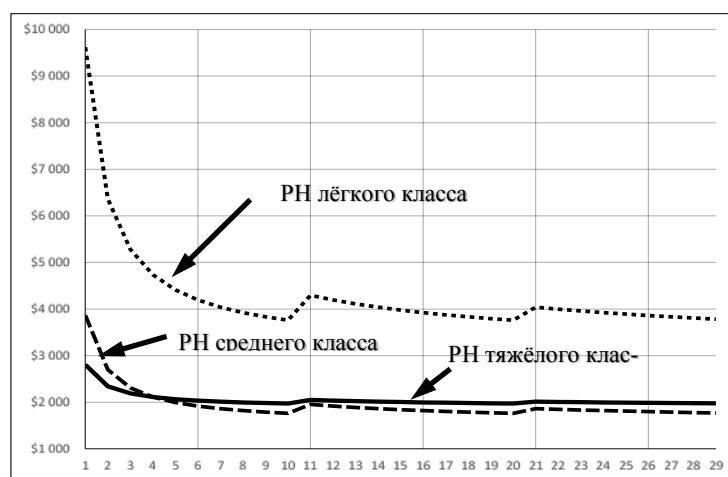


Рис. 1. Результаты оценки влияния класса ракеты-носителя на удельную стоимость выведения полезного груза за счет многократного использования двигательной установки 1-й ступени при ограничении ресурса ЖРД 10 пусками

Оценка влияния класса ракеты-носителя на снижение удельной стоимости выведения полезного груза за счет многократного использования двигательной установки 1-й ступени ракеты-носителя оценивались из условий ограничения ресурса маршевого жидкостного ракетного двигателя 1-й ступени десятью пусками. Основные результаты исследования представлены на рис. 1.

Из анализа графика (рис. 1) следует, что экономический эффект, а именно, снижение удельной стоимости выведения полезного груза на низкую околоземную орбиту наиболее выражен у ракет-носителей легкого класса. В ходе выполнения научно-исследовательской работы также было показано, что на данном этапе развития технологий средств выведения целесообразность разработки многоразовой системы тяжелого класса сомнительная, данный вывод подтверждается данными из открытых источников по американской программе Space Shuttle. В дальнейших исследованиях необходимо изучать актуальность разработки полностью многоразовой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из сказанного выше можно сделать следующие выводы.

1. Экономический эффект, а именно, снижение удельной стоимости выведения полезной нагрузки на базовую орбиту, от многократного применения ЖРД 1-й ступени наиболее выражен у ракет-носителей легкого класса.
2. Стоимость выведения одного килограмма полезного груза на базовую орбиту высотой 200 км РН легкого класса может уменьшиться с 10 до 4 тыс \$ США.
3. Экономической целесообразности в возвращении первой ступени полностью нет [3].
4. Применять возвращаемые элементы больше 11 раз нецелесообразно, так как цена послеполетного обслуживания двигательной установки возрастает до стоимости нового изделия [3].
5. Минимум стоимости наблюдается при полном израсходовании ресурса двигательной установки, т.е. при 10, 20, 30 и так далее пусках РН [3].

Список используемых источников

1. 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.
2. Шилимов В.Ф., Плясунов А.А. Проектирование ракет: учеб. пособие. – Ленинград: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1982. – Вып. 1: Энергомассовый анализ ракет.
3. Оценка технико-экономического эффекта применения многоразовых элементов конструкции ракет-носителей / Д.Г. Белянин, С.Ю. Пирогов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – С. 138–145.
4. Ю.Л. Кузнецов, Д.С. Украинцев Анализ влияния схемы полета ступени с ракетно-динамической системой спасения двухступенчатой ракеты-носителя среднего класса // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2016. – Т.15, № 1.

К.Б. Болдырев,
кандидат техн. наук доцент;
А.Ю. Карчин;
В.И. Поспищенко,
кандидат техн. наук

КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЖЕНИЯ КОРПУСА РАКЕТНОГО БЛОКА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ РАЗРУШАЮЩИХ АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ЭТАПЕ СПУСКА

В статье обоснован подход к определению напряженно-деформированного состояния конструкции корпуса отделяемого ракетного блока, состоящего из герметичных тонкостенных отсеков и негерметичных силовых конструкций в условиях его торможения в плотных слоях атмосферы. Предложена модель нагружения корпуса ракетного блока, основанная на комбинации инженерных методов определения параметров прочности и устойчивости топливных баков и численных методов анализа несущей способности переходных и хвостовых отсеков ракетных блоков в условиях экстремального аэротермодинамического нагружения.

Ключевые слова: ракетный блок, пассивный участок траектории, напряженно-деформированное состояние.

ВВЕДЕНИЕ

Современное общество характеризуется возрастающими потребностями в использовании искусственных спутников земли для решения задач народнохозяйственного и оборонного характера. Параметры орбит существующей космической группировки соответствуют широкому диапазону азимутов и наклонов, что требует обеспечения их запуска ракетами-носителями в соответствующих направлениях.

Отечественные космодромы по ряду причин характеризуются ограниченным числом направлений (азимутов) пусков. Основной причиной этого является необходимость приема отделяющихся частей ракетных блоков на поверхности Земли в специально выделенных районах падения. Разворачивание новых направлений пуска и расширение площадей под районы падения элементов ракетных блоков подразумевает повышение точности определения размеров эллипсов рассеивания падающих элементов ракеты-носителя на Землю. Основными факторами, влияющими на координаты точек падения, являются начальные параметры движения, условия атмосферы, аэродинамические характеристики падающего объекта и параметры его разрушения в плотных слоях атмосферы [1]. Для точного баллистического расчета требуются показатели диапазона высот разрушения ракетного блока, массовые и аэродинамические характеристики его фрагментов. Таким образом, до начала баллистического моделирования необходимо установить механизм разрушения падающего объекта – отработавшего элемента ракетного блока (рис. 1).

Решение указанной задачи предполагает формирование модели корпуса ракетного блока, состоящего из герметичных тонкостенных отсеков и негерметичных силовых конструкций в условиях его разрушения в плотных слоях атмосферы.

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАКЕТНОГО БЛОКА НА ПАССИВНОМ УЧАСТКЕ ТРАЕКТОРИИ

Ракетный блок ракеты-носителя – ступень (часть ступени) РН, включающая корпус, двигатель, топливо и элементы систем управления, разделения, измерения и т.д. Разрушение указанной конструкции происходит в виде потери прочности или устойчивости корпуса.

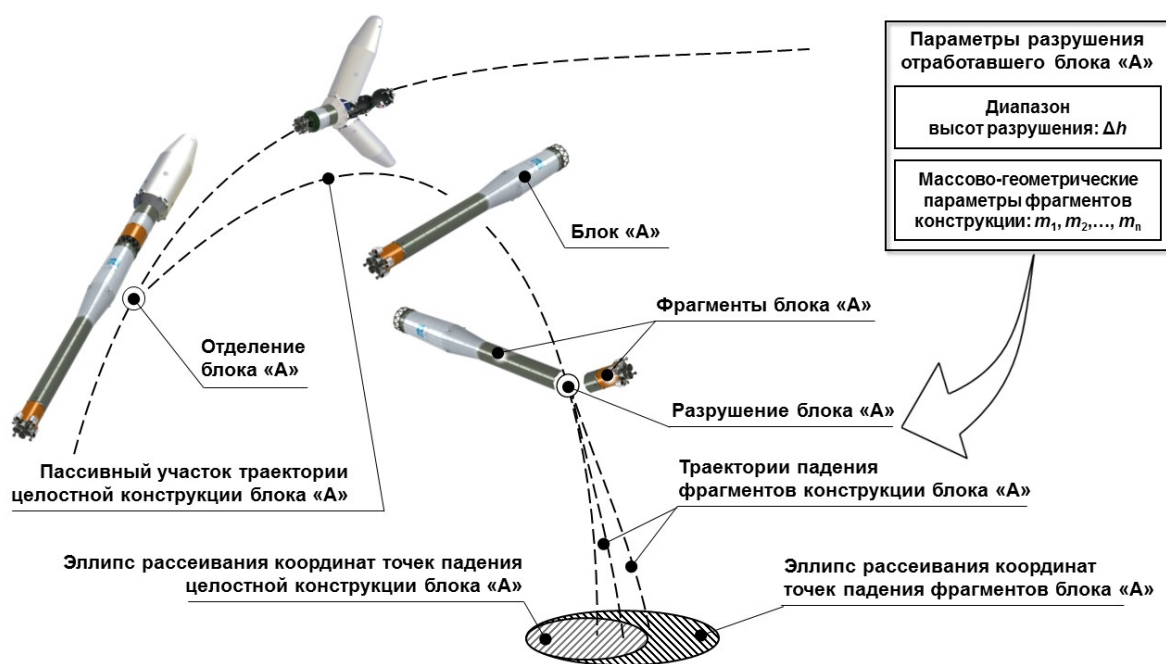


Рис. 1. Разрушение отработавшего блока «А» – фактор прогнозирования эллипса рассеивания точек падения элементов ракетных блоков

Прогнозирование момента разрушения связано с использованием методики определения напряженно-деформированного состояния силового набора конструкции. В настоящее время сформировано два подхода к решению этой задачи – с помощью метода использования инженерных моделей конструкции, в основе которых лежат эмпирические соотношения, связывающие силовые факторы с деформацией и напряжениями, возникающими в материале, и метода, основанного на применении математических методов конечных элементов (численных методов). Инженерные модели позволяют значительно сократить требования к вычислительным ресурсам, однако основаны на значительных упрощениях и недостаточно точно описывают процессы в местах действия краевого эффекта, частях конструкции, состоящих из разнородных силовых элементов.

Применение методик, основанных только на численных методах расчета, требует большого количества машинного времени, что не отвечает требованиям оперативности. Конечно-элементные модели сложных по конструкции объектов требуют использования различных видов сеток, а это не всегда математически приемлемо и приводит к накоплению погрешностей при расчетах.

Комбинированное использование эмпирических и численных моделей в задаче определения несущей способности конструкции, состоящей из тонкостенных оболочек и негерметичных стержневых рам, позволит повысить адекватность определения диапазона разрешения и сохранить требования по оперативности расчетов.

Ракетный блок на атмосферном пассивном участке траектории (ПУТ) движется под воздействием совокупности силы тяжести и полной аэродинамической силы R_a (рис. 2). Исходными данными параметров возмущающего движения блока являются результаты баллистического проектирования [1], представленные на рис. 3 [3].

Эмпирическая модель нагружения корпуса ракетного блока на этапе спуска представляет собой модель нагружения твердого деформированного осесимметричного тела в виде тонкостенной секционной конструкции с внутренним избыточным давлением в герметичных отсеках, с распределенными и сосредоточенными по продольной оси массами, в условиях воздействия массовых и нестационарных аэродинамических сил.

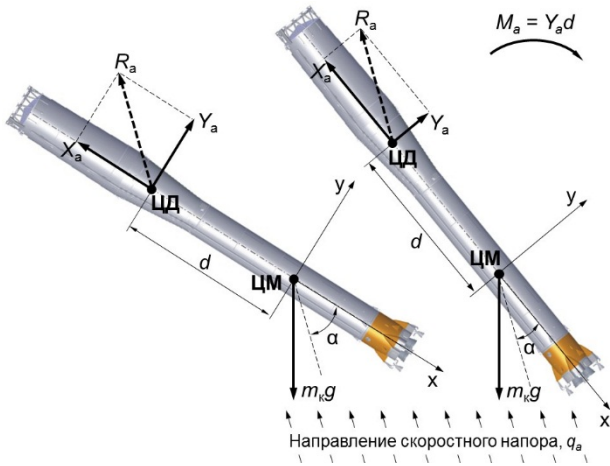


Рис. 2. Условия входа в атмосферу

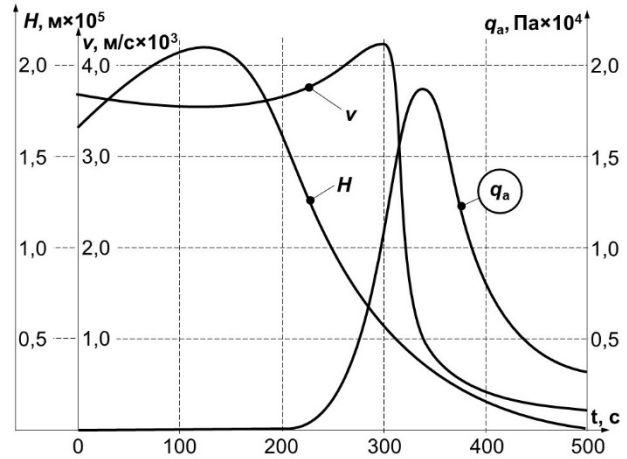


Рис. 3. Параметры ПУТ

Под воздействием возмущающего скоростного напора q_a в элементах конструкции возникают силовые факторы – продольные и поперечные силы (N и Q) и изгибающие моменты M . Распределение значений сил и моментов по длине корпуса ракетного блока может быть определено математическими выражениями:

$$N_{ij} = \sum_{i=1}^n N_{i(j-1)} + \left(-\frac{c_{xi} q_{a,i} S_M}{m_{РБ}} \left(\sum_{c=1}^m m_c + \int_0^{x_j} m_{pj}(x) dx \right) + \Delta p_j \pi r_j \right), \quad (1)$$

$$Q_{ij} = \sum_{i=1}^n Q_{i(j-1)} + \left(\frac{c_{yi} q_{a,i} S_M}{m_{РБ}} \pm \frac{c_{yi} q_{a,i} S_M}{I_m} (x_{цм} - x_{цд}) \right) \left(\sum_{c=1}^m m_c + \int_0^{x_j} m_{pj}(x) dx \right), \quad (2)$$

$$M_{ij} = \sum_{i=1}^n M_{i(j-1)} + \int_0^{x_j} Q_{ij}(x) dx. \quad (3)$$

Эмпирическая модель нагружения корпуса ракетного блока на этапе спуска позволяет оценить характер распределения по длине и изменение по времени внутренних силовых факторов (1) – (3), действующих на корпус ракетного блока в характерных сечениях, с учетом изменения углового положения корпуса, а также обосновать наиболее «опасные» сечения корпуса (рис. 4).

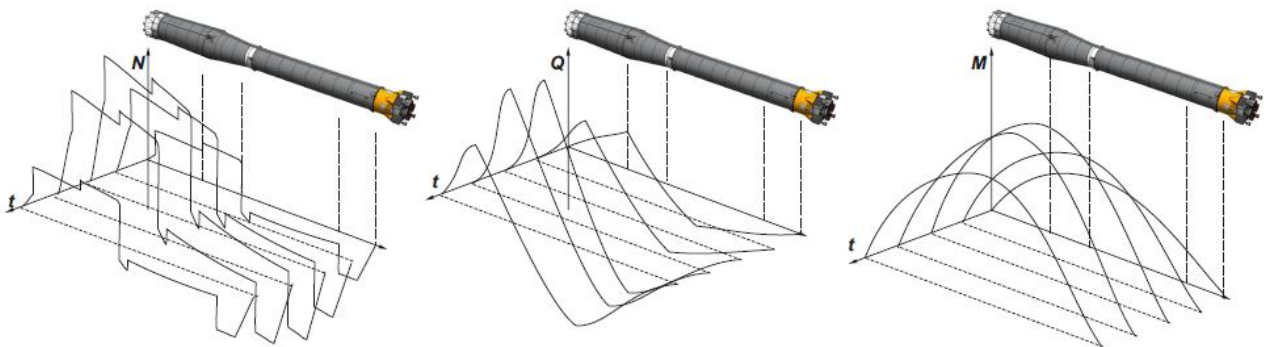


Рис. 4. Характер распределения внутренних силовых факторов N , Q и M по длине корпуса блока «А» и времени пассивного участка траектории

Следствием действия внутренних силовых факторов являются напряжения, возникающие в элементах конструкции ракетного блока. Для цилиндрических и конических оболочек значения меридиональных и окружных напряжений определяются известными выражениями строительной механики:

$$\sigma_{\varphi ij} = \frac{\Delta p_j r_j}{2\delta_j} - \frac{N_{ij}}{2\pi r_j \delta_j} \pm \frac{M_{ij}}{\pi r_j^2 \delta_j} + \Delta\alpha^{T_i} \Delta T_i E^{T_i}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta ij} = \frac{(\Delta p_j + g\rho_{\text{топ}} h_{\text{топ}} n_x) r_j}{\delta_j}, \quad n_{xi} = \frac{c_{xi} q_{a,i} S_M}{m_{PB}}; \quad (5)$$

Для типовых элементов конструкции значения показателей несущей способности оценивают, как правило, методом максимума условной расчетной эквивалентной нагрузки. Для определения значений эквивалентных напряжений целесообразно воспользоваться широко применяемой для упругих конструкций третьей теорией прочности – наибольших касательных напряжений. Согласно этой теории разрушение конструкционного материала наступает, когда наибольшие касательные напряжения достигают своего допустимого значения [1]:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad \sigma_{\text{эквIV}} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 4\tau_{13}^2} \geq [\sigma], \quad (6)$$

где σ – нормальные напряжения, Па;

τ – тангенциальные напряжения, Па;

$[\sigma]$ – предельные значения нормальных напряжений ($\sigma_B, \sigma_{0,2}$), Па.

Для оболочечных элементов конструкции корпуса блока «А» производится расчет эквивалентных напряжений, возникающих в характерных сечениях корпуса, с использованием выражений (4)–(6).

Инженерный подход, основанный на применении эмпирических соотношений теории прочности, позволяет, используя типовые модели оболочечных конструкций, находящихся под избыточным давлением, с заданной точностью оценить несущую способность топливных баков (рис. 5).

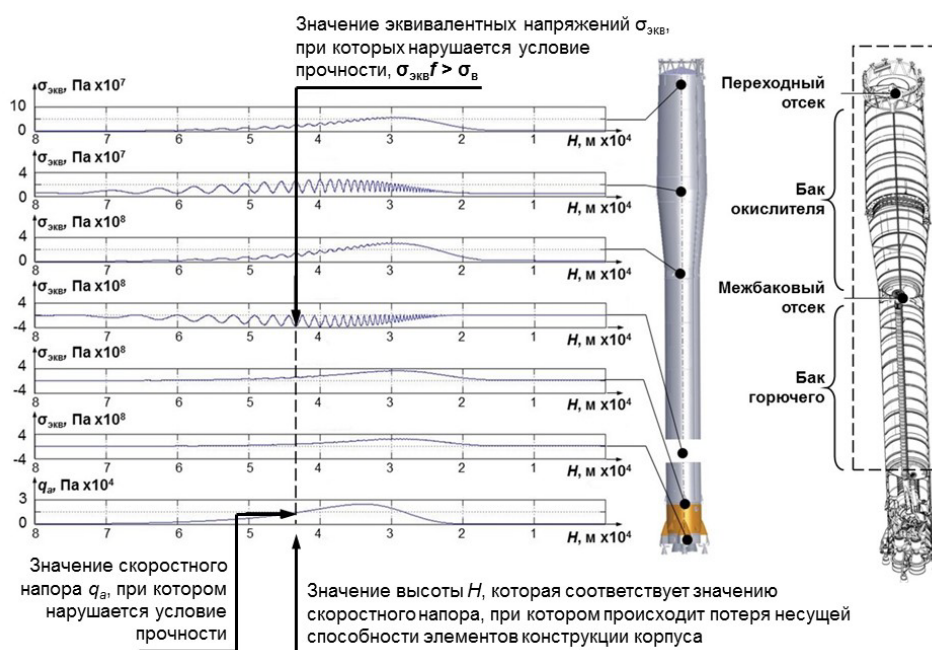


Рис. 5. Оценка несущей способности элементов конструкции корпуса блока «А» на основе использования эмпирических соотношений теории прочности

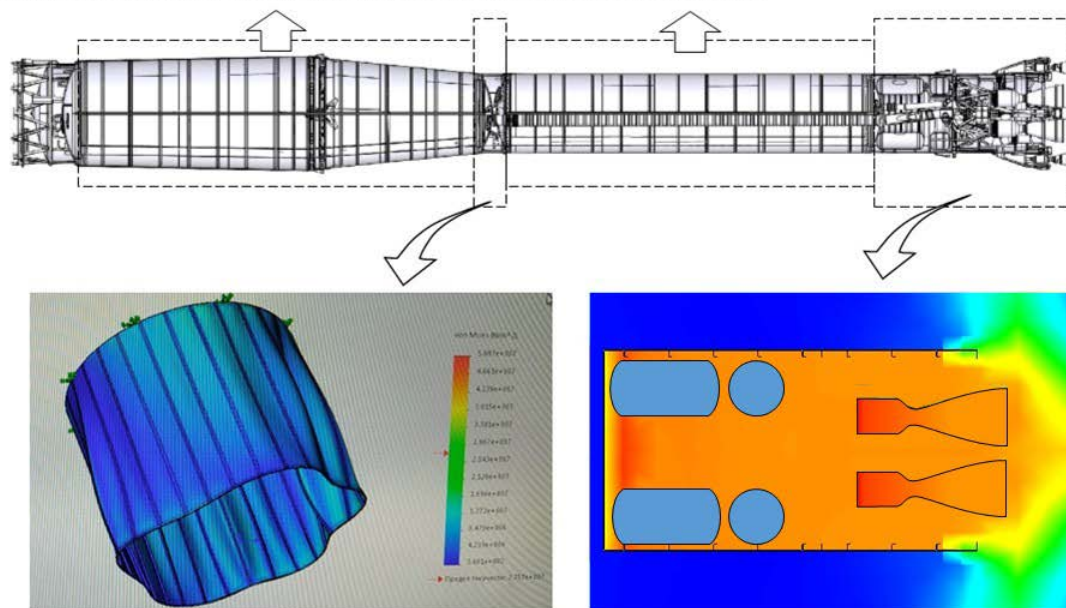
Наиболее сложными, с точки зрения моделирования нагружения, на этапе спуска представляются межбаковые и хвостовые отсеки ракетных блоков. Эти элементы конструкции представляют собой поперечный и продольный силовые наборы, состоящие из разнопрочных стрингеров и шпангоутов. Конструкция нагружается массовыми силами, аэродинамическим напором и нагревом. Нагружение межбаковых и хвостовых отсеков ракетных блоков моделируется с использованием численных методов [3].

Численный метод используется для создания модели нагружения упругодеформированной многоэлементной тонкостенной секционной конструкции в условиях действия предельных осевых и перерезывающих сил и изгибающих моментов от нестационарного аэротермодинамического воздействия.

Для межбакового отсека и хвостовой части блока «А» основным методом оценивания несущей способности элементов конструкции выбран численный метод – метод конечных элементов, позволяющий определить факторы нагружения в условиях действия массовых сил и аэротермодинамического воздействия и получить информацию о параметрах несущей способности элементов конструкции, входящих в состав хвостовой части блока «А»

В результате имитационного моделирования получены параметры нагружения межбакового и хвостового отсеков блока «А», представляющие собой массив данных в виде распределенного по объему полного давления, соответствующего скоростному напору (рис. 6).

Оболочечные отсеки ракетного блока, оценка несущей способности которых определяется инженерными методами, на основе эмпирических соотношений



Каркасные многоэлементные отсеки ракетного блока, оценка несущей способности которых определяется численными методами, на основе численного эксперимента

Рис. 6. Декомпозиция комбинированной модели нагружения блока «А» на пассивном участке траектории

Показатели несущей способности определяются по пределу текучести конструкционного материала [3].

На основе использования комбинированного подхода к определению напряженно-деформированного состояния элементов конструкции ракетного блока на ПУТ разработана модель нагружения корпуса ракетного блока в условиях действия разрушающих аэротермодинамических нагрузок на этапе спуска. Таким образом, в результате исследования определены параметры разрушения конструкции отработавшего ракетного блока в целом и элементов конструкции хвостовой части в частности.

В комбинированной модели нагружения корпуса ракетного блока в условиях действия разрушающих аэротермодинамических нагрузок на этапе спуска предусмотрен различный подход к моделированию многофакторного нагружения, приводящего объекты исследования с различными способами математического моделирования в «предельное» состояние.

Оценивание несущей способности оболочечных конструкций, находящихся под избыточным давлением, производится инженерными методами, основанными на эмпирических соотношениях теории прочности.

Оценивание несущей способности многоэлементных каркасных тонкостенных конструкций производится с использованием численных методов, основанных на конечно-элементных моделях.

В условиях действия на ракетный блок массовых и нестационарных аэродинамических сил модель позволяет соотнести предельное напряженно-деформированное состояние элементов конструкции в характерных сечениях корпуса ракетного блока со значением аэродинамического скоростного напора при различных углах атаки в зависимости от высоты пассивного участка траектории.

Полученные параметры могут быть использованы в виде исходных данных для баллистических расчетов, позволяющих повысить достоверность прогнозирования координат точек падения фрагментов отработавших ракетных блоков, что, в свою очередь, приведет к упрощению их оперативного поиска, утилизации, ликвидации результатов воздействия на окружающую среду и, соответственно, снижению материальных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан комбинированный подход к формированию модели нагружения корпуса отработавшего ракетного блока в условиях его разрушения в плотных слоях атмосферы. Апробирован подход к созданию комбинированной модели разрушения элементов конструкции отработавшего ракетного блока на пассивном участке траектории на примере блока «А» РН типа «Союз», в которой оценка несущей способности топливных баков производится эмпирическими методами, а имитационная модель нагружения межбакового отсека и наиболее аэродинамически нагруженной хвостовой части (агрегатного и хвостового отсеков) формируется в результате численных экспериментов.

Список используемых источников

1. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения: монография / В.В. Авдошкин, Н.В. Аверкиев, А.А. Ардашов и др.; под ред. А.С. Фадеева, Н.В. Аверкиева. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 372 с.

2. *Болдырев К.Б., Карчин А.Ю.* Моделирование процесса потери несущей способности корпусом ракетного блока в условиях многофакторного нестационарного нагружения на пассивном участке траектории // Труды III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т. 1. – С. 130–134.

3. *Болдырев К.Б., Карчин А.Ю., Козлов В.В.* Моделирование разрушения хвостовой части блока «А» РН «Союз-2» на пассивном участке траектории // Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 238–241.

С.А. Боцвин*;
А.С. Гарковенко*;
В.А. Хватков*

*Главное управление кадров
Министерства обороны Российской Федерации

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЛИЧНОГО СОСТАВА ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В статье проведен ретроспективный анализ становления и развития систем автоматизированного учета личного состава Вооруженных Сил Российской Федерации. Сформулированы основные проблемные вопросы организации (ведения) автоматизированного учета личного состава. Предложены пути их решения. Рассмотрены актуальные тенденции развития автоматизированного учета личного состава Вооруженных Сил Российской Федерации.

Ключевые слова: автоматизированные системы, учет личного состава.

ВВЕДЕНИЕ

Учет личного состава (УЛС) Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) является важной и неотъемлемой частью процесса управления воинскими подразделениями. УЛС подразделяется на персональный (поименный), штатно-должностной и количественный (статистический) [1]. Основными задачами УЛС являются:

- всестороннее изучение деловых, моральных и других качеств военнослужащих и лиц гражданского персонала, необходимых для определения порядка перемещения и использования людских ресурсов (персональный учет);
- осуществление систематического анализа укомплектованности подразделений и воинских частей личным составом по должностям и специальностям, организации контроля за движением и служебным перемещением личного состава (штатно-должностной учет);
- получение обобщенных цифровых данных, характеризующих количественный и качественный состав военнослужащих и гражданского персонала.

В настоящее время к УЛС предъявляются противоречивые требования, связанные с необходимостью, с одной стороны, учета большого количества информации, а с другой – оперативности обработки (актуализации) и представления персональных сведений. Повысить эффективность кадрового учета можно за счет использования автоматизированных систем (АС), а также за счет внедрения и применения современных и перспективных информационных технологий.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЛИЧНОГО СОСТАВА

В настоящее время отсутствует единая АС УЛС ВС РФ, позволяющая решать весь спектр задач учета личного состава. Связано это прежде всего с тем, что процесс автоматизации УЛС велся неравномерно на различных уровнях управления. В то время как центральные органы военного управления использовали, активно разрабатывали и внедряли АС УЛС ВС РФ с начала 2000-х годов, территориальные кадровые органы начали оснащаться автоматизированной системой персонального и штатно-должностного учета ВС РФ (АСПУ ВС РФ) только с 2006 года.

Кроме того, вплоть до конца XX века весь УЛС велся с использованием бумажных носителей информации, что приводило к существенным человеческим, временным и ресурсным издержкам (рис. 1).



Рис. 1. Основные этапы развития АС УЛС ВС РФ

Данное обстоятельство привело к тому, что к концу 2010 года в Главном управлении кадров Министерства обороны Российской Федерации (ГУК МО) сложилась непростая ситуация [2], связанная со значительным (более 5 лет) отставанием в актуализации персональной информации по военнослужащим. И эта ситуация сложилась несмотря на тот факт, что актуализацией персональной информации занимались порядка 20 офицеров и более 50 лиц гражданского персонала – целое подразделение, предназначенное для ведения персонального учета военнослужащих.

Именно тогда за счет использования программных средств (автоматизации), разработанных в «инициативном» порядке личным составом ГУК МО, удалось в течение 2 лет не только преодолеть указанное выше отставание, но и получить следующие результаты:

- сократить количество личного состава, задействованного для актуализации персональных сведений до небольшой группы из четырех человек;
- перевести послужную картотеку в электронный вид и создать базу данных Электронная картотека ГУК МО (ЭК ГУК МО);
- значительно повысить оперативность поиска и представления информации по действующим военнослужащим, скорость актуализации персональных сведений по военнослужащим;
- поддерживать в актуальном состоянии информацию не только по действующим офицерам, но и военнослужащим, поступившим на военную службу по контракту, в званиях от прапорщика (мичмана) и до рядового.

На сегодняшний день в ЭК ГУК МО хранится информация более чем на 30 млн военнослужащих и граждан, пребывающих в запасе и находящихся в отставке. Она содержит персональные сведения и сведения о прохождении военной службы. В ней организован полный персональный учет, основанный на обрабатываемых в автоматизированном режиме пунктах приказов по личному составу, а также данных из информационных массивов, поступивших из кадровых органов. Кроме того, ЭК ГУК МО содержит электронные образы личных дел на высших офицеров в количестве 25 тыс. человек. За последние 3 года многократно проведены автоматизированный анализ данных и их корректировка, применяются современные технологии обработки информации. Обеспечено поддержание персональных сведений в актуальном состоянии. Проводится регулярная сверка Электронной картотеки с другими действующими АС учета, с такими как программные изделия ресурсного обеспечения «Алушта», АС «Паспорт» и др.

Однако создание и эксплуатация ЭК ГУК МО не позволили решить весь спектр задач автоматизированного УЛС ВС РФ. Территориальные кадровые органы продолжали вести УЛС преимущественно на бумажных носителях и на них же представлять информацию в вышестоящие органы военного управления, что значительно снижало эффективность УЛС (рис. 2).

Попытка решить данную проблему предпринималась еще с 1999 года в рамках опытно-конструкторской работы «Жетон» по созданию опытного образца АСПУ ВС РФ, элементами которой оснащались кадровые органы видов (родов) войск, военных округов, объединений, соединений, воинских частей и организаций ВС РФ. В настоящее время АСПУ ВС РФ продолжает использоваться более чем в 200 кадровых органах [2].



Рис. 2. Текущее состояние системы автоматизированного УЛС ВС РФ

Увеличение объема информации, специфика и особенности задач учета личного состава, требования по оперативности и качеству кадровой работы в Вооруженных Силах Российской Федерации определили в 2009 году актуальность выполнения новой опытно-конструкторской работы, направленной на модернизацию АСПУ ВС РФ в части наращивания функциональных возможностей.

К сожалению, в связи с отсутствием на тот момент отечественных решений в области построения территориально распределенных центров обработки данных, высокоскоростных каналов связи и технической возможности, такие системы не смогли интегрироваться в единое защищенное информационное пространство, не обеспечили выполнение требований по переходу на отечественную аппаратно-программную платформу, не предусматривали возможность их использования в случае ведения боевых действий [3]. Это обстоятельство приводит к необходимости выявления наиболее острых проблем развития АС УЛС ВС РФ и поиску путей их устранения.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЛИЧНОГО СОСТАВА ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Сегодня можно выделить две основные проблемы, присущие современным АС УЛС ВС РФ:

- разнородность образующих ее элементов и невозможность интеграции в единую систему разнородных программных и технических средств, используемых в кадровых органах различных уровней (рис. 2);

– невозможность использования в рассмотренных системах (АСПУ ВС РФ и ЭК ГУК МО) отечественных программно-аппаратных решений.

Доработка существующих систем для решения указанных выше проблем представляется экономически неэффективной. В связи с этим целесообразным становится создание новой (перспективной) АС УЛС ВС РФ, которая позволит преодолеть возникшие проблемы и обеспечить эффективность решения задач УЛС.

Для обоснования требований, предъявляемых к перспективной системе и ее облику, с начала 2020 года научным коллективом 27-го Центрального научно-исследовательского института ведется научно-исследовательская работа, направленная на исследование вопросов автоматизированного учета личного состава Вооруженных Сил Российской Федерации в мирное и военное время. Одним из ожидаемых результатов данной работы будет проект тактико-технического задания на опытно-конструкторскую работу по созданию программного комплекса (ПК) УЛС ВС РФ, планируемую к открытию в 2021 году. Несмотря на то, что данная работа еще не закончена, некоторые черты перспективного программного комплекса можно увидеть уже сейчас (рис. 3).

Во-первых, ПК УЛС ВС РФ обеспечит хранение, обработку и представление информации по всем действующим военнослужащим, проходящим военную службу по контракту. И хотя информация будет храниться централизованно в единой защищенной базе данных, территориальные кадровые органы будут иметь доступ к ней по своей линии ответственности.

Во-вторых, построение ПК УЛС ВС РФ будет осуществляться по модульному принципу. Каждый модуль будет обеспечивать решение своей частной задачи (персональный учет, штатно-должностной учет, статистический учет и др.) на определенном уровне (стратегическом, оперативно-стратегическом, оперативном). Такой принцип позволит обеспечить масштабируемость системы, ее гибкость и адаптацию.

В-третьих, будет осуществлено проведение информационного обмена между модулями ПК УЛС ВС РФ (различных уровней) в электронном виде, что позволит повысить оперативность доведения информации и снизить документооборот на бумажных носителях, а затем и исключить необходимость периодического представления сведений в вышестоящие органы.

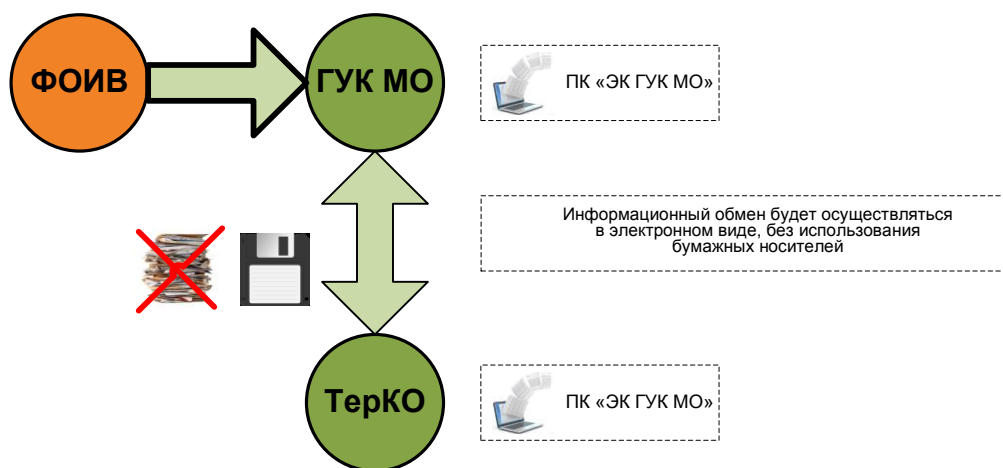


Рис. 3. Облик перспективной системы автоматизированного УЛС ВС РФ

В-четвертых, ожидается информационное взаимодействие ПК УЛС ВС РФ с АС федеральных органов исполнительной власти в части получения информации о гражданах, начиная с момента их постановки на воинский учет до момента их перехода в отставку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены главные этапы становления и модернизации АС УЛС ВС РФ. Выявлены наиболее значимые текущие проблемы, связанные с автоматизированным УЛС. Предложены основные пути их решения, спрогнозированы тенденции дальнейшего развития АС УЛС ВС РФ.

Эффективное решение задач автоматизированного УЛС возможно только в едином защищенном информационном пространстве, доступ к которому имеют как центральные, так и территориальные органы военного управления. Появление данного информационного пространства возможно только путем создания и интеграции единой АС УЛС. При этом полагается целесообразным построение перспективной системы по модульному принципу и осуществление информационного взаимодействия с АС федеральных органов исполнительной власти.

Дальнейшее направление исследований, связанных с построением облика перспективной АС, должно быть направлено на выявление и обоснование требований к системе на построение системы показателей оценивания качества (эффективности) ее функционирования.

Список используемых источников

1. Справочник командира: практическое изд. – М.: изд-во «За права военнослужащих», 2006. – Вып. 69. – 448 с. – (Право в Вооруженных Силах – консультант).
2. 100 лет ГУК МО РФ. – URL: <http://mil.ru/100GUK/history.htm> (дата обращения: 02.06.2020).
3. *Горемыкин В.П.* Главное управление кадров Министерства обороны Российской Федерации: история и современность // Военная мысль. – 2013. – Вып. № 6. – С. 3–10.

Д.П. Гасюк,
доктор техн. наук, профессор
Михайловская военная артиллерийская академия;
В.А. Дубовский*,
кандидат техн. наук;
В.С. Стативка*,
доктор военных наук, профессор
*ВА МТО имени генерала армии А.В. Хрулёва

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НЕИСПРАВНОГО РАКЕТНОГО ВООРУЖЕНИЯ

В материалах статьи представлена методика, применение которой позволяет снизить транспортные расходы, обусловленные необходимостью перемещения ракетного вооружения (РВ) при восстановлении исправного состояния. Оптимальность достигается сокращением расстояний при перемещении неисправных образцов РВ в пункты размещения обслуживающих организаций.

Новизна заключается в применении венгерского метода для решения транспортной задачи, который адаптирован к специфике оптимизации перемещений неисправного ракетного вооружения и обеспечивает требуемую достоверность решения задачи.

Ключевые слова: методы линейного программирования, венгерский метод, транспортная задача, ракетное вооружение.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современной токе зрения на ведение боевых действий ракетное вооружение (РВ) представляет собой важнейшую компоненту системы высокоточного оружия Сухопутных войск [1], что обуславливает наличие повышенных требований, предъявляемых к готовности данного вида вооружения в ходе штатной эксплуатации. Очевидно, что своевременное восстановление неисправных образцов РВ является одной из приоритетных задач, с решением которой сталкивается система поддержки эксплуатации (ПЭ) РВ.

В свою очередь, в ходе реализации процессов ПЭ возникает потребность в выработке оптимального решения при проведении различных видов обслуживания и ремонта образцов РВ. Сущность вопроса состоит в необходимости распределения работ между обслуживающими организациями (сервисными организациями оборонно-промышленного комплекса (ОПК), ремонтно-восстановительными органами – далее ООрг), участвующими в данных процессах. Задачи такого вида возникают в том случае, когда имеющихся в наличии ресурсов оказывается недостаточно для освоения требуемого объема работ. Поэтому целью решения задач данного типа является отыскание такого варианта распределения ресурсов, который позволил бы минимизировать общие затраты на выполнение мероприятий в рамках ПЭ образцов РВ.

В общем виде задача оптимизации состоит в определении такого варианта организации процессов ПЭ РК, при котором запросы всех потребителей полностью и вовремя будут удовлетворены, весь фонд ВВТ – обслужен и суммарные издержки будут минимальны. В нашем случае будем решать задачу снижения транспортных издержек, обусловленных необходимостью перемещения образцов РВ в пункты размещения ООрг.

Известен ряд публикаций [2–4], посвященных выбору рационального варианта взаимодействия эксплуатирующих организаций с предприятиями ОПК, использование которых ввиду некоторых особенностей и ограничений будет не совсем корректным. В частности, авторами предлагается распределять ремонтный фонд между войсковыми ремонтными органами и сервисными предприятиями ОПК на основе значений трудоемкости обслуживания и

ремонта образцов РВ. Кроме того, рассматривается возможность использования выездных бригад сервисных организаций ОПК. Несмотря на очевидную теоретическую и практическую значимость полученных результатов, применить их для оптимизации транспортных издержек при перемещении РВ не представляется возможным по причине наличия границ исследования (методика не учитывает перемещение образцов в ходе проведения обслуживания и ремонта).

По нашему мнению, в сложившейся ситуации целесообразно будет провести самостоятельное исследование по поиску рациональных путей оптимизации перемещений неисправного РВ в ходе его восстановления, с тем чтобы разработанная методика дополнила существующий научно-методический аппарат по совершенствованию системы эксплуатации образцов РВ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ функционирования системы ПЭ РК показывает, что производственные возможности ООрг и потребности в поддержке измеряются одними и теми же величинами, поэтому при оптимизации целесообразно применять методы линейного программирования (ЛП) [5, 6].

Сущность всех известных методов решения задачи ЛП заключается в том, что эти методы позволяют найти начальное опорное (допустимое) решение, а затем, улучшая его, – получить оптимальное решение. При этом после проведения каждой итерации проверяется оптимальность решения. В том случае, если оно удовлетворяет условиям, то решение заканчивается. При решении задач по ПЭ образцов РВ возникают две ситуации. Для одной из них характерно наличие паритета между объемом наличных ресурсов ООрг и потребностью в ПЭ образцов РВ. Тогда имеет место сбалансированная распределительная задача, иначе – несбалансированная:

$$\sum_{j=1}^n M_{pj} = \sum_{i=1}^m W_{cpi} \text{ – сбалансированная,} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n M_{pj} \neq \sum_{i=1}^m W_{cpi} \text{ – несбалансированная.} \quad (2)$$

При решении несбалансированной задачи требуется не только распределять ресурсы ООрг, но и решать, какие работы по ПЭ не выполнять либо какие ресурсы не использовать:

$$\sum_{i=1}^m W_{cpi} < \sum_{j=1}^n M_{pj} \text{ – какие работы не выполнять,} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m W_{cpi} > \sum_{j=1}^n M_{pj} \text{ – какие ресурсы не использовать.} \quad (4)$$

При планировании мероприятий по ПЭ РВ должностные лица ОВУ обладают следующей информацией: перечень и координаты пунктов размещения ООрг; специализация и производственные возможности ООрг, а также координаты мест размещения образцов РВ, требующих ПЭ, их количество и характер неисправностей (дефектов, повреждений). Располагая этими данными, требуется спланировать перемещение таким образом, чтобы общие транспортные расходы $\Phi_{ц}$ оказались минимальными.

Целевая функция задачи по перемещению будет выражаться следующей зависимостью:

$$\Phi_{ц} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m m_{Пij} l_{ij} \rightarrow \min, \quad (5)$$

при условии

$$m_{\Pi ij} \geq m_{\Pi ij}^{\text{зад}}, \quad (6)$$

и ограничениях:

$$m_{\Pi ij} > 0, l_{ij} > 0; \quad (7)$$

тогда

$$\sum_{j=1}^n m_{ij} = w_{ij} (i=1, 2, \dots, m), \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m w_{ij} = m_j (j=1, 2, \dots, n), \quad (9)$$

где $w_{i,j}$ – производственные возможности по перемещению из i -го пункта размещения образцов РВ в j -й пункт размещения ООрг, ед.;

m_{ij} – количество образцов РВ, планируемое для перемещения из i -го пункта размещения образцов РВ в j -й пункт размещения ООрг, ед.;

$l_{i,j}$ – расстояние от j -го пункта размещения ООрг до i -го пункта размещения образцов РВ, требующих сопровождения, км.

Превалирующая часть распределительных задач, касающихся вопросов оптимизации перемещения можно представить в виде матрицы (табл. 1).

Таблица 1

Распределительная матрица показателей перемещения

| Производственные возможности $w_{cp} = \{w_{cpi}\}$ | Потребность в перемещении $m_{\Pi} = \{m_{\Pi j}\}$ | | | | | | |
|--|---|-------------|-------------|-----|-------------|-----|-------------|
| | $m_{\Pi 1}$ | $m_{\Pi 2}$ | $m_{\Pi 3}$ | ... | $m_{\Pi j}$ | ... | $m_{\Pi n}$ |
| w_{cp1} | l_{11} | l_{12} | l_{13} | ... | l_{1j} | ... | l_{1n} |
| w_{cp2} | l_{21} | l_{22} | l_{23} | ... | l_{2j} | ... | l_{2n} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| w_{cpi} | l_{i1} | l_{i2} | l_{i3} | ... | l_{ij} | ... | l_{in} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| w_{cpr} | l_{r1} | l_{r2} | l_{r3} | ... | l_{rj} | ... | l_{rn} |

Примечание. Таблица разработана Д.П. Гасюком.

Значения величин $l_{i,j}$ соответствуют расстоянию от пунктов размещения ООрг до пунктов размещения образцов РВ. Величины $l_{i,j}$ являются независимыми. Для процесса перемещения затраты, определяемые количеством перемещенных образцов РВ w_{cpij} , равны $w_{cpij} l_{ij}$, что соответствует линейной распределительной задаче.

ОПЕРАТИВНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НЕИСПРАВНОГО РАКЕТНОГО ВООРУЖЕНИЯ

В контексте использования образцов РВ по предназначению в целевой функции значения расстояний предполагается определять, основываясь на оперативной модели (рис. 1), по координатам широты и долготы, выраженных в километровой сетке, и с учетом поправочного коэффициента (L_m) по зависимости

$$l_{i,j} = \sqrt{\left((h_{wi} - h_{mj})^2 + (d_{wi} - d_{mj})^2 \right)} \cdot L_m, \tag{10}$$

где h_{wi}, h_{mj} – координаты широты (пунктов размещения ООрг и образцов РВ), км;
 d_{wi}, d_{mj} – координаты долготы (пунктов размещения ООрг и образцов РВ), км.

Задачу определения оптимального варианта перемещения в данной работе предлагается выполнить с помощью венгерского метода. В общем виде алгоритм состоит из операций, обеспечивающих необходимые преобразования исходной матрицы (табл. 1), построение опорного плана перемещения и проведение необходимого количества операций до тех пор, пока найденное решение не будет удовлетворять целевой функции (5).

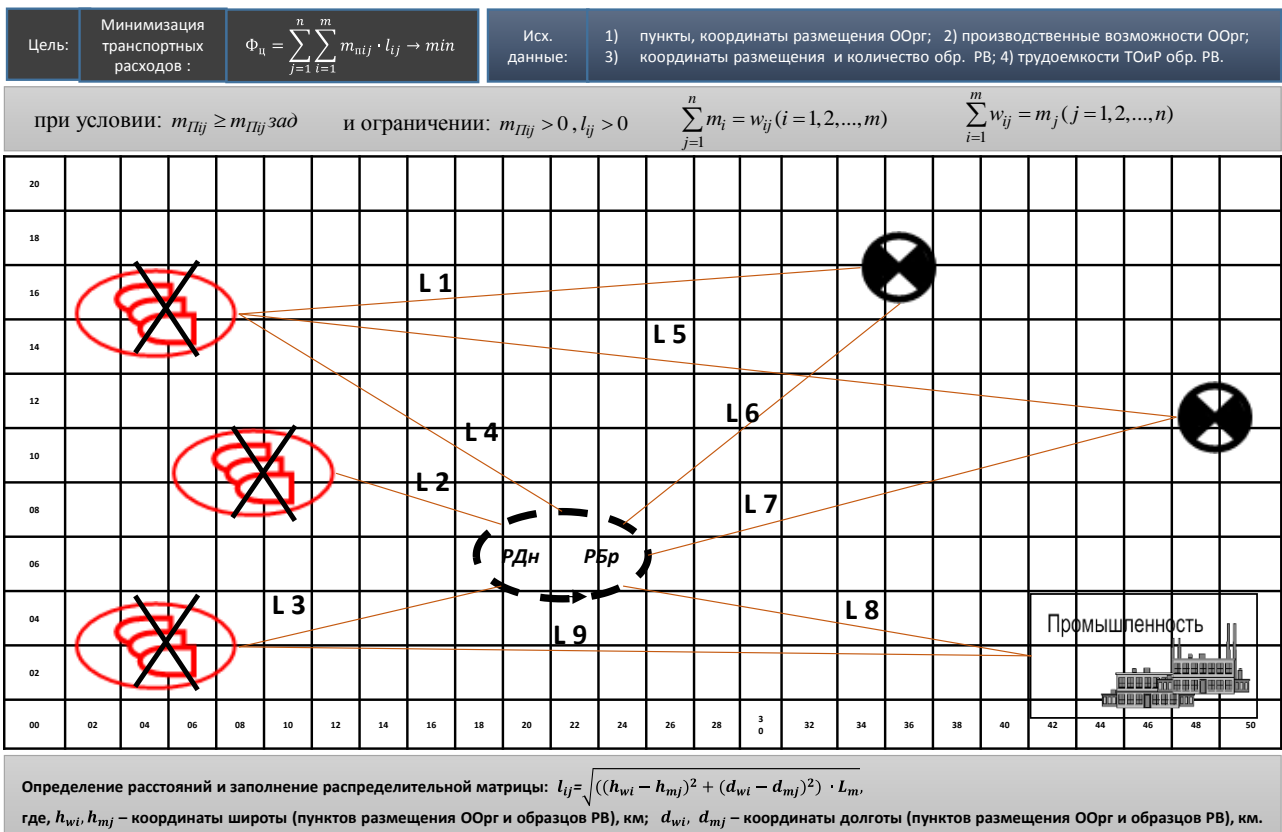


Рис. 1. Оперативная модель оптимизации перемещений (разработана Д.П. Гасюком)

В соответствии с постановкой задачи предлагается информационная модель (рис. 2), которая включает входную и выходную информацию, а также механизм их взаимодействия.

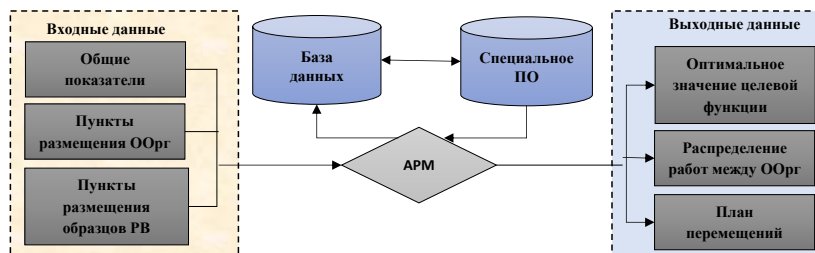


Рис. 2. Информационная модель (разработана В.А. Дубовским)

Входные данные в виде заявок на проведение обслуживания и ремонта будут поступать от эксплуатирующих организаций в орган управления техническим обеспечением (ОУ) и использоваться в качестве базы данных для планирования мероприятий по ПЭ.

Выходные данные (табл. 2) содержат сведения, полученные в результате обработки поступающей информации при помощи специального программного обеспечения, в которых указываются: оптимальное значение целевой функции (минимальные транспортные издержки на перемещение образцов РВ), а также распределение работ между ООрг и предлагаемый вариант перемещений с учетом размещения каждого образца РВ.

Таблица 2

План перемещения образцов РВ

| Перемещается из пункта размещения образца РВ | Перемещается в пункт размещения ООрг | | | | Всего |
|--|--------------------------------------|-------------|-----|-------------|-------|
| | Пункт n_1 | Пункт n_2 | ... | Пункт n_j | |
| 1 2 3 ... $N(i)$ | $X(i, j)$ | | | | |
| Итого | | | | | |
| Целевая функция = | | | | | |

Примечание. Таблица разработана В.С. Стативкой.

Входные данные представляются в виде следующей информации: общие показатели (табл. 3), размещение и производственные возможности ООрг (табл. 4), размещение образцов РВ требующих ПЭ (табл. 5).

В «Общих показателях» готовятся данные по признаку оптимизации (K), который может принимать значения: $K = -1$ при минимизации; $K = +1$ при максимизации. Кроме того, даются сведения о количестве пунктов размещения образцов РВ (N), о количестве пунктов размещения ООрг (M), о значении поправочного коэффициента ($K1$).

Таблица 3

Общие показатели

| № п/п | Наименование показателей | Идентификатор | Значение |
|-------|--|---------------|----------|
| 1 | Признак оптимизации (-1 – минимизация; $+1$ – максимизация) | K | |
| 2 | Количество пунктов размещения ООрг | M | |
| 3 | Количество пунктов размещения образцов РВ | N | |
| 4 | Поправочный коэффициент | $K1$ | |

Примечание. Таблица разработана В.С. Стативкой.

В «Размещении и производственных возможностях ООрг» должны быть показаны координаты (широта, долгота) пунктов размещения ООрг в километровой сетке и их производственные возможности по обслуживанию образцов РВ. Эти сведения берутся из донесений, которые поступают в ОУ в соответствии с табелем срочных донесений и из планов эксплуатации ВВТ и выхода в ремонт.

В «Размещение образцов РВ» должны быть показаны координаты (широта, долгота) пунктов размещения элементов РК, требующих ПЭ, в километровой сетке и количество элементов РК, подлежащих перемещению в пункты размещения ООрг.

Таблица 4

Размещение и производственные возможности ООрг

| № п/п | Пункт размещения ООрг | Координаты | | Производственные возможности, ед./сут. |
|-------|-----------------------|------------|---------|--|
| | | широта | долгота | |
| 1 | $N(i)$ | $H1_i$ | $D1_i$ | A_i |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| ... | | | | |
| N | | | | |

Примечание. Таблица разработана В.С. Стативкой.

Источниками информации в мирное время являются донесения и планы эксплуатации ВВТ и выхода в ремонт, поступающие из эксплуатирующих организаций в ОВУ, или документы, подготовленные на основании оценки обстановки. Размерность величин может изменяться в пределах от одного знака до пяти. Точность измерения – округление до целого числа.

Таблица 5

Размещение образцов РВ

| № п/п | Пункт размещения образцов РВ | Координаты | | Количество неисправных машин, ед. |
|-------|------------------------------|------------|---------|-----------------------------------|
| | | широта | долгота | |
| 1 | $N(i)$ | $H2_j$ | $D2_j$ | B_j |
| 2 | | | | |
| ... | | | | |
| N | | | | |

Примечание. Таблица разработана В.С. Стативкой.

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБРАЗЦОВ РАКЕТНОГО ВООРУЖЕНИЯ

Алгоритм оптимизации перемещений образцов РВ состоит из 11 блоков (рис. 3): формирование входных данных; определение расстояний от пунктов размещения ООрг до пункта размещения образцов РВ; составление исходной матрицы; проверка исходной матрицы на сбалансированность; балансировка исходной матрицы; подготовительный этап; проверка плана на оптимальность; первый этап; второй этап; третий этап; формирование выходных данных.

На подготовительном этапе операторами блок-схемы алгоритма производится ввод данных, преобразование исходной матрицы транспортных издержек (МТИ), определение расстояний от мест размещения ООрг до мест размещения неисправных образцов РВ, а также построение первоначальной матрицы перемещений РВ $M(I, J)$.

Первый шаг преобразования МТИ зависит от того, максимизируется или минимизируется функция цели. Если функцию цели нужно максимизировать, то первым действием будет вычитание всех элементов каждого столбца матрицы и максимального элемента этого столбца. Если же функция цели минимизируется, то из всех элементов каждого столбца вычитают его минимальный элемент. Результатом этой операции будет новая МТИ, в каждом столбце которой появится хотя бы один нулевой элемент.

Второй шаг преобразования МТИ состоит в получении нулевых элементов в каждой строке матрицы и выполняется аналогично как при максимизации, так и при минимизации функции цели.

Далее решаются задача составления исходной матрицы перемещений (МП) и задача проверки наличия невязок. Если полученное решение на данном этапе свидетельствует о том, что первоначальный план перемещений не оптимален, поскольку не все образцы РВ перемещены и не все пункты размещения ООрг полностью удовлетворены, необходим переход к

итерации, в частности, к ее первому этапу. После этого осуществляется переход к выполнению первого этапа.

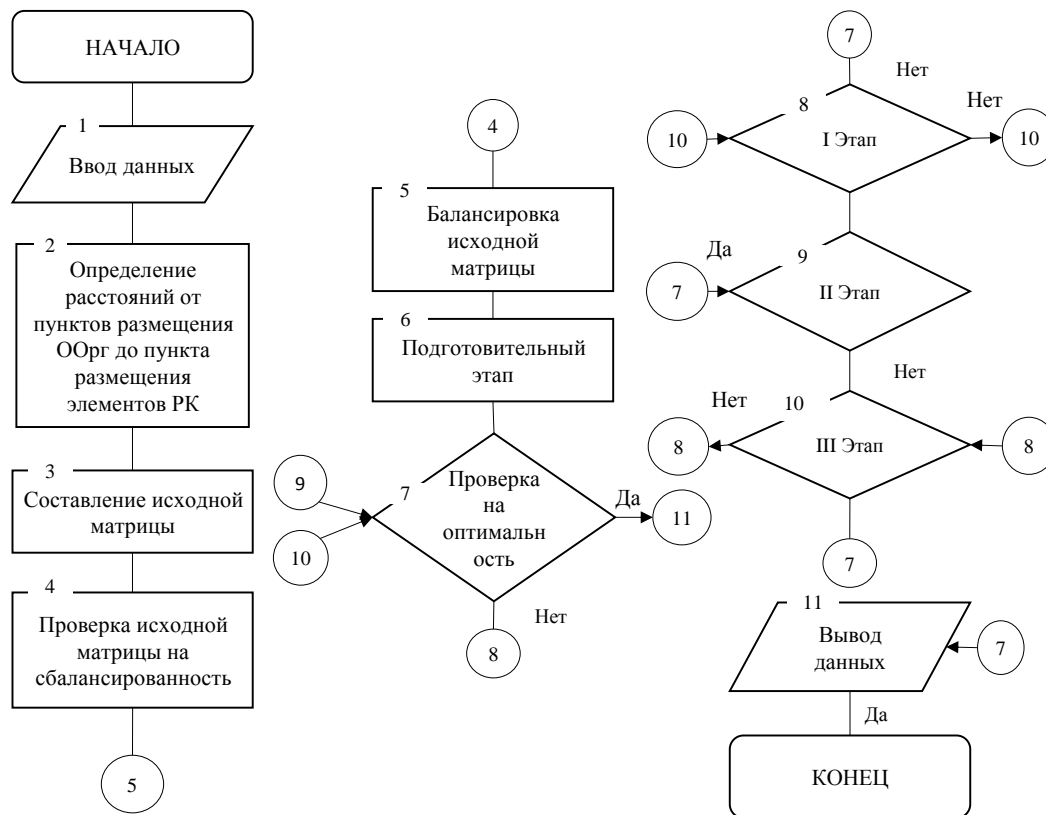


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оптимизации перемещений

Этап 1 предназначен для определения перехода к одному из последующих этапов. Условием перехода к этапу 2 является наличие в МТИ отмеченного нулевого элемента $C(I, J) = -2$, в строке которого $A(I) \neq 0$, т. е. имеется «невязка». Переход к этапу 3 определяется отсутствием нулевых элементов среди невыделенных. Первый этап составлен по схеме "Разветвление в цикле" и трактуется следующим образом. Организуются циклы, с помощью которых исключаются из рассмотрения все элементы МТИ, выделенные знаком (-1) либо по столбцу, либо по строке. Среди оставшихся отыскивается нулевой и отмечается знаком (-2). Если $A(I) = 0$, то эту строку отмечают знаком (-1) и устанавливают, есть ли в ней нулевые элементы, отмеченные знаком (-1). Если такой имеется, то его отмечают новым знаком (-3), а знак выделения с соответствующего столбца (-1) снимают, т. е. записывают $B(J) = 0$. Этот процесс повторяют до тех пор, пока не будет выполнено условие перехода к этапу 2. В противном случае осуществляется переход к этапу 3.

Этап 2 предназначен для улучшения начального плана и ликвидации невязок. Основными его операциями являются: построение цепочки, выбор некоторого минимального параметра и перераспределение его между элементами цепочки. Результатом является новый план распределения с сокращенными или ликвидированными невязками.

Построение цепочки производится в МТИ. Она заключается в том, что элементы, отмеченные знаками (-2) и (-3), объединяются в некоторую чередующуюся последовательность. При этом цепочка обязательно начинается с нуля, отмеченного знаком (-2) и стоящего в строке, где $A(I) \neq 0$. Полученную цепочку переносят на позиции соответствующих элементов МП и определяют минимальный параметр.

Параметр определяют посредством сравнения и выбора минимального значения из невязки по строке, невязки по столбцу и узловых элементов цепочки МП. Затем найденную вели-

чину прибавляют ко всем нечетным и вычитают из всех узловых элементов цепочки. Алгоритм этого этапа составлен по схеме. Фиксируют значения по строке $E = A(R)$. Отыскивают в МТИ элемент, отмеченный знаком (-3). Обращаются к соответствующему элементу МП и проверяют $X(I, J) < E$. Если условие выполняется, то за минимальное E принимают значение элемента $X(I, G)$. Операцию повторяют для всех $X(I, G)$, которым в МТИ соответствуют элементы, отмеченные знаком (-3).

Полученное таким образом значение $E = X(I, G) \min$ или $E = A(R)$, если оказалось, что $X(I, G) > A(R)$, сопоставляют затем с величиной невязки по столбцу $B(G)$. Если $B(G) < E$, то полагают: $E = B(G)$. Это значение и принимают за минимальный параметр.

Затем в сформированной цепочке элементов МП определяют их четность и выполняют операцию суммирования $(X(R, G) + E)$, если элемент оказался четным. В противном случае выполняют операцию вычитания.

На последующем шаге в векторах A и B ликвидируют знаки (-1) (заменяют их на нули) и вновь проверяют на наличие невязок. Если

$$S = \sum_{i=1}^m A_i = 0, \quad (11)$$

то задачу считают решенной и на печать выдаются результаты в виде конечной матрицы МП в форме плана перемещения и значения функции цели. В противном случае вновь переходят к нулевому шагу следующей итерации.

Этап 3 обеспечивает получение дополнительного количества нулевых элементов МТИ, необходимых для дальнейшего решения задачи. Основным действием этого этапа является поиск среди невыделенных элементов минимального. Этот элемент затем вычитают из всех элементов невыделенных строк и прибавляют ко всем элементам выделенных столбцов. Алгоритм этого этапа аналогичен схеме первого этапа, из рассмотрения исключены выделенные элементы МТИ. Оставшиеся элементы сопоставляют с заданным заведомо большим значением $E = 9999$ и находят среди них минимальный $E = C(I, J) \min$.

После этого сортируют все элементы МТИ на три группы.

К первой относят все невыделенные элементы. Их значения уменьшают на величину E .

Во вторую группу включают элементы, расположенные на пересечениях выделенных строк и столбцов. Эти элементы увеличивают на величину E . Остальные элементы оставляют без изменения.

Результирующую матрицу, содержащую один или несколько новых нулевых элементов, заполняют и вновь переходят к первому этапу. На заключительном этапе моделирования (блок 11) производится формирование и вывод расчетных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом изложенного можно сделать следующие выводы:

1) задача минимизация перемещений неисправного РВ в ходе восстановления является одним из важнейших аспектов, оптимизация которых позволяет повысить эффективность мероприятий по поддержке эксплуатации;

2) использование предлагаемой методики позволяет разработать оптимальный план перемещения неисправных образцов РВ, на основе которого представляется возможным рационально распределять нагрузку по обслуживанию и ремонту между ООрг;

3) целесообразным развитием предлагаемой методики следует считать разработку специального программного обеспечения и формирование соответствующей базы данных, совместное применение которых позволит автоматизировать расчетные процедуры – тем самым снизить объем рутинных вычислений.

Список используемых источников

1. Военная доктрина Российской Федерации: утв. Президентом Российской Федерации 25 декабря 2014 г.: указ № 815. – URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/41d527556bec8deb3530.pdf> (дата обращения: 07.06.2020).

2. *Вырвич А.А., Дюдя Ю.В.* Оценка эффективности функционирования системы эксплуатации ракетно-артиллерийского вооружения в условиях взаимодействия с сервисными предприятиями промышленности // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: тр. научно-практич. конф. – СПб.: Военная академия связи им. С.М. Будённого, 2016. – С. 359–363.

3. *Вырвич А.А., Шевченко В.А.* Методика обоснования требований к процессу функционирования системы ремонта ракетно-артиллерийского вооружения // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: тр. II межвузовской научно-практич. конф. – 2017. – С. 224–227.

4. *Дьяков А.Н., Кокарев А.С., Решетников Д.В.* Методика выбора стратегии технического обслуживания и ремонта ракетно-космической техники // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21650> (дата обращения: 24.06.2020).

5. *Стативка В.С., Дубинин С.Г., Назаркин В.Г.* Основы научных исследований в управлении материально-техническим обеспечением войск: учебник. – СПб.: ВАМТО, 2013. – 382 с.

6. Математическое моделирование задач материально-технического обеспечения: учебно-метод. пособие. – СПб.: ВАТТ, 2010.

С.Ю. Герасименко;
С.Ю. Пирогов,
доктор техн. наук, доцент;
В.И. Поспищенко,
кандидат техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОТДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАКЕТОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СПАСЕНИЯ

В статье представлены результаты исследования зависимости начальных параметров движения отделяемых частей ракет-носителей от параметров ракетодинамической системы спасения. Разработан алгоритм проведения расчетов начальных параметров движения на основе модифицированных энергомассовых уравнений движения, в которых учитывается применение ракетодинамической системы спасения.

Ключевые слова: отделяемая часть, ракета-носитель, ракетодинамическая система спасения, полезный груз.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вследствие повышения предложения на рынке пусковых услуг и, как результат, повышения конкуренции мировая тенденция развития средств выведения полезного груза на орбиту направлена на снижение стоимости пусков, в том числе и за счет применения многоразовых элементов ракет-носителей (РН). Способы спасения отделяемых частей ракет-носителей (ОЧ РН) различны, каждый имеет как положительные, так и отрицательные особенности [1, 2, 5]. Единственный реализованный и применяемый на сегодняшний день – это способ спасения первой ступени РН «Falcon-9» с помощью ракетодинамической системы спасения (РДСС), состоящей из двигательной установки первой ступени, системы управления полетом ступени на этапе спуска, и дополнительного запаса топлива для функционирования РДСС. Применение РДСС приводит к увеличению стартовой массы РН и как результат – к снижению относительной массы выводимого полезного груза и накладывает дополнительные ограничения на программу полета РН, а именно на высоту и скорость полета РН в момент разделения ступеней, которые, в свою очередь, являются начальными параметрами движения спасаемой ступени при баллистических расчетах. Это обусловливается тем, что высота и скорость РН в момент разделения ступеней должны иметь такие значения, при которых обеспечиваются допустимые значения продольной перегрузки и конвективного теплового потока к корпусу спасаемой ступени на этапе спуска, исключаящие его разрушение. Поэтому возникает необходимость в исследовании влияния параметров РДСС на начальные параметры движения ОЧ РН, а именно спасаемой ступени РН.

ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАКЕТОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СПАСЕНИЯ НА НАЧАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ОЧ РН

Для определения зависимости начальных параметров движения ОЧ РН от параметров РДСС при составлении уравнений движения РН будем использовать общепринятые допущения [3, 4].

1. Земля – сферическая, поле тяготения – центральное.
2. Ускорение силы тяжести в диапазоне высот активного участка траектории РН может считаться постоянным по абсолютной величине, но направленным к центру Земли.

3. Движение относительно центра масс РН не рассматривается.

4. Углы атаки малы.

5. Управление – идеальное, а управляющие усилия по сравнению с силой тяги пренебрежимо малы. РН на активном участке совершает строго программный полет.

6. Траектория движения РН при выведении полезной нагрузки на низкую орбиту лежит в плоскости стрельбы, проходящей через центр Земли.

7. Влияние атмосферы на траекторию движения учитывается только на активном участке полета первой ступени РН.

8. Суточное вращение Земли отсутствует.

Рассматриваемая РН – двухступенчатая тандемной схемы, компоненты ракетного топлива – керосин и жидкий кислород, орбита – круговая с высотой 200 км, конечная скорость полета второй ступени равна первой космической скорости.

В данной работе под основным параметром РДСС будем понимать относительную массу топлива, необходимую для функционирования РДСС, так как масса топлива, необходимая для обеспечения функционирования РДСС, может составлять до 95% от общей массы системы спасения.

При выведении космического аппарата на круговые орбиты с высотами менее 500 км используется способ прямого выведения, при котором в конце активного участка должны быть обеспечены следующие условия:

$$\begin{cases} V_k = V_{\text{кр}}(H_k); \\ H_k = H_{\text{к треб}}; \\ \vartheta_k = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где V_k, H_k – значения конечной скорости и высоты полета РН;

$V_{\text{кр}}(H_k)$ – значение круговой скорости для заданной высоты орбиты;

ϑ_k – значение конечного угла тангажа РН.

Конечные значения скорости V_k и высоты H_k существенно зависят от типа программы изменения угла тангажа, но одинаковые значения V_k и H_k можно получить при различных типах программ. Как правило, программу тангажа РН можно разбить на два участка [4]:

– вертикальный участок, на котором программа тангажа имеет вид

$$\vartheta_k(\tau) = \frac{\pi}{2}, \quad \tau \in (0 \div 0,05); \quad (2)$$

– участок разворота, на котором программа тангажа представлена в следующем виде:

$$\vartheta_k(\tau) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1-\tau}{0,95} \right)^k, \quad \tau \in (0,05 \div 1), \quad (3)$$

где τ – относительное время движения РН,

$$\tau = \frac{t}{t_k};$$

t, t_k – текущее и конечное время полета РН соответственно;

k – показатель степени.

Так как программные значения углов атаки не превышают 5° , что позволяет приравнять углы тангажа ϑ и углы наклона вектора скорости θ , то выражение текущего значения скорости для интервала времени $0,05 \leq \tau \leq \tau_1$ будет иметь следующий вид [4]:

$$V_1(\tau) = -K_{01} I_{y1} \ln \left(1 - \bar{m}_{T1} \frac{\tau}{\tau_1} \right) - \left(\frac{I_{y1} \bar{m}_{T1}}{\Phi_{01}} - \frac{I_{y2} \bar{m}_{T2}}{\Phi_{02}} \right) \int_{0,05}^{\tau_1} \sin \theta d\tau, \quad (4)$$

- где K_{01} – коэффициент потерь скорости на участке работы первой ступени;
- $\bar{m}_{T1}, \bar{m}_{T2}$ – относительные массы топлив первой и второй ступеней соответственно;
- I_{y1}, I_{y2} – удельный импульс ЖРД первой и второй ступеней соответственно;
- Φ_{01}, Φ_{02} – тяговооруженность первой и второй ступеней соответственно;
- τ_1 – относительное время работы двигателей первой ступени,

$$\tau_1 = \frac{1}{1 + \frac{\bar{m}_{T2} I_{y2} \Phi_{01}}{\bar{m}_{T1} I_{y1} \Phi_{02}}}.$$

Выражение для расчета коэффициента K_{01} имеет следующий вид:

$$K_{01} = K_{a1} K_{yup1} K_{z1} K_{адсс}, \quad (5)$$

- где K_{a1} – коэффициент потерь скорости, учитывающий аэродинамическое сопротивление РН;
- K_{yup1} – коэффициент потерь скорости на управление полетом первой субракеты, учитывающий затраты топлива на создание управляющих усилий;
- K_{z1} – коэффициент потерь скорости, учитывающий затраты топлива для работы привода турбонасосного агрегата;
- $K_{адсс}$ – коэффициент потерь скорости, учитывающий возрастание аэродинамического сопротивления РН за счет наличия ракетодинамической системы спасения.

Выражение текущего значения скорости для интервала времени $\tau_1 \leq \tau \leq 1$ имеет вид [4]

$$V_2(\tau) = V_1(\tau_1) - K_{02} I_{y2} \ln \left(1 - \bar{m}_{T2} \frac{\tau - \tau_1}{1 - \tau_1} \right) - \left(\frac{I_{y1} \bar{m}_{T1}}{\Phi_{01}} - \frac{I_{y2} \bar{m}_{T2}}{\Phi_{02}} \right) \int_{\tau_1}^1 \sin \theta d\tau, \quad (6)$$

- где $V_1(\tau_1)$ – значение скорости полета РН в конце работы двигателя первой ступени;
- K_{02} – коэффициент потерь скорости на участке работы второй ступени.

Выражение конечной высоты полета РН имеет вид

$$H_{\kappa} = \left(\frac{I_{y1} \bar{m}_{T1}}{\Phi_{01}} + \frac{I_{y2} \bar{m}_{T2}}{\Phi_{02}} \right) \int_{0,05}^1 V(\tau) \sin \theta d\tau, \quad (7)$$

- где $V(\tau)$ – скорость полета РН на интервале времени $0,05 \leq \tau \leq 1$.

В выражениях (4), (6), (7) интеграл определяет величину гравитационных потерь.

Расчет относительной массы полезного груза $\bar{m}_{ПН}$, выводимого рассматриваемой РН на заданную орбиту проводится на основе массового уравнения РН [4]

$$\bar{m}_{ПН} = \prod_{i=1}^2 \left[1 - k_{mCCi} \left(\bar{m}_{нби} + \Phi_{0i} \gamma_{двi} \right) - a_i \bar{m}_{Ti} \right], \quad (8)$$

- где k_{mCCi} – коэффициент, учитывающий увеличение массы конструкции РН за счет использования системы спасения;
- a_i – коэффициент, учитывающий затраты топлива на работу системы спасения, а также увеличение сухой массы за счет использования системы спасения;
- $\bar{m}_{нби}$ – относительная масса небаковых отсеков;
- $\gamma_{двi}$ – удельная масса двигателя.

В массовом уравнении РН (8) коэффициент a_i рассчитывается по следующему выражению:

$$a_i = (1 + \varepsilon_{CC1} + \varepsilon_{zap i} + \varepsilon_{ocm i}) \cdot \left(1 + k_{mCC} \left(\frac{K_{mi} \xi_{оки} + \xi_{Гi}}{K_{mi} + 1} \right) \right), \quad (9)$$

где ε_{CC1} – доля запасов топлива, необходимого для функционирования РДСС первой ступени РН;

$\varepsilon_{zap i}$ – доля гарантийного запаса топлива i -й субракеты;

$\varepsilon_{ocm i}$ – доля незабора топлива i -й субракеты;

K_{mi} – соотношение компонентов топлива i -й субракеты;

$\xi_{оки}$ – коэффициент конструкции бака окислителя i -й субракеты, определяемый как отношение массы конструкции бака окислителя к массе размещаемого в нем компонента топлива;

$\xi_{Гi}$ – коэффициент конструкции бака горючего i -й субракеты, определяемый как отношение массы конструкции бака горючего к массе размещаемого в нем компонента топлива.

В выражении (9) доля запасов топлива, необходимого на функционирование РДСС первой ступени РН, определяется как отношение относительной массы топлива, необходимой для функционирования РДСС, к общей относительной массе топлива первой ступени РН и имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{РДСС1} = \frac{\bar{m}_{РДСС}}{\bar{m}_{T1}}, \quad (10)$$

где $\bar{m}_{РДСС}$ – относительная масса топлива, необходимая для функционирования РДСС.

На основе системы уравнений (2)–(10) разработан алгоритм проведения расчетов, который представлен на рис. 1.

Значения требуемой скорости $V_{1\text{треб}}$ на интервале времени $0,05 \leq \tau \leq \tau_1$, относительных масс топлив первой и второй ступеней \bar{m}_{T1} и \bar{m}_{T2} , удельных импульсов жидкостных ракетных двигателей первой и второй ступеней I_{y1} и I_{y2} , начальных тяговооруженностей первой и второй субракет φ_{01} и φ_{02} , других проектно-баллистических параметров РН для расчетов в первом приближении выбираются на основе табличных значений, полученных в ходе обработки технических характеристик РН соответствующего класса [3, 4].

Основными этапами приведенного алгоритма являются:

1. Ввод исходных данных.
2. Расчет значения конечной скорости полета РН V_2 для интервала времени $\tau_1 \leq \tau \leq 1$.
3. Сравнение полученного значения скорости V_2 с V_k .
4. При невыполнении условия (3) алгоритма проводится пересчет значения скорости V_2 путем варьирования значением \bar{m}_{T2} .

5–7. Порядок расчета значений скорости V_1 для интервала времени $0,05 \leq \tau \leq \tau_1$ аналогичен порядку расчета значений скорости V_2 .

8. Расчет конечной высоты полета H_k для рассчитанных значений скоростей V_1, V_2 .

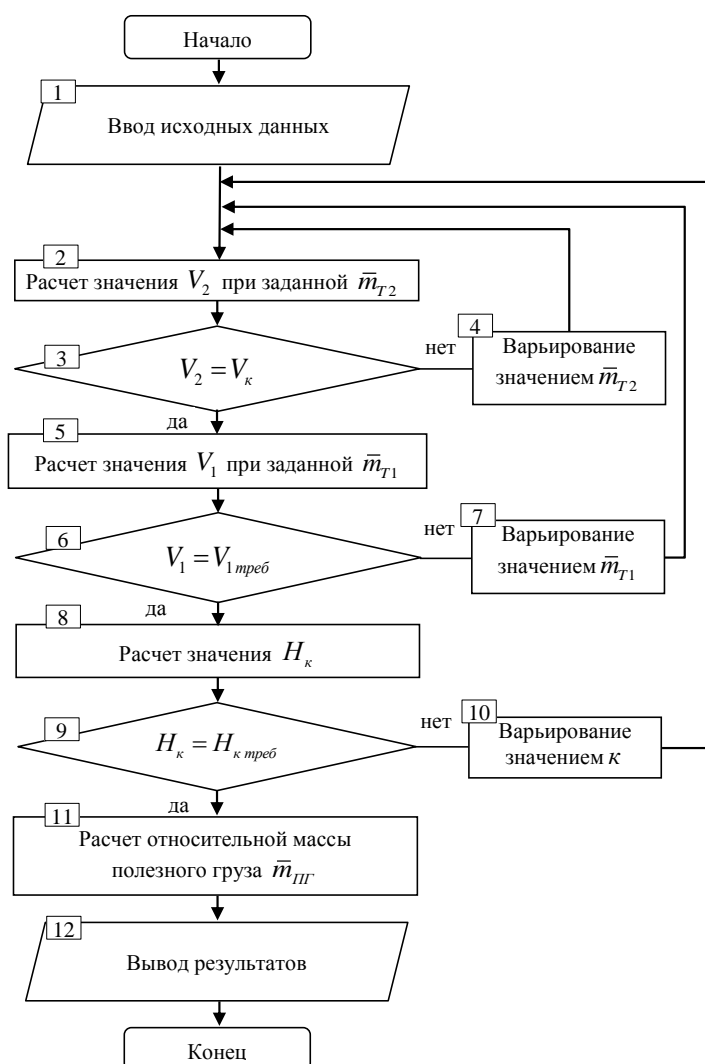


Рис. 1. Алгоритм проведения расчетов

9. Сравнение полученного значения конечной высоты полета H_k с требуемым $H_{k \text{ треб}}$;

10. При невыполнении условия (9) алгоритма проводится пересчет значения конечной высоты полета H_k путем варьирования значением показателя степени k в выражении (3);

11. Расчет относительной массы полезного груза $\bar{m}_{\text{ПГ}}$, выводимого рассматриваемой РН на заданную орбиту.

12. Вывод результатов.

На основе результатов, полученных в ходе расчетов, получены графики зависимости относительной массы полезного груза, выводимого на базовую орбиту, от скорости полета РН в момент разделения ступеней при различных запасах топлива, необходимых для функционирования РДСС (рис. 2).

Из данного графика видно, что при увеличении относительной массы топлива $\bar{m}_{\text{Т РДСС}}$, необходимой для функционирования РДСС, оптимум относительной массы полезного груза смещается в сторону меньших скоростей полета РН в момент разделения ступеней, а при $\bar{m}_{\text{Т РДСС}} > 0,16$ относительная масса полезного груза становится менее 1% от общей массы РН, что ставит под вопрос целесообразность применения РДСС.

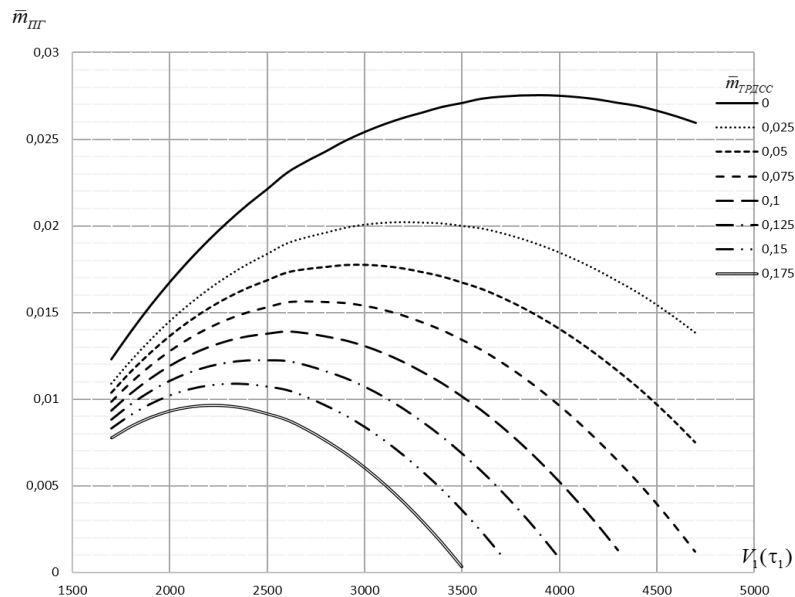


Рис. 2. Зависимость относительной массы полезного груза от скорости полета РН в момент разделения ступеней при различных запасах топлива, необходимых для функционирования РДСС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных расчетов по представленному алгоритму получена зависимость относительной массы полезного груза от массы топлива, необходимой для функционирования РДСС. Полученная зависимость может быть использована при проведении дальнейших исследований по оценке запаса характеристической скорости спасаемой ступени, необходимого для осуществления вертикальной посадки с предварительным торможением спасаемой ступени перед входом в плотные слои атмосферы и без предварительного торможения, а также выбора оптимальных параметров РДСС.

Список используемых источников

1. Карп К.А., Кузнецов Ю.Л. Синтез всеазимутальных ракет-носителей. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 122 с.
2. 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. – С. 142–149.
3. Мухамедов Л.П. Основы проектирования транспортных космических систем: учеб. пособие. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 321 с.
4. Шилимов В.Ф., Плясунов А.А. Проектирование ракет: учеб. пособие. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1982. – Вып. 1: Энергомассовый анализ ракет. – 59 с.
5. Проектные исследования ГКНПЦ имени М.В. Хруничева по обоснованию многоуровневой ракетно-космической системы / А.И. Кузин, С.Н. Лозин, П.А. Лехов и др. // Авиакосмическая техника и технология. – 2010. – № 1. – С. 3–12.

И.В. Грудинин,
доктор военных наук, профессор
ВКА имени А.Ф. Можайского;
Д.А. Пальгуев,
кандидат техн. наук, доцент
ФГАУ ВО «НИ НГУ имени Н.И. Лобачевского»;
А.Н. Шентябин,
кандидат военных наук
АО «НИИ ВК имени М.А. Карцева»

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДСИСТЕМА СБОРА, ОБРАБОТКИ И ОБМЕНА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Проведен анализ существующих алгоритмов обработки радиолокационной информации. Обозначены проблемы применения традиционных алгоритмов обработки радиолокационной информации в масштабе времени, близком к реальному. Выявлены предпосылки к созданию информационной системы сетевой структуры. Предложено решение по доставке радиолокационной информации потребителям без изменения иерархической структуры системы информационного обеспечения. Разработаны рекомендации по построению перспективной автоматизированной системы управления.

Ключевые слова: алгоритм, автоматизированная система управления, сетевая структура, информационное обеспечение, телеметрическая информации.

ВВЕДЕНИЕ

В современных концепциях организации и ведения боевых действий особое значение придается информации и всем вопросам, связанным с ее получением, обработкой, принятием решений и доставкой потребителям. Информационные процессы самым непосредственным образом влияют на цикл боевого управления. При этом одним из существенных резервов для сокращения цикла боевого управления является время нахождения информации в системе ее сбора, обработки и доставки, а сокращение такого времени в различных условиях функционирования информационной системы является одной из самых серьезных проблем современных автоматизированных систем управления (АСУ).

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

С конца 60-х годов прошлого века технология работы с радиолокационной информацией (РЛИ) предусматривает реализацию метода третичной обработки [1]. Изначально этот метод предназначался для сбора, обработки и доставки информации в рамках информационных систем иерархической структуры. Вместе с тем традиционные алгоритмы объединения информации от пространственно распределенных источников РЛИ в соответствии с подходом, предложенным в [2], базируются на принципе «группы схем ветвящихся решений». В соответствии с данным принципом после получения каждого сигнала формируется несколько альтернатив решений, осуществляется выбор одной из них в качестве реализуемого решения с отнесением оставшихся к разряду гипотетических. С поступлением последующего сигнала аналогично формируется новая группа альтернатив решений, но с учетом в качестве априорной информации о результатах решения задачи выбора в предыдущей итерации. Такая технология неизбежно ведет к лавинообразному возрастанию числа формируемых гипотез. В

целях ограничения такого возрастания предпринимаются различные меры по отсечению «невостребованных» ветвей, однако это неизбежно ведет к потере части информации. В специальной литературе [2] отмечается, что такие потери проигнорированы в случаях, когда расстояние между целями существенно превышает ошибки измерений на временном интервале между измерениями. При обработке информации о плотном потоке обнаруживаемых объектов ветвящиеся алгоритмы, как правило, не обеспечивают требуемой сходимости результатов измерений. Вместе с тем схема обработки РЛИ с отсечением невостребованных в процессе третичной обработки ветвей обеспечивает значительную экономию средств обработки и в связи с этим имеет наибольшее распространение в современных системах информационного обеспечения, базирующихся на средствах активной радиолокации.

Однако кроме обозначенного выше снижения качественных показателей обработанной РЛИ, по сравнению с потенциальными точностными характеристиками системы, такой подход существенно усложняет задачу точного определения числа регистрируемых радиолокационных объектов и обеспечения требуемой точности определения их координат в масштабе времени, близком к реальному. Именно по этой причине, по мнению авторов [2], группы алгоритмов, реализующие указанный подход, практически неприменимы для систем, поскольку не способны обеспечить объективно требуемую высокую пропускную способность. Тем не менее алгоритмы этой группы исторически получили наиболее широкое применение. В современных условиях с увеличением плотности целей требования по повышению пропускной способности информационных систем и сокращению времени доставки информации потребителям вступили в противоречие с их техническими возможностями. Длительное время считалось, что это противоречие может быть устранено путем повышения производительности вычислительных средств в узлах иерархических информационных систем и повышения пропускной способности каналов передачи данных между ними. Между тем зависимость традиционных алгоритмов третичной обработки от структуры построения информационной системы, а впоследствии и от современных требований по точности, своевременности и достоверности оказалась более существенной, чем предполагалось изначально.

Алгоритмы объединения информации, ориентированные на реализацию иерархической топологии систем информационного обеспечения, в процессе своей эволюции выявили ряд достоинств и недостатков. О несомненных достоинствах будет упомянуто ниже. К значительным же недостаткам необходимо отнести критическое запаздывание информации вследствие многоэтапной обработки в узлах системы, обмена информацией в многоуровневой структуре системы передачи данных. Очевидным следствием такого запаздывания является столь же критическое снижение достоверности информационной модели воздушно-космической обстановки, базирующейся на объединенной РЛИ. Одним из реализованных на практике направлений повышения достоверности информационной модели воздушно-космической обстановки являются построение и использование одноуровневой иерархической системы обработки и предоставления информации потребителям. В частности, корпорация *Northrop Grumman* в 2011 году представила устройство *Multi-Radar Tracker (MRT)* [3], замыкающее непосредственно на себя РЛИ от 32 радаров с производительностью 1000 трасс обнаруживаемых и сопровождаемых объектов каждый. Недостатком формируемой на базе устройства системы является большое количество линий передачи данных от РЛС к пункту управления и от него – к потребителям. Подобная система представляется громоздкой, маломобильной и слабоустойчивой к внешним воздействиям, но хорошо «вписывается» в концепцию «сетцентрических войн» с технологически отсталым противником.

Широко распространенные алгоритмы третичной обработки РЛИ от пространственно распределенных источников предусматривают формирование нескольких ветвящихся решений в одном цикле реализации. Условная вероятность отождествления сигналов от воздушно-космических объектов [1] определяется выражениями:

$$P(\Delta U_{ir} \leq \Delta U_{стр} \Delta S = 0) = \int_{-\infty}^{\infty} w(U_i) \left[\int_{U_i - \Delta U_{стр}}^{U_i + \Delta U_{стр}} w(\Delta U_{ir}) dU_{ir} \right] dU_i, \quad (1)$$

$$P(\Delta U_{ir} \leq \Delta U_{стр} \Delta S \neq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} (U_i) \left[\int_{U_i - \Delta U_{стр}}^{U_i + \Delta U_{стр}} w(\Delta U_{ir}) dU_{ir} \right] dU_i w, \quad (2)$$

где $\Delta U_{стр}$ – пространственные параметры строга, формируемого вокруг отметки от i -го источника;

ΔU_{ir} – расстояние между отметками от i -го и r -го источников ($\Delta S = 0$ – отметки принадлежат одному и тому объекту; $\Delta S \neq 0$ – отметки от различных объектов);

w – функция плотности распределения вероятности отождествления.

При отождествлении по координате x выражения (1) и (2) представляются в следующем виде:

$$P(\Delta x_{ir} \leq \Delta x_{стр} | \Delta S_x = 0) = \frac{1}{2\pi\sigma_i\sigma_r} \int_{-\infty}^{\infty} \times \\ \times \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\pi\sigma_i^2}\right) \left\{ \int_{x_i - \Delta x_{стр}}^{x_i + \Delta x_{стр}} \exp\left(-\frac{\Delta x_{ir}^2}{2\pi\sigma_r^2}\right) dx_{ir} \right\} dx_i, \quad (3)$$

$$P(\Delta x_{ir} \leq \Delta x_{стр} | \Delta S_x \neq 0) = \frac{1}{2\pi\sigma_i\sigma_r} \int_{-\infty}^{\infty} \cdot \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\pi\sigma_i^2}\right) \times \\ \times \left\{ \int_{x_i - \Delta x_{стр}}^{x_i + \Delta x_{стр}} \exp\left(-\frac{(\Delta x_{ir} + \Delta S_x)^2}{2\pi\sigma_r^2}\right) dx_{ir} \right\} dx_i. \quad (4)$$

Выражения (1)–(4) ограниченно корректны (условие корректности – наличие сообщений по одному или двум воздушно-космическим объектам от двух источников при отсутствии других сообщений). Практически такое условие невыполнимо, что актуализирует поиск новых решений реализации процедуры отождествления в интересах получения однозначного признака принадлежности отметок в сообщениях различных источников одному и тому же или разным объектам, а также значения вероятности правильного отождествления.

Технология ветвящихся решений позиционируется как непосредственно в алгоритме третичной обработки, так и на уровне реализации одной итерации обработки на соответствующих пунктах управления (объектами обработки выступают результаты измерений от нескольких источников РЛИ или подчиненных пунктов управления). В этих случаях в цикле обработки допускается буферизация сообщений от источников, и, следовательно, происходит уменьшение степени достоверности объединенной РЛИ вследствие накопления временных задержек.

ПРЕДПОСЫЛКИ К ПОСТРОЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Объединение существующих комплексов средств автоматизации пунктов управления (КСА ПУ) в единую полносвязную одноранговую сеть также сопряжено с трудностями. Прежде всего, трудности обусловлены необходимостью синхронизации информации, циркулирующей в сети, с учетом уровня полномочий ПУ, включенным в сеть, по обработке информации. Проблема синхронизации информации предопределяется неопределенностью в продолжительности времени обработки в каждом узле информационной системы, а разные полномочия ПУ по обработке информации (приданию ей различных признаков по результатам обработки) делают такое включение неоднородным по информации и в итоге – неодноранговым.

Исходя из вышесказанного нужно решить две основные проблемы при построении современной информационной системы сетевой структуры: 1) разработать алгоритм с минимальным и предсказуемым временем обработки (объединения) информации при вводе в систему и 2) разделить информацию по типам в информационной системе с целью ее правильной адресации. Как дополнительное условие крайне желательно иметь возможность одновременно функционирования существующей и перспективной информационных систем.

В работе [4] анализируется один из таких алгоритмов – алгоритм третичной обработки, адаптированный к сетевой топологии информационной системы [5]. Специфика алгоритма определяется реализацией процедуры объединения РЛИ, поступающей в информационную систему, с информацией, циркулирующей в системе сетевой топологии. В свою очередь, система с сетевой топологией по определению позволяет свести обработку и доставку информации потребителям до одноуровневой, т. е. минимизировать временные задержки. Кроме того, требуют определенной модернизации последовательность и содержание этапов третичной обработки РЛИ с учетом сетевой топологии информационной системы (рис. 1).

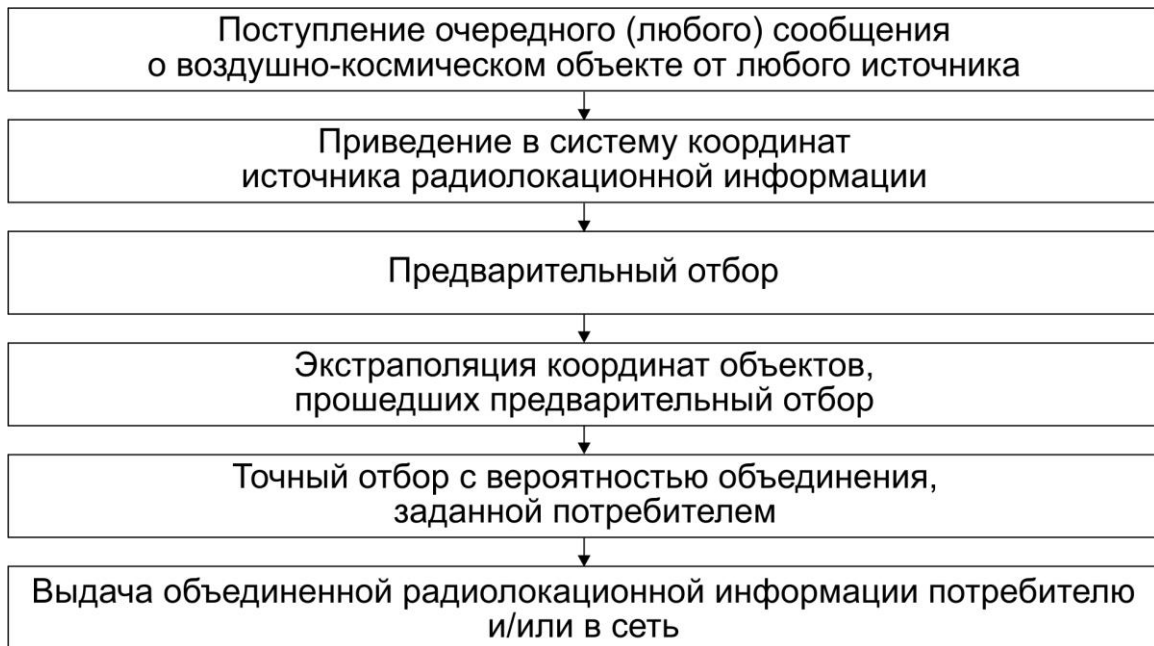


Рис. 1. Блок-схема алгоритма третичной сетевой обработки

Алгоритм обработки информации в системе с сетевой топологией [5, 6] предопределяет возможность получения строгого математического выражения для оперативного определения размеров строга отождествления при объединении РЛИ от различных источников. При таком подходе к обработке РЛИ отсутствует необходимость формирования в одной итерации нескольких ветвящихся альтернатив решений. В алгоритме рассматривается лишь одно ветвящееся решение, выработанное относительно поступившего сообщения от любого источника. Число ветвей в алгоритме минимизируется, вероятность объединения РЛИ по объекту от двух источников с учетом сетевой топологии информационной системы может быть определена по выражению [5]

$$\begin{aligned}
 P_{\text{объед}} = & \frac{1}{(2\pi)^3 \sqrt{|\Psi_{12}|}} \times \\
 & \times \left(\int_0^{\Delta x} \int_0^{\Delta y} \int_0^{\Delta z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x^2}{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2} + \frac{\Delta y^2}{\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2} + \frac{\Delta z^2}{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2} \right) \right] d\Delta x d\Delta y d\Delta z \right) \times \\
 & \times \left(\int_0^{\Delta V_x} \int_0^{\Delta V_y} \int_0^{\Delta V_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_x^2}{\sigma_{V_{x1}}^2 + \sigma_{V_{x2}}^2} + \frac{\Delta V_y^2}{\sigma_{V_{y1}}^2 + \sigma_{V_{y2}}^2} + \frac{\Delta V_z^2}{\sigma_{V_{z1}}^2 + \sigma_{V_{z2}}^2} \right) \right] d\Delta V_x d\Delta V_y d\Delta V_z \right),
 \end{aligned} \tag{5}$$

где пределы интегрирования Δx , Δy , Δz , ΔV_x , ΔV_y , ΔV_z соответствуют требованиям потребителя к значению вероятности объединения РЛИ. Кроме того, в формулу введены следующие обозначения: $\sigma_{x,y,z1(2)}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) координаты $x,y,z_{1(2)}$ соответ-

ственно; Ψ_{12} – корреляционная матрица ошибок измерения параметров объекта для вектора разности параметров сравниваемых сообщений.

Итак, один из алгоритмов, который может быть применен при вводе информации в информационную систему сетевой структуры, может быть реализован на основе [5]. Перейдем к собственно сетевым структурам и типам информации.

В настоящее время возможности цифровых сетей для обмена информацией используются далеко не полностью. В частности, увеличение пропускной способности цифровых систем приводит к увеличению объема информации, передаваемой от источников на КСА и далее потребителям РЛИ, что в целом является положительным эффектом. Но РЛИ в существующих АСУ по-прежнему обрабатывается в каждом узле иерархической структуры информационного обмена (КСА). В целом качество РЛИ для конечного потребителя (задержка, накопление погрешностей при пересчетах и др.) является самым важным показателем ее применимости.

Условно разделим РЛИ на три типа: 1-й – это информация о воздушно-космических объектах от трассовых источников, 2-й – от КСА после третичной обработки, 3-й – это информация управления (кодограммы управления, донесения и т. п.). Определим, какие факторы могут обеспечить доставку потребителям РЛИ 1-го типа с наилучшим качеством (наименьшим временем доставки).

Основным достоинством схемы обмена РЛИ в существующей АСУ является то, что потоки обмена информацией 1-го, 2-го и 3-го типов совпадают с иерархической структурой управления, имеется возможность идентифицировать ответственность за предоставленную РЛИ в АСУ. При этом КСА должен иметь уровень управления, соответствующий потребителю, и они оба (КСА и потребитель) должны иметь согласованный двухсторонний протокол обмена.

Кроме того, даже при наличии каналов большой пропускной способности «транзитная» информация, передаваемая на соседние «ветви» иерархической структуры, значительно перегружает систему связи. Известно также об уязвимости подобных структур при нарушениях обмена информацией. Следовательно, существующая иерархическая структура АСУ, в силу особенностей своего построения, не может обеспечить несколько важнейших требований концепции «сетевых войн»: создание картины ситуационной осведомленности всех заинтересованных потребителей и обмен РЛИ в режиме времени, приближенном к реальному.

Таким образом, решаемая задача состоит в том, чтобы, не изменяя иерархическую структуру обмена РЛИ 2-го и 3-го типов (РЛИ после третичной обработки и информацию управления), обеспечить доставку РЛИ 1-го типа потребителям точно так же, как предполагается это сделать при построении АСУ сетевой структуры.

В качестве уровней АСУ обычно приводятся три: уровень датчиков (сенсоров) добывания РЛИ (он же – уровень исполнительных устройств), уровень средств сбора и обработки информации, уровень оператора, связанного с АСУ посредством человеко-машинного интерфейса. Рассмотрение уровней АСУ сводится к рассмотрению схем взаимодействия гетерогенных систем и подсистем, источников и потребителей информации различных уровней иерархии.

Радиолокационная система является основной информационной подсистемой АСУ и основным источником информации о воздушно-космической обстановке. Для нас представляет интерес схема построения уровней сложной системы с учетом системы связи и передачи информации. Причем добиться желаемого эффекта предполагается за счет встраивания подструктуры, построенной по сетевым принципам, в определенный уровень иерархии АСУ.

На рис. 2 показаны уровни построения существующей АСУ и уровень подструктуры, которая при их совместном функционировании изменит качество АСУ в целом.

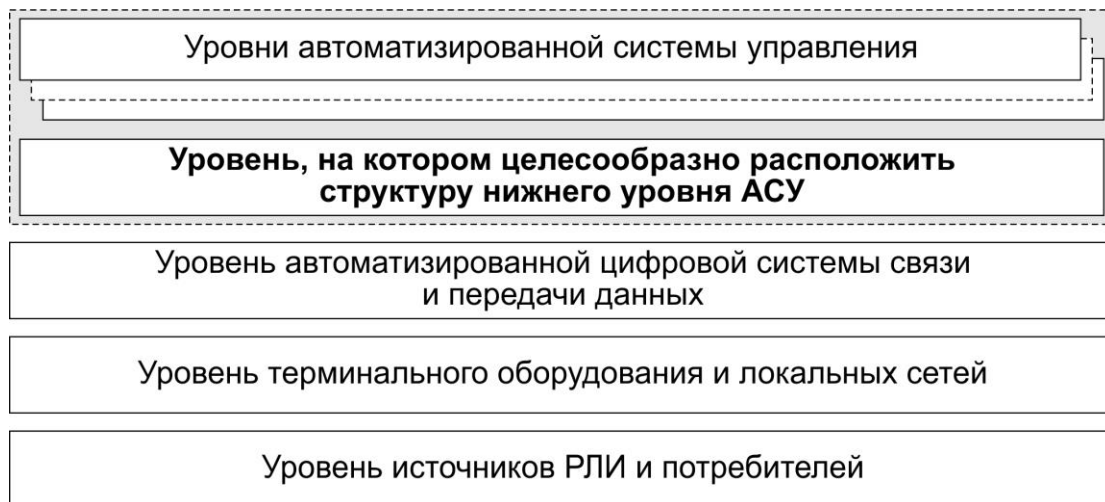


Рис. 2. Уровни автоматизированной системы управления

Новую структуру нижнего уровня АСУ (рис. 3) назовем *автоматизированной подсистемой обработки и обмена информацией (АпСООИ)*.

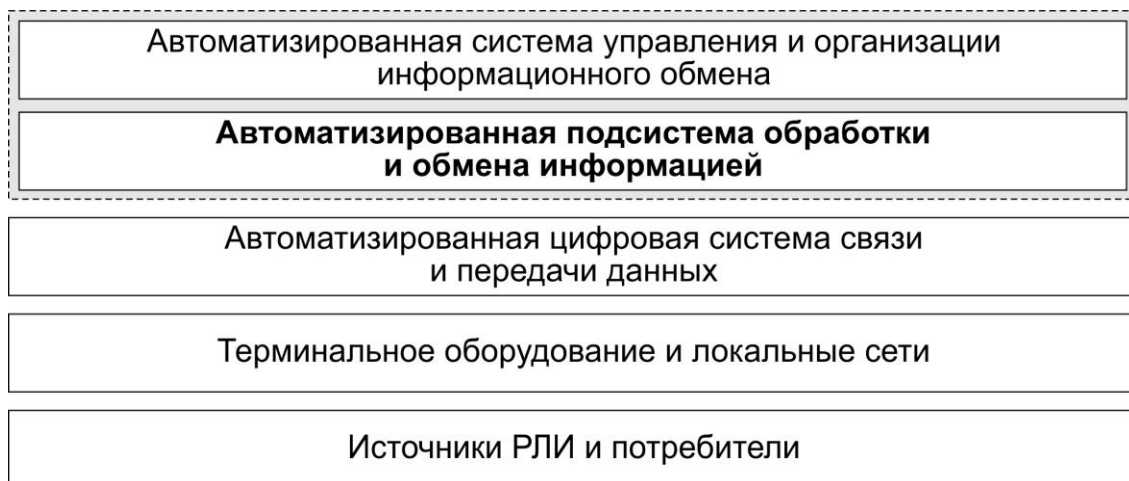


Рис. 3. Уровень автоматизированной подсистемы обработки и обмена информацией при построении АСУ сетевой структуры

Конкретизируем уровни АСУ сетевой структуры, их функции и взаимодействие. Покажем, что с новой сетевой подструктурой АСУ приобретает качества, позволяющие существенно уменьшить время прохождения РЛИ в АСУ и получить ряд синергетических эффектов.

Структура перспективной АСУ в соответствии с рис. 4 разделяется на две подструктуры. Первая подструктура остается без изменений (как в иерархической топологии). Она имеет два уровня: логический и физический. Оба они – иерархической топологии, в соответствии с принципом подчиненности и требуемыми направлениями обмена информацией. Вторая (назовем ее автоматизированной подсистемой обмена и обработки РЛИ) имеет также два уровня: логический и физический.

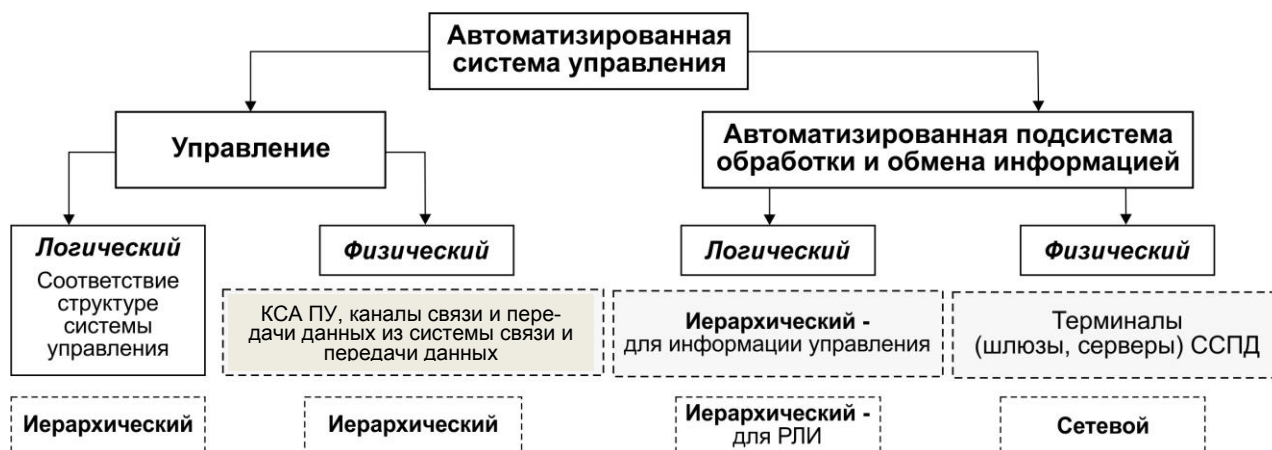


Рис. 4. Уровни перспективной АСУ сетевой структуры

Автоматизированная подсистема обработки и обмена информацией, имеющая сетевую структуру обмена и обработки РЛИ, является подсистемой АСУ второго уровня. Структура АСУ в целом остается иерархической на логическом и физическом уровнях, но приобретает новые сетевые качества за счет подсистемы типа АпСООИ. При этом АпСООИ имеет свои логический и физический уровни и сетевую топологию обоих уровней.

На логический уровень АпСООИ возложены две основные функции – обмен информацией управления в соответствии с иерархической структурой и обмен радиолокационной информацией в соответствии с сетевой структурой. Под информацией управления понимаем команды, сигналы, донесения, квитанции и т. п., а также РЛИ с признаками присвоения нового номера, воздействия (целераспределения, целеуказания и т. п.), т. е. РЛИ после обработки в КСА, направленная конкретному потребителю в соответствии с иерархической схемой управления. Эта информация в АпСООИ не обрабатывается и не объединяется с однородной РЛИ, соответствующей единому протоколу обмена, а направляется конкретному потребителю, как и прежде. Однородная РЛИ, циркулирующая в сетевой структуре АпСООИ, объединяется с информацией от источников только через точки ввода (серверы) АпСООИ. Задержка при объединении РЛИ в сетевой структуре должна быть минимальна и намного меньше времени прохождения данных по сети связи. Структура логического уровня АпСООИ в отношении РЛИ – сетевая. Существующая иерархическая структура обмена РЛИ обеспечивается в АпСООИ программно-техническим способом.

Физический уровень АпСООИ состоит из цифровых сетей передачи данных и связи, а также из узлов АпСООИ (терминалов). Терминалы являются точками ввода-вывода однородной РЛИ, своего рода «базовыми ячейками» АпСООИ. В их состав входят шлюзы и серверы исходя из выполняемых функций: шлюзы предназначены для конвертации протоколов, серверы – для обработки информации.

Структура физического уровня АпСООИ – сетевая. Полагаем, что РЛИ в АпСООИ является однородной, имеет единый протокол обмена, каждое сообщение о воздушно-космическом объекте имеет признаки времени локации, номера источника и номера точки ввода в АпСООИ. При таком построении не нарушаются функционирование АСУ существующей структуры и прохождение информации по иерархическому «стволу» АСУ в целом. В наличии лишь некоторое увеличение трафика между пунктами управления.

На логический уровень АпСООИ возлагаются следующие функции: обеспечение работы системы в существующем режиме и в режиме с подключением сетевой подструктуры; конвертация протоколов источников и потребителей в протокол АпСООИ; объединение РЛИ от разных источников, подключенных к АпСООИ; объединение РЛИ от источников, подключенных к точкам ввода, с РЛИ, циркулирующей в АпСООИ; обеспечение работы АпСООИ по принципу самоорганизации, автоматическое восстановление каналов передачи данных и маршру-

тов обхода; обеспечение сетевых правил «существования» РЛИ [уничтожение устаревшей информации; пресечение заикливания (образование петель) информации и широковещательного «шторма»; резервирование маршрутов; определение оптимальных маршрутов обмена информацией и постоянный мониторинг обходных маршрутов для своевременного восстановления].

НАПРАВЛЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ И ОБМЕНА РЛИ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Рассмотрим более подробно особенности, проблемные вопросы и те, возможно, негативные моменты, которые могут вызвать несоответствие функциональности по сравнению с существующей системой.

В настоящее время используются протоколы информационного обмена (например, *Asterix*), которые позволяют определить и закрепить информационную принадлежность каждого сообщения (когда и кем оно обработано и получено). Каждое сообщение может содержать информацию не только о конкретном источнике РЛИ и времени локации объекта, но и о шлюзе (точке ввода РЛИ в АпСООИ).

Команды (сигналы) управления в подавляющем большинстве являются непериодическими, не имеют большого информационного объема. Вместе с тем время их доведения, как правило, регламентировано, и адресат точно определен. Для их доставки в АпСООИ достаточно определить и назначить логические каналы передачи командной информации, логическая структура которых будет совпадать с иерархической структурой подчиненности. В современных цифровых информационных сетях эта задача достаточно легко выполнима.

Автоматизированная подсистема обработки и обмена информацией имеет точки ввода-вывода информации и точки обработки проходящей по сети информации, получившие название «терминалы обработки РЛИ». Напомним, что терминалы состоят из шлюзов и серверов. На серверах происходит объединение информации от нескольких источников между собой и объединенной РЛИ с информацией, находящейся в сети. Шлюзы осуществляют конвертацию протоколов для обеспечения однородности РЛИ в сетевой структуре АпСООИ при обработке от источников и преобразования однородной информации АпСООИ в протоколы потребителей и выдачи потребителям.

Терминалы подключаются к одному или нескольким источникам и/или потребителям, а также обеспечивают обмен информацией АпСООИ. Это не позволяет эффективно применить известные алгоритмы классической обработки (объединения) РЛИ, так как они разработаны для других условий функционирования и другого вида структуры АСУ (иерархического), с последовательной обработкой РЛИ в каждом узле структуры. Кроме того, алгоритмы для выдачи РЛИ различного вида потребителям, подключенным к АпСООИ, на сегодняшний день не разработаны.

В целом отличие процесса обработки РЛИ в сетевой структуре состоит в переносе части функций обработки информации, реализуемых на КСА, в сетевую структуру АпСООИ. Подобное решение не противоречит теоретическому подходу построения распределенных сетей [7]. Дальнейшее развитие АпСООИ имеет предпосылки перехода от реализации автоматизированных к автоматическим функциям сбора, обработки и доставки информации потребителям.

Остается еще проблема перенасыщения АпСООИ устаревшей информацией, заикливания кодограмм РЛИ и т. п. Для решения таких задач требуется разработка новых алгоритмов более высокого (сетевого) уровня, которые будут управлять обменом информацией в АпСООИ [8]. Для этого, на наш взгляд, необходимо поэтапно провести ряд мероприятий, аналогичных проведенных за рубежом [9, 10], но с учетом специфики построения и функционирования существующих в ВС РФ автоматизированных систем управления:

Обработанную на КСА РЛИ направлять по цифровым каналам АЦСС точно так же, как если бы она циркулировала в иерархической структуре (РЛИ 2-го и 3-го типов), а РЛИ 1-го типа от источников параллельно направлять в АЦСС, через точки ввода, оснащенные специальными устройствами (терминалами обработки РЛИ). Применяемые в настоящее время алгоритмы третичной обработки для ввода РЛИ 1-го типа в АЦСС не подойдут, так как имеют малое время задержки при обработке только кодограмм с признаковой информацией. В данном случае необходима разработка алгоритмов третичной обработки (отождествления), адаптированных под требования ввода РЛИ 1-го типа в сетевую структуру. При этом РЛИ 2-го и 3-го типов должна быть направлена строго на определенных абонентов, т. е. структура ее прохождения, хотя и использует сетевую среду, должна быть иерархической.

5-й этап. Из сетевого принципа «публикации» и «заявок» на данные, поступающих в сеть или из нее, можно сделать вывод о том, что для поиска требуемых данных в сети и предоставления их потребителям необходимо создание специальных сетевых приложений, а также программного обеспечения (ПО), получившего название «ПО промежуточного слоя» [11]. Его реализация производит своеобразное «отделение» данных от источников и использование их в качестве самостоятельной сущности, находящейся в сети.

Важно отметить, что с точки зрения существующих КСА при подключении источников РЛИ к АпСООИ (АСУ сетевой структуры) не требуется специальных доработок ПО, стыков, протоколов и интерфейсов. Единственное, что следует сделать на переходный период функционирования существующих КСА, источников РЛИ и АпСООИ, – это включить дополнительный вход/выход сопряжения КСА и источников РЛИ к АпСООИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышесказанного следует, что для построения перспективной АСУ сетевой структуры необходимо включить (в качестве промежуточного звена между существующей АСУ и АЦСС) автоматизированную (а в перспективе – автоматическую) подсистему обработки и обмена информацией. Подсистема адаптирует РЛИ и информацию управления, передаваемые от существующей АСУ к потребителям и от источников РЛИ в существующую АСУ.

Таким образом, построение информационной подсистемы АСУ сетевой структуры последовательно предопределяет необходимость разработки:

- алгоритмов объединения РЛИ при вводе ее в информационную подсистему;
- алгоритмов обмена РЛИ в сети;
- алгоритмов доставки ее потребителям;
- варианта построения информационной системы сетевой структуры.

В дальнейшем следует разработать технические требования к терминалам мультирадарной обработки РЛИ, а также построить фрагмент подсистемы АСУ и АпСООИ в целом.

Подобная подсистема является вариантом построения перспективной информационной системы сетевой структуры. В ней реализуется возможность функционирования в период перехода от традиционных иерархических АСУ к сетевым информационным системам в востребованных областях применения.

Список используемых источников

1. Кузьмин С.З. Основы цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.
2. Конторов Д.С., Голубев-Новожиллов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. – М.: Сов. радио, 1971. – 368 с.

3. Multi-radar tracker (MRT) [Northropgrumman]. – URL: http://www.es.northropgrumman.com/solutions/multiradartracker/assets/Multi-Radar_Tracker-MRT.pdf (дата обращения: 19.12.2011).
4. Пальгуев Д.А., Шентябин А.Н. К вопросу оценки вероятности объединения радиолокационной информации при третичной обработке в сетевых структурах // Радиопромышленность: журн. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 32–41.
5. Способ обработки радиолокационной информации в сетевой информационной структуре автоматизированной системы управления: пат. 2461843 РФ, МПК G01S 13/91 (2006.01). / Пальгуев Д.А., Таныгин А.А.; заявитель и патентообладатель Нижегородский научно-исслед. ин-т радиотехники. – № 2011117435/07, заявл. 29.04.2011; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.
6. Автоматизированная система передачи радиолокационной информации: пат.102269 РФ, МПК G01S 13/91 (2006.01) / Пальгуев Д.А., Таныгин А.А.; заявитель и патентообладатель Нижегородский научно-исслед. ин-т радиотехники. – № 2010137263/09, заявл. 07.09.2010; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5.
7. Таненбаум Э., М. ван Стеен Распределенные системы. Принципы и парадигмы. – СПб. : Питер, 2003 – 877 с.
8. Способ сетевой обработки информации в автоматизированной системе обработки и обмена радиолокационной информацией: пат. 2645154 РФ, МПК G01S 13/91 (2006.01) / Пальгуев Д.А., Фитасов А.В.; заявитель и патентообладатель Нижегородский научно-исслед. ин-т радиотехники. – № 2016144929, заявл. 15.11.2016; опубл. 16.11.2018, Бюл. № 5.
9. Чельцов Б., Замалудинов И., Волков С. Борьба за информацию на основе информации // Воздушно-Космическая Оборона. – 2009. – № 3 (46).
10. Хант, Гордон Real-Time Innovations. Реализация систем для ведения «сетевых» (Net-Centric) войн, ВКТ для оборонных приложений: компоненты и системы // МКА мир ВК1. – 2007. – № 6.
11. ИВК. – URL: <http://www.ivk.ru/> (дата обращения: 10.11.2008).

И.И. Долгов;
А.В. Панкратов,
доктор техн. наук;
К.А. Эсаулов,
кандидат техн. наук

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ПРИОРИТЕТА РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ

В данной статье представлен алгоритм восстановления информационно-вычислительного комплекса сложных технических систем с учетом приоритета решаемых задач. Проведен сравнительный анализ восстановления информационно-вычислительного комплекса сложных технических систем без учета приоритета, но с учетом приоритета решаемых задач. Описана аппаратная реализация предложенного алгоритма восстановления.

Ключевые слова: информационно-вычислительный комплекс, алгоритм восстановления, живучесть, надежность, приоритет восстановления.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе развития современных систем управления ключевым элементом является информационно-вычислительный комплекс (ИВК), который решает задачи сбора, обработки и передачи данных, контроля и диагностики всех подсистем и управления в целом. Причем все эти функции должны выполняться в реальном масштабе времени.

Таким образом, ИВК – это неотъемлемая часть автоматизированных управляющих сложных технических систем (СТС), например, таких как технический комплекс энергетической промышленности, летательных аппаратов и других объектов [6]. Среди обозначенных объектов выделяется класс систем, критичных к отказу, т. е. возникновение отказов таких систем может привести к гибели людей, к возникновению больших экономических и экологических проблем. Минимизировать последствия отказов таких систем возможно за счет оперативности восстановления ИВК. Поэтому при эксплуатации сложных технических систем становится актуальной разработка алгоритма восстановления ИВК с учетом приоритета решаемых задач.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Живучесть зависит от работоспособности, структуры и восстанавливаемости системы, времени выполнения задачи, а также от воздействий внешних факторов и их кратности [4]. Одной из потенциальных проблем применения ИВК СТС является организация функционирования объекта в условиях воздействия различных факторов. В этом случае следует обеспечить максимальную живучесть ИВК СТС при обеспечении требований по выполнению всех целевых функций в условиях ограничений на ресурсы и время решения задач [5]. Решение указанной задачи связано с необходимостью восстановления вычислительных средств после воздействия внешних факторов и перераспределения вычислительных ресурсов для достижения высокой живучести ИВК СТС. Поэтому появляется настоятельная потребность в разработке алгоритма восстановления ИВК СТС с учетом приоритета решаемых задач.

Пусть дано:

X – множество компонентов ИВК СТС $x_i, i = 1 \dots n$, $\begin{cases} x_i = 1, \text{ если исправен} \\ x_i = 0, \text{ если неисправен} \end{cases}$;

$T_{\text{восст}}$ – вектор, который описывает множество времен восстановления компонентов ИВК СТС;

t_i – время восстановления компонента x_i ;

F – вектор, который описывает набор функций, решаемых ИВК СТС размерностью j ;

W – «вес» системы ИВК СТС;

Z – матрица, в которой задана взаимосвязь x_i при выполнении j -функции.

Найти алгоритм восстановления (A) отказавших компонентов ИВК СТС, так чтобы

$$A: S_{\text{восст}}^* = \arg \min T_{\text{восст}}(S_{\text{восст}}).$$

где $S_{\text{восст}}$ – возможные варианты восстановления.

Таким образом, целью работы является нахождение алгоритма восстановления ИВК СТС, что позволит минимизировать последствия отказа ИВК СТС в условиях деструктивного воздействия.

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРИОРИТЕТА РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ ИВК

Традиционные методы анализа и оценки количественных и качественных характеристик однородных изделий не удовлетворяют потребности в оценке качества современных ИВК. В работе [1], в комментариях к термину надежность, говорится «...для объектов, которые являются потенциальным источником опасности, важными понятиями являются «безопасность» и «живучесть»...». Понятие «живучесть» занимает «пограничное» место между понятиями «надежность» и «безопасность». Под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов. Примером служит сохранение несущей способности элементами конструкции при возникновении в них усталостных трещин, размеры которых не превышают заданных значений. Термин живучесть соответствует международному термину *fail-safe concept*. В международных документах ISO (*International Organization for Standardization* – международная организация по стандартизации) сочетание свойств безотказности и ремонтпригодности с учетом системы технического обслуживания и ремонта называют готовностью объекта (*availability*).

В работе авторов [2] отмечается, что живучая вычислительная система с необходимостью обладает устойчивостью к отказам. Отличие живучести от отказоустойчивости заключается в том, что в отказоустойчивой системе при отказе происходит восстановление заданных структуры и поведения, а в живучей – возможна деградация относительно менее существенных функций, при которой обеспечивается заданная (требуемая) эффективность выполнения целевой функции [3].

Следовательно, отличительной чертой живучести является допустимость некоторой деградации и частичного разрушения системы.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что под живучестью ИВК СТС подразумевается свойство системы адаптироваться к новой ситуации и противостоять

негативным воздействиям, выполняя цель функционирования за счет соответствующего изменения своей структуры и поведения. Свойство живучести предполагает способность системы функционировать при наличии отказов и их накоплении.

Одним из показателей живучести ИВК является скорость деградации – количество потерянных функций в единицу времени. Способность к восстановлению может характеризовать показатель скорости восстановления – количество восстановленных функций в единицу времени. Важной характеристикой ИВК является «вес» системы, оценивающийся количеством или долей задач, которые ИВК способен выполнить, с учетом их приоритета.

Рассмотрим пример ИВК СТС, представленного на рис. 1. Пусть ИВК СТС решает определенный набор функций F , где $n = 10$. Компоненты ИВК СТС неодинаковы по своему значению (приоритету) с точки зрения выполняемых ими функций [7]. Составим логическую зависимость, характеризующую возможность выполнения функций в зависимости от состояния компонента ИВК СТС.

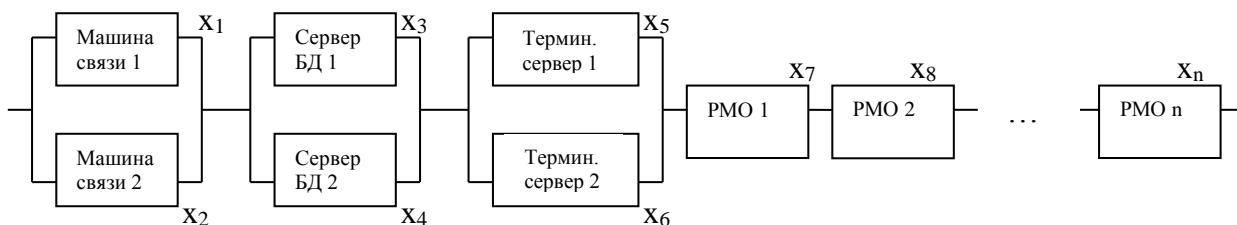


Рис. 1. Пример ИВК СТС, где БД – база данных, РМО – рабочее место оператора

Пусть $F = 10$,

$$f_1 = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_3 \vee x_4) \cdot (x_5 \vee x_6) \cdot x_7.$$

То есть функция f_1 может быть осуществлена ИВК СТС, если исправна машина связи 1 (x_1) или машина связи 2 (x_2), и исправен сервер БД 1 (x_3) или сервер БД 2 (x_4), и исправен терминальный сервер 1 (x_5) или терминальный сервер 2 (x_6), и исправно РМО 1 (x_7). Тогда

$$f_2 = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_3 \vee x_4) \cdot (x_5 \vee x_6) \cdot x_8,$$

$$f_3 = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_3 \vee x_4) \cdot (x_5 \vee x_6) \cdot x_9,$$

$$f_4 = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_3 \vee x_4) \cdot (x_5 \vee x_6) \cdot x_{10},$$

$$f_5 = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_3 \vee x_4),$$

$$f_7 = (x_3 \vee x_4) \cdot (x_5 \vee x_6) \cdot x_8,$$

$$f_8 = (x_3 \vee x_4) \cdot (x_5 \vee x_6) \cdot x_9,$$

$$f_9 = (x_3 \vee x_4) \cdot (x_5 \vee x_6) \cdot x_{10},$$

$$f_{10} = x_3 \vee x_4.$$

Можно составить матрицу, где $z_{ij} = 1$, если при выполнении j -й функции используется i -й компонент, например:

$$Z = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Пусть произошло воздействие на ИВК СТС, в результате которого отказала часть компонентов. Получим вектор $//X//$ текущего состояния ИВК СТС.

$X = | 1 0 0 0 1 1 0 0 1 1 |$, т. е. отказала машина связи 2, сервер БД 1, сервер БД 2, РМО 1, РМО 2.

Можно вычислить вектор F , компонентами которого характеризуют способность выполнить ИВК функцию, т. е. $f_j = 1$, если j -я функция может быть выполнена, $f_j = 0$, если j -я функция выполнена быть не может.

Например: $f_1 = (1 \vee 0) \cdot (0 \vee 0) \cdot (1 \vee 1) \cdot 0 = 0$. Таким образом, получаем

$$F = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Одним из показателей живучести является сохранение некоторого «веса» системы:

$$W = \sum_i \delta_i \cdot f_i, \text{ «вес» в данном случае равен } 0.$$

Возможно несколько вариантов восстановления компонентов ИВК СТС:

- I. В произвольной последовательности.
- II. От более сложных компонентов (серверов) к более простым (РМО).
- III. С учетом приоритета решаемых задач.

Пусть время восстановления компонентов представлено в виде вектора T , где t_i – время восстановления i -го компонента. Получим:

$$T = |15 \ 15 \ 25 \ 25 \ 20 \ 20 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10|;$$

$$t_{\text{вос}} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot (1 - x_i);$$

$$t_{\text{вос}} = 15 \cdot (1-1) + 15 \cdot (1-0) + 25 \cdot (1-0) + 25 \cdot (1-1) + 20 \cdot (1-1) + 20 \cdot (1-0) + 10 \cdot (1-0) + 10 \cdot (1-0) + 10 \cdot (1-1) + 10 \cdot (1-1) = 85.$$

Таким образом, можно вычислить общее время восстановления – 85 единиц времени.

I способ восстановления. Пусть восстановление происходит в произвольном порядке: РМО 2, РМО 1, машина связи 2, сервер БД 1, сервер БД 2.

II способ восстановления. Пусть будут восстановлены сервер БД 1, сервер БД 2, машина связи (МС) 2, РМО 1, РМО 2.

III способ восстановления. Приоритеты компонента ИВК СТС можно рассчитать по тому количеству функций, в выполнении которых они задействованы. Естественно, что резервный компонент обладает таким же приоритетом, что и основной компонент. Поэтому резервные элементы необходимо поставить во 2-ю очередь, но с учетом приоритета. Блок-схема предлагаемого алгоритма восстановления представлена на рис. 2.

Диаграмма восстановления компонентов ИВК СТС при различных вариантах восстановления представлена на рис. 3, где по оси X будет откладываться время, а по оси Y – количество восстановительных функций.

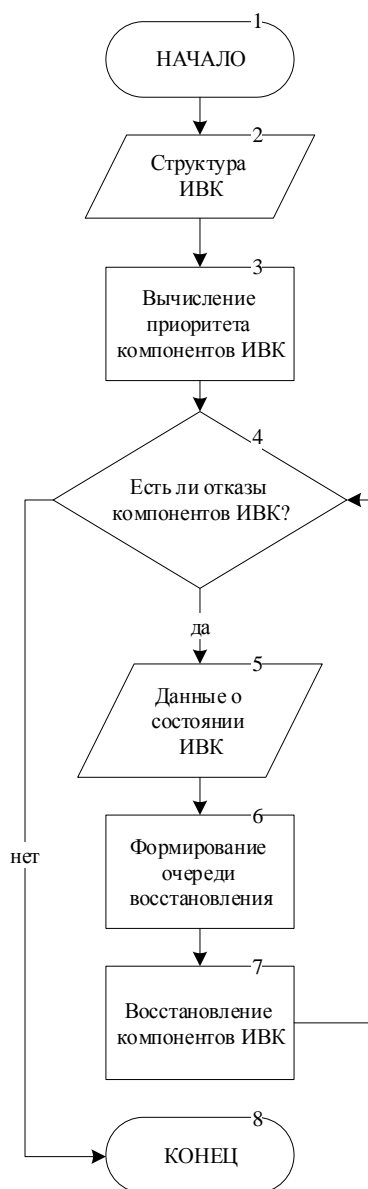


Рис. 2. Блок-схема предлагаемого алгоритма восстановления

Приоритет компонента можно рассчитать из матрицы Z , где Pr_i – приоритет i -го компонента, который выражается как

$$Pr_i = \sum_{j=1}^n z_{ij}.$$

В результате получим вектор приоритетов компонентов ИВК СТС:

$$Pr = | 5 \ 5 \ 10 \ 10 \ 8 \ 8 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 |.$$

Отсюда становится очевидным, что с учетом X' порядок восстановления будет следующим: сервер БД 1, РМО 1, РМО 2, сервер БД 2, МС 2.

Кроме того, существует показатель – минимальный (критический) набор выполняемых функций, при котором считается, что ИВК СТС сохраняет живучесть. Естественно, что в первую очередь необходимо восстановить функции, которые входят в этот критический набор функций. Из вектора Pr видно, что РМО 1, РМО 2 обладают равным приоритетом. От исправности РМО 1 зависит доступность функций f_1 и f_6 , а от РМО 2 – доступность функций f_2 и f_7 .

Таким образом, можно повысить приоритет более важных компонентов, расставив соответствующие «веса» задачам δ_i , при условии

$$\sum_{i=1}^F \delta_i = 1.$$

Соответственно, приоритет компонента будет рассчитываться следующим образом:

$$Pr_i = \sum_{j=1}^n \delta_i \cdot z_{ij}.$$

Может оказаться, что функция f_2 принадлежит к критическому набору функции, а f_1 , f_6 , f_7 не принадлежат. Тогда приоритет компонента РМО 2 будет выше РМО 1 и, следовательно, изменится порядок восстановления (РМО 1 и РМО 2 поменяются местами), чтобы за кратчайшее время обеспечить доступность критического набора функций.

Кроме того, необходимо учитывать особенность функционирования объекта, т. е. учитывать технологический цикл, выполняемый объектом. Технологический цикл предполагает, что функции взаимосвязаны и выполнение одних невозможно без получения результатов выполнения других функций. Другими словами, при формировании очереди восстановления необходимо учесть, в каком состоянии находился ИВК СТС в момент деструктивного воздействия. Необходимо учесть, какие функции были выполнены, а какие – нет, поскольку для сокращения общего времени решения функциональной задачи объекту выгоднее восстановить те функции, которые необходимы для дальнейшего решения функциональной задачи. А функции, которые уже выполнили свою часть задачи, можно восстановить во 2-ю очередь, поскольку они понадобятся при выполнении следующего технологического цикла.

Выполнение технологического цикла можно учесть вектором V , где $v_j, j = \overline{1, F}$, соответствует функции в цикле. Если функция в цикле выполнена, то $v_j = 0$, если еще не выполнена, то $v_j = 1$. Таким образом, приоритет будет вычисляться по формуле

$$Pr_i = \sum_{j=1}^n \delta_i \cdot z_{ij} \cdot v_j.$$

Сравнение диаграмм восстановления функций показывает, что в случае I все функции были восстановлены к $t = 60$, в случае II – к $t = 85$, а в случае III – $t = 45$ (рис. 3). Кроме того, в случае III при вычислении приоритетов можно учесть такие важные показатели, как «вес»

системы, этап технологического цикла, также он позволяет в кратчайшее время восстановить критический (минимальный) набор функций.

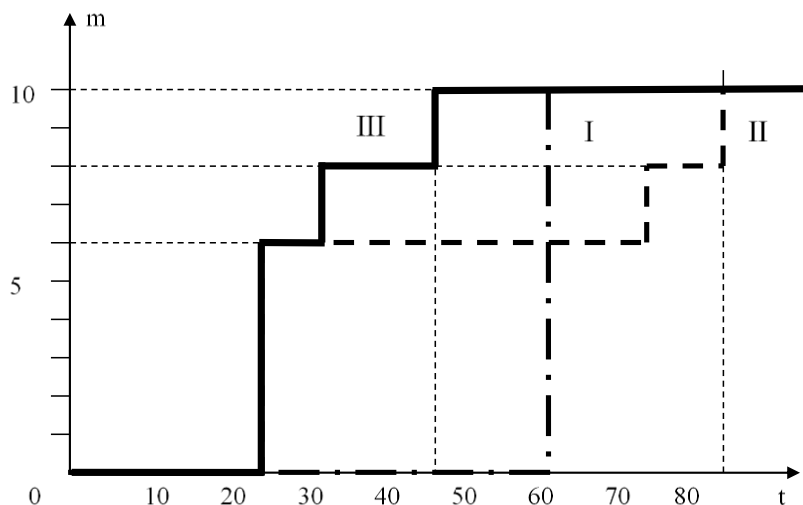


Рис. 3. Диаграмма восстановления компонентов ИВК СТС при различных вариантах восстановления

Данный алгоритм может быть реализован как в виде программы (системы помощи принятия решения) [8, 9], так и в виде устройства формирования очереди восстановления на основе устройства приоритетного обслуживания заявок [10–15].

Для того чтобы с помощью устройства приоритетного обслуживания заявок получить устройство формирования очереди восстановления, необходимо провести предварительную работу. Вычислить приоритеты компонентов ИВК СТС. Устройство приоритетного обслуживания заявок в каждом цикле работы выделяет заявку с наивысшим приоритетом, соответственно, в составе устройства формирования очереди восстановления оно будет выделять номер компонента, который необходимо восстановить в первую очередь. Исходя из рассмотренного выше примера вычислено, что по убыванию приоритета компоненты ИВК СТС расположены в следующем порядке: сервер БД 1 (резерв – сервер БД 2), терминальный сервер 1 (резерв – терминальный сервер 2), машина связи 1 (резерв – машина связи 2), РМО 1, РМО 2, РМО 3, РМО 4. Будем считать приоритет рабочих мест операторов одинаковым или с учетом выполняемых задач можно изменить их приоритет.

Таким образом, понадобится 10-разрядный регистр запроса (рис. 4), где младший разряд будет соответствовать заявке с наивысшим приоритетом.

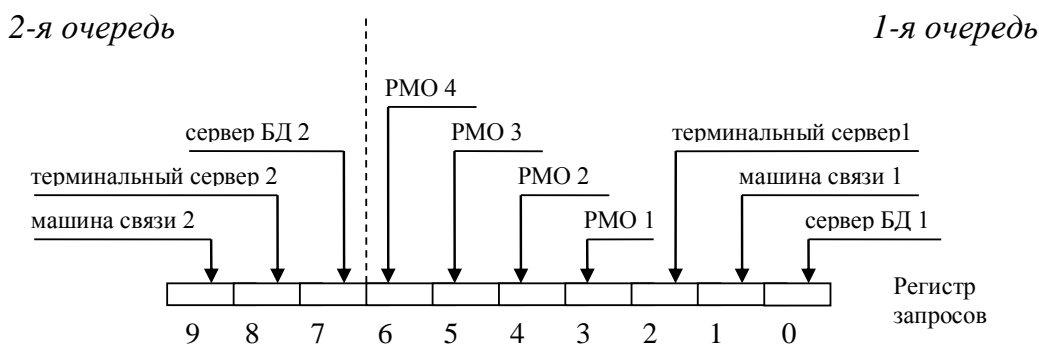


Рис. 4. 10-разрядный регистр запроса

Состояние ИВК СТС характеризуют компоненты вектора $\|X\|$, его можно хранить в регистре той же разрядности, что и регистр запросов. Инверсный сигнал с выходов регистра, содержащего компоненты вектора $\|X\|$, будет поступать на входы регистра запросов. Каждый разряд регистра, содержащего компоненты вектора $\|X\|$, сигнализирует о состоянии соответствующего компонента (рис. 5).

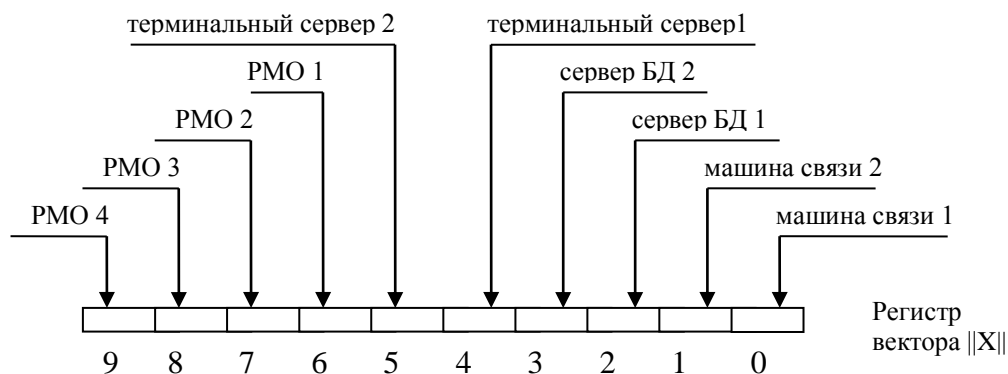


Рис. 5. Пример, в котором каждый разряд регистра сигнализирует о состоянии соответствующего компонента $\|X\|$

Кроме того, «1» в соответствующем разряде сигнализирует о том, что компонент исправен и, значит, «0» – об отказе компонента. Предлагается объединить выходы регистра, содержащего компоненты вектора $\|X\|$, со входами регистра запросов. Пример объединения представлен на рис. 6.

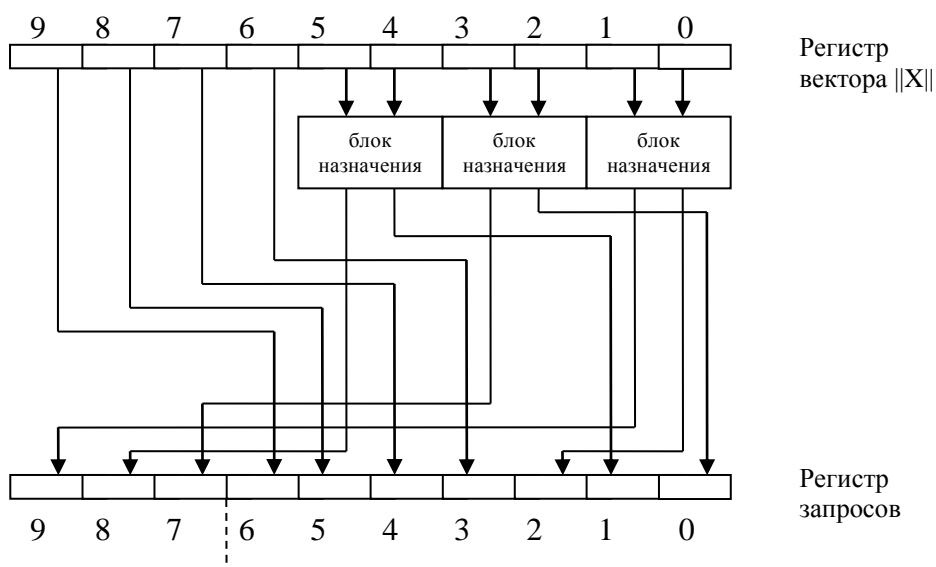


Рис. 6. Объединение выходов регистра

Выше было замечено, что и основной, и резервный компонент ИВК СТС обладают равным приоритетом, что необходимо учитывать при формировании очереди восстановления [16]. То есть, если отказали оба компонента, то необходимо восстановить основной элемент в 1-ю очередь, резервный – во 2-ю очередь. Если отказал основной, но исправен резервный, то заявка о восстановлении данного типа компонента должна попасть во 2-ю очередь. Аналогично при отказе резервного компонента, но исправности основного.

Естественно, что при исправности и резервного, и основного компонентов заявок на их восстановление вообще не должно быть.

Если $x_i = 0$ сигнализирует об отказе i -го компонента, $y_j(x_1 \dots x_n) = 1$ сигнализирует о необходимости восстановления компонента в j -ю очередь. Обозначим входные сигналы x_1 (от основного компонента), x_2 (от резервного компонента); выходные y_1 (восстановление в 1-ю очередь), y_2 (восстановление во 2-ю очередь).

Необходимо синтезировать блок, преобразующий входные сигналы в соответствующие выходные сигналы. Составим для этого соответствующую таблицу истинности [17]:

| x_1 | x_2 | y_1 | y_2 |
|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |

Из таблицы видно, что y_1 принимает единичное значение, когда оба аргумента принимают нулевые значения. Такая функция называется функцией Даггера или «стрелкой Пирса», а соответствующая операция – операцией Пирса (\downarrow) или операцией «ИЛИ-НЕ»:

$$y_1 = x_1 \downarrow x_2 = \overline{x_1 \vee x_2}.$$

Кроме того, из таблицы видно, что y_2 принимает нулевое значение тогда, когда оба аргумента принимают единичные значения. Такая функция называется функцией Шеффера, а соответствующая ей операция – операцией «штрих Шеффера» (\uparrow) или операцией «И-НЕ»:

$$y_2 = x_1 \uparrow x_2 = \overline{x_1 \cdot x_2}.$$

Существуют логические элементы, реализующие соответствующие логические операции «ИЛИ-НЕ» и «И-НЕ». На их основе можно построить блок назначения, схема которого представлена на рис. 7.

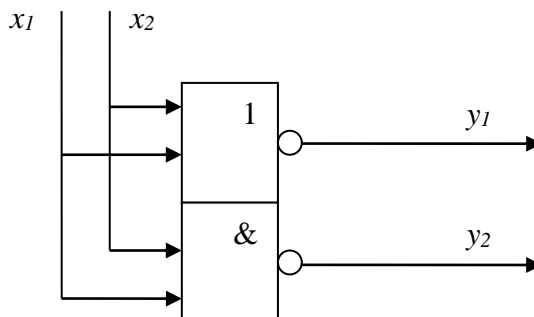


Рис. 7. Блок назначения

Если взять $X' = |1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1|$ из примера, рассмотренного выше, то регистр, содержащий компоненты вектора $//X//$, и регистр запросов будут иметь соответствующие заполнения (рис. 8).

Для формирования очереди восстановления понадобится пять циклов работы устройства приоритетного обслуживания запросов, что соответствует количеству единиц в регистре, содержащем компоненты вектора $\|X\|$, т. е. количеству отказавших компонентов.

При использовании предложенного устройства с заданным заполнением регистра будет сформирована очередь восстановления: сервер БД 1, РМО 1, РМО 2, сервер БД 2, МС 2, что совпадает с последовательностью, полученной в случае использования алгоритма восстановления компонентов ИВК СТС с учетом их приоритета. С помощью регистра ограничения в устройстве приоритетного обслуживания заявок с ограничением нахождения заявки и возможностью блокировки заявок определенного приоритета можно учесть этап технологического цикла.

Выходы устройства приоритетного обслуживания заявок должны быть соединены с запоминающим устройством, хранящим текущую очередь восстановления. Если восстанавливаемых групп более одной, то возможно формирование расписания восстановления компонентов.

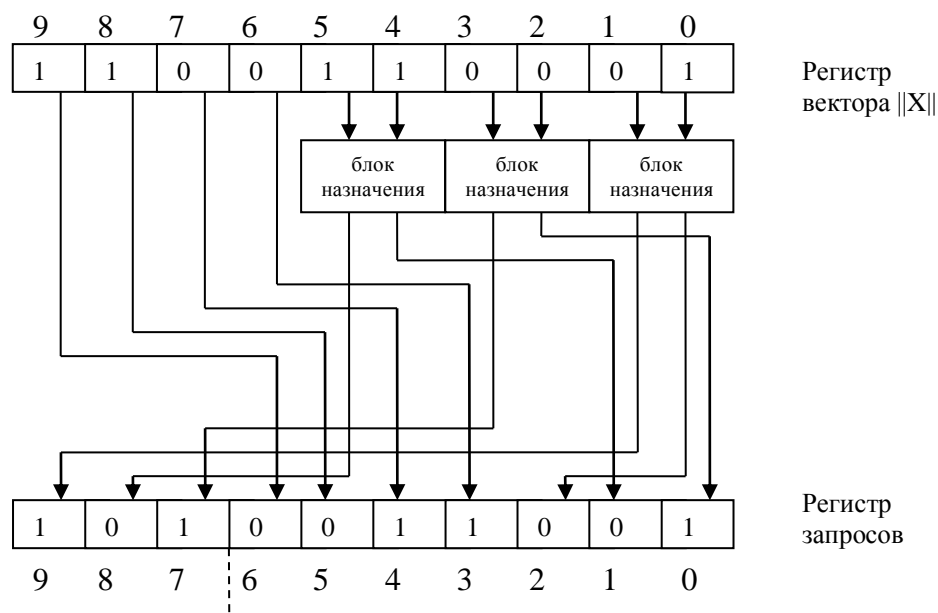


Рис. 8. Регистр запросов

Преимущество аппаратной реализации алгоритма восстановления заключается в том, что нет необходимости в выделении отдельного рабочего места оператора или специальной программы. То есть использование данного алгоритма, реализованного в виде устройства, не снижает общей производительности ИВК СТС. При программной реализации необходимо, чтобы на каждом компоненте ИВК СТС работала программа-агент и передавала информацию о состоянии компонента на рабочее место оператора, на котором функционирует программа-менеджер. Следовательно, кроме того, что используется дополнительное программное обеспечение, увеличивается трафик сообщений, вследствие необходимости с определенной периодичностью собирать информацию о состоянии компонентов ИВК СТС.

При аппаратной реализации достаточно, чтобы на компоненте ИВК СТС работала только программа-агент, которая с определенной периодичностью посылала бы сигнал о состоянии компонента. Наличие сигнала говорит об исправности компонента, отсутствие сигнала через определенный промежуток времени – о том, что компонент отказал. Кроме того, нет необходимости передавать этот сигнал через сеть, чтобы не повышать трафик, сигнал можно получать со свободного порта РМО (например, СОМ-порта).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный алгоритм восстановления ИВК СТС с учетом приоритета решаемых задач состоит из расчета приоритета решаемых задач, составления очереди восстановления компонентов. В рассмотренном примере продемонстрирован эффект от применения предложенного алгоритма восстановления.

Алгоритм восстановления ИВК СТС с учетом приоритета решаемых задач дает скорейшее восстановление функций во времени: по сравнению со способом I – на 25%, по сравнению со способом II – на 47% из примера. Он позволяет учесть такие важные показатели живучести, как критический набор функций, показатель сохранения некоторого «веса» системы, кроме того, – учесть этапы технологического цикла критического объекта (см. рис. 3 – III результат применения алгоритма восстановления с учетом приоритета решаемых задач).

Дальнейшее совершенствование алгоритма связано с учетом количества запасных инструментов и принадлежностей, что также накладывает свои ограничения, в том числе на возможность полного восстановления ИВК СТС. Кроме того, необходимо учесть возможности личного состава, эксплуатирующего ИВК СТС, по формированию групп восстановления, что позволит распараллелить процесс и тем самым сократить время восстановления.

Список используемых источников

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. – М.: Стандартинформ, 2015. – 28 с.
2. Додонов А.Г., Кузнецова М.Г., Горбачик Е.С. Об организации последовательно-параллельных вычислительных структур повышенной живучести // Электронное моделирование. – 1988. – Т.10, № 4. – С.24–28.
3. Долгов И.И., Панкратов А.В., Панкрушин В.Н. Метод оценки отказоустойчивости вычислительного модуля космического аппарата // Авиакосмическое приборостроение. – 2019. – № 9. – С. 29–41.
4. Басыров А.Г., Эсаулов К.А. Метод обеспечения живучести информационно-вычислительных систем // Сборник алгоритмов и программ ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2009. – № 28. – С. 20–25.
5. Харченко В.С., Лысенко И.В., Мельников В.А. Оценка и обеспечение живучести информационно-вычислительных и управляющих систем технических комплексов критического значения // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – №1. – С. 64–80.
6. Покровский Б.А. Космос начинается на Земле. – М.: Патриот, 1996. – 491 с.
7. Рябинин И.А., Панферов Ю.М. Определение «веса» и «значимости» отдельных элементов при оценке надежности сложных систем // Известия Академии Наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1987. – № 6. – С. 30–39.
8. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
9. Хлопкова О.А. Методы и алгоритмы интеллектуализации принятия решений в условиях неопределенности на базе аппарата нейронных сетей и эволюционного моделирования: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 157 с.
10. Устройство приоритетного обслуживания запросов: пат. 2216768 Российская Федерация, МПК G 06 F 9/46 / Молчанов О.Е., Петухов В.А., Степанов П.В., Эсаулов К.А.; заявитель и патентообладатель Военный инженерно-космический университет им. А.Ф. Можайского. – № 2001121619/09, заявл. 31.07.01; опубл. 20.11.03, Бюл. № 21. – 6 с.
11. Устройство приоритетного обслуживания запросов: пат. 2223536 Российская Федерация, МПК G 06 F 9/46. / Петухов В.А., Молчанов О.Е., Эсаулов К.А.; заявитель и патентообладатель Военный инженерно-космический университет имени А.Ф. Можайского. – № 2002113929/09, заявл. 28.05.02; опубл. 20.02.04, Бюл. № 5. – 5 с.

12. Устройство приоритетного обслуживания запросов: пат. 2224281 Российская Федерация, МПК G 06 F 9/46. / Петухов В.А., Молчанов О.Е., Эсаулов К.А., Трудов Ю.В.; заявитель и патентообладатель Военный инженерно-космический университет имени А.Ф. Можайского. – № 2002116405/09, заявл. 18.06.02; опубл. 20.02.04, Бюл. № 5. – 6 с.

13. Устройство приоритетного обслуживания запросов: пат. 2230355 Российская Федерация, МПК G 06 F 9/46 / Петухов В.А., Молчанов О.Е., Эсаулов К.А.; заявитель и патентообладатель Военный инженерно-космический университет имени А.Ф. Можайского. – № 2002123423/09, заявл. 30.08.02; опубл. 10.06.04, Бюл. № 7. – 6 с.

14. Устройство приоритетного доступа с ограничением нахождения заявки: пат. 2251145 Российская Федерация, МПК G 06 F 9/46, 13/14, 13/18 / Петухов В.А., Молчанов О.Е., Эсаулов К.А., Фаррахов Д.А.; заявитель и патентообладатель Военный инженерно-космический университет имени А.Ф. Можайского. – № 2003118631/09, заявл. 20.06.03; опубл. 27.06.05, Бюл. № 12. – 5 с.

15. Устройство приоритетного обслуживания заявок с ограничением нахождения заявки и возможностью блокировки заявок определенного приоритета: пат. 2359318 Российская Федерация, МПК G 06 F 9/46, 13/14, 13/18 / Петухов В.А., Молчанов О.Е., Ипатов Д.И., Булавин А.В., Эсаулов К.А., Карпов А.О.; заявитель и патентообладатель Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. – № 2007148276/09, заявл. 24.12.07; опубл. 20.06.09, Бюл. № 17. – 6 с.

16. Эсаулов К.А. Методика оценивания живучести информационно-вычислительной сети НАКУ // Сборник трудов конференции РНИИ КП. – М.: РНИИ КП. 2009. – С. 179–199.

17. Дискретная математика / О.Е. Молчанов, В.В. Кузнецов, К.А. Эсаулов, А.Г. Басыров. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 89 с.

П.В. Калабин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ РАЗВОРОТА МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В работе изложено решение научной задачи синтеза оптимального по быстродействию управления программным разворотом осесимметричного малого космического аппарата с двигателями-маховиками. Задача решена применительно к одному каналу управления ориентацией космического аппарата. Приведены аналитические выражения, позволяющие выразить в явном виде зависимость времени переключения знака управляющего момента двигателя-маховика и время окончания программного разворота от параметров двигателя-маховика. Показано, что для повышения быстродействия программного разворота необходимо использовать двигатели с более массивными маховиками, но с меньшей механической постоянной электродвигателя. Данные исследования могут быть полезны при выборе двигателей-маховиков для малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли или орбитальных объектов.

Ключевые слова: малый космический аппарат, двигатель-маховик, оптимальный разворот, закон управления.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из тенденций развития космической техники последних лет состоит в создании малых и сверхмалых космических аппаратов, которые должны обеспечить сокращение временных и финансовых затрат на разработку и пополнение орбитальной группировки [1, 2]. Малые космические аппараты (МКА) в настоящее время выполняют широкий класс задач – от научно-исследовательских миссий до задач по обороноспособности страны. При этом важно отметить, что минимизация массогабаритных характеристик МКА не отменяет качество выполнения ими задач по назначению. Одними из наиболее широких назначений применения МКА являются дистанционное зондирование Земли, а также мониторинг космического пространства, в том числе в составе группы МКА. Как в том, так и в другом случае важным является оперативный разворот оптической аппаратуры на требуемый объект заинтересованности.

В качестве исполнительных органов на МКА чаще используются малогабаритные двигатели-маховики (ДМ), обладающие линейной характеристикой управляющего момента и работающие на восполняемых источниках энергии, что крайне важно в условиях жестких ограничений на затраты рабочего тела управляющих реактивных двигателей. Практика применения ДМ в составе системы ориентации и стабилизации МКА показала их преимущества в решении задач угловой стабилизации в условиях возмущающих моментов. При этом отработка программных углов на МКА при использовании ДМ выполняется крайне редко вследствие малого быстродействия. Для этих целей чаще используются управляющие реактивные двигатели.

Вопросам синтеза закона управления системы ориентации МКА с ДМ посвящены многие работы [3–8]. В то же время по вопросам влияния характеристик ДМ на оперативность программных разворотов исследований практически нет. В этой связи целесообразным является обоснование программы управления, обеспечивающей разворот МКА на заданные углы, оптимальной с точки зрения быстродействия и исследования влияния основных характеристик ДМ на время этого разворота.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что модель угловой динамики космического аппарата, как абсолютно твердого тела, с ДМ описывается следующими дифференциальными уравнениями [3, 4]:

$$\begin{aligned} I_x \dot{\omega}_x - (I_y - I_z) \omega_y \omega_z &= M_x - J_x \dot{\Omega}_x + J_x (\Omega_y \omega_z - \Omega_z \omega_y); \\ I_y \dot{\omega}_y - (I_z - I_x) \omega_z \omega_x &= M_y - J_y \dot{\Omega}_y + J_y (\Omega_z \omega_x - \Omega_x \omega_z); \\ I_z \dot{\omega}_z - (I_x - I_y) \omega_x \omega_y &= M_z - J_z \dot{\Omega}_z + J_z (\Omega_x \omega_y - \Omega_y \omega_x), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции абсолютной угловой скорости вращения МКА на оси связанной системы координат (ССК) $OXYZ$;

$\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ – проекции угловой скорости вращения маховиков на связанные оси;

M_x, M_y, M_z – проекции возмущающего момента на связанные оси;

I_x, I_y, I_z – моменты инерции МКА;

J_x, J_y, J_z – моменты инерции двигателей-маховиков, расположенных по осям ССК КА.

Основными характеристиками ДМ являются:

H – максимальный кинетический момент;

M_n – максимальный управляющий момент;

Ω_0 – максимальная скорость вращения маховика;

T_m – механическая постоянная времени ДМ;

k_d – коэффициент передачи электродвигателя (ЭД);

U_n – номинальное напряжение питания.

Процесс трехканального разворота является сложной нелинейной задачей, и некоторые подходы к ее решению приведены в работах [3, 4]. Для исследования влияния характеристик ДМ на длительность программного разворота справедливо принять следующие допущения:

1. Для случая осесимметричного МКА в форме куба или шара центральные моменты инерции одинаковы:

$$I_x = I_y = I_z = I.$$

2. Угловая скорость маховиков существенно больше угловой скорости вращения МКА: $\Omega_j \gg \omega_j$.

3. Примем, что на интервале времени $t \in [t_0, t_k]$ возмущающие моменты, действующие по осям ССК, незначительные: $M_j(t) = 0$.

С учетом этих допущений моментами от перекрестных гироскопических связей можно пренебречь, и система уравнений (1) вырождается в следующее уравнение:

$$I_j \ddot{\varphi} = -J_x \dot{\Omega}_x. \quad (2)$$

Требуется:

1) найти такое управление угловым движением КА с ДМ $u(t)$, при котором обеспечивается процесс переориентации КА с нулевого углового положения $\varphi(t_0) = 0$ с нулевой начальной угловой скоростью $\omega_j(t_0) = 0$ в конечное программное угловое положение $\varphi(t_k) \neq 0$ с конечной угловой скоростью $\omega_j(t_k) = 0$ за минимальное время:

$$u_j(t) = \arg \min \xi(t), \quad (3)$$

где $\xi(t) = \int_{t_0}^{t_k} dt = t_k - t_0$ – заданный функционал качества, $j \in \{x, y, z\}$;

2) исследовать зависимости влияния параметров ДМ T_m , k_d , J на время программного разворота КА t_k для различных значений программных углов $\varphi(t_k) \neq 0$.

СИНТЕЗ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ МКА С ДМ

Математическая модель ДМ на основе ЭД может быть представлена в операторной форме в виде

$$(T_e T_m p^2 + T_m p + 1)\Omega = k_d U - c(T_e p + 1)M_c, \quad (4)$$

где T_e – электромагнитная постоянная цепи якорной обмотки ЭД,

$$T_e = \frac{L}{R};$$

T_m – механическая постоянная времени ДМ,

$$T_m = \frac{JR}{K^2 \Phi^2};$$

k_d – коэффициент передачи ЭД,

$$k_d = \frac{1}{K\Phi};$$

c – коэффициент наклона механической характеристики ЭД,

$$c = \frac{R}{K^2 \Phi^2}.$$

Умножив и разделив выражения для T_m и k_d на максимальное напряжение U_{\max} , получим формулы, записанные через параметры механической характеристики ЭД:

$$T_m = \frac{J\Omega_{\max}}{M_{\max}}, \quad k_d = \frac{\Omega_{\max}}{U_{\max}}, \quad c = \frac{\Omega_{\max}}{M_{\max}},$$

где Ω_{\max} – максимальная скорость вращения маховика при $U = U_{\max}$;

M_{\max} – максимальный момент, развиваемый ЭД при $U = U_{\max}$.

Указанной модели соответствует структурная схема, показанная на рис. 1.

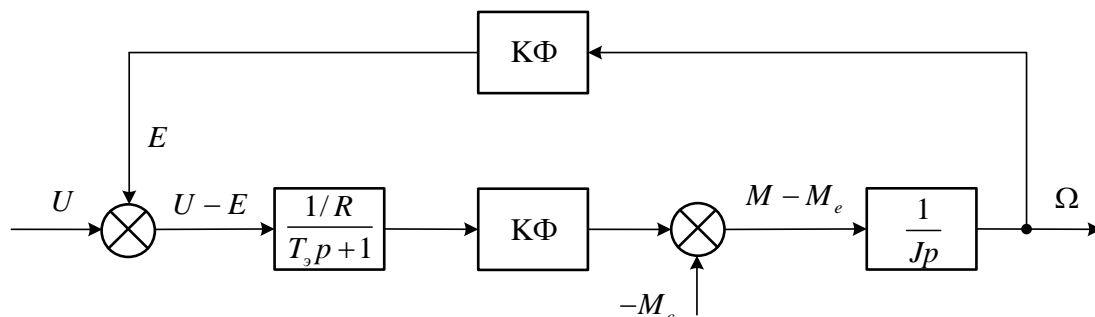


Рис. 1. Структурная схема ДМ

Учитывая, что $T_m \gg T_e$, электромагнитной постоянной времени пренебрегают. При этом передаточная функция ДМ описывается апериодическим звеном первого порядка:

$$\dot{\Omega} = \frac{1}{T_m} (k_d U - \Omega). \quad (5)$$

Из уравнения (2) найдем угловую скорость маховика: $\Omega = -\frac{I}{J} \dot{\phi}$.

Подставив это равенство (без знака минус) в уравнение (5), получим

$$T_m \ddot{\phi} + \dot{\phi} = k_u U, \quad (6)$$

где

$$k_u = k_d \frac{J}{I}. \quad (7)$$

Введем относительные величины

$$\tau = \frac{t}{T_m} \text{ и } y_1 = \frac{\phi}{k_u U T_m}, \quad (8)$$

преобразуем уравнение (6) к форме Коши:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= -y_2 + u(\tau), \end{aligned} \quad (9)$$

где $u(\tau) = \frac{U}{U_{\max}}$.

Выберем управление $u(\tau)$ таким образом, чтобы поворот МКА из начального состояния $(0,0)$ в конечное $(y_k, 0)$ осуществлялся за минимальное время. В работе [3] с помощью принципа минимума Понтрягина показано, что такое управление будет иметь вид:

$$\begin{aligned} u(\tau) &= 1, \text{ при } 0 \leq \tau < \tau_n, \\ u(\tau) &= -1, \text{ при } \tau_n \leq \tau < \tau_k, \\ u(\tau) &= 0, \text{ при } \tau > \tau_k. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $\tau = \tau_n$ и τ_k – моменты времени переключения и окончания процесса управления. То есть управление будет состоять из трех участков. Проинтегрируем уравнения (9) на каждом участке с учетом значений управления и начальных условий.

На первом участке, когда $u(\tau) = 1$, $y_2(0) = 0$, $y_1(0) = 0$, имеем

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(\tau) &= y_2(\tau); \\ \dot{y}_2(\tau) &= -y_2(\tau) + 1, \end{aligned}$$

отсюда

$$y_2(\tau) = ce^{-\tau} + 1$$

или с учетом значения $y_2(0) = 0$ и $y_2(\tau) = (1 - e^{-\tau})$

$$y_1(\tau) = (e^{-\tau} - 1) + \tau.$$

При $\tau = \tau_n$ происходит переключение управления на $u(\tau) = -1$.

Интегрируя уравнения (9) при начальных условиях

$$\begin{aligned} y_1(\tau_n) &= (e^{-\tau_n} - 1) + \tau_n, \\ y_2(\tau_n) &= (1 - e^{-\tau_n}), \end{aligned}$$

получаем:

$$\begin{aligned} y_1(\tau) &= (1 - 2e^{\tau_n})(e^{-\tau} - e^{-\tau_n}) - \tau + \tau_n + (e^{-\tau_n} - 1) + \tau_n; \\ y_2(\tau) &= (2e^{\tau_n} - 1)e^{-\tau} - 1. \end{aligned}$$

При $\tau = \tau_k$ имеем:

$$\begin{aligned} y_1(\tau_k) &= (1 - 2e^{\tau_n})(e^{-\tau_k} - e^{-\tau_n}) - \tau_k + \tau_n + (e^{-\tau_n} - 1) + \tau_n = y_k; \\ y_2(\tau_k) &= (2e^{\tau_n} - 1)e^{-\tau_k} - 1 = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Откуда находим

$$\tau_k = 2\tau_{\Pi} - y_k.$$

Подставляя τ_k во второе равенство (11), получим

$$\tau_{\Pi} = y_k + \ln\left(1 + \sqrt{1 - e^{-y_k}}\right). \quad (12)$$

В результате оптимальное время перехода в требуемое положение y_k (из начального нулевого положения) определяется выражением

$$\tau_k = y_k + 2\ln\left(1 + \sqrt{1 - e^{-y_k}}\right). \quad (13)$$

Принимая во внимание выражения (7) и (8), выразим полученные результаты в параметрах ДМ:

$$\begin{aligned} t_{\Pi} &= T_m \left(k\varphi_{\text{пр}} + \ln\left(1 + \sqrt{1 - e^{-k\varphi_{\text{пр}}}}\right) \right), \\ t_k &= T_m \left(k\varphi_{\text{пр}} + 2\ln\left(1 + \sqrt{1 - e^{-k\varphi_{\text{пр}}}}\right) \right), \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$k = \frac{1}{k_u T_m U_{\text{max}}}.$$

Полученные аналитические выражения позволяют провести анализ влияния параметров ДМ на характер программного разворота с учетом требований к максимальной оперативности и оценить время этого процесса.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ НА ВРЕМЯ ПРОГРАММНОГО ПОВОРОТА

Воспользуемся формулами (14) для исследования влияния параметров ДМ на время переключения управления и время окончания разворота МКА.

В качестве исходных данных примем следующие:

момент инерции МКА – $I = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

максимальный кинетический момент – $H = 0,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$;

максимальный управляющий момент – $M = 0,005 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

момент инерции ДМ – $J = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

максимальную скорость вращения маховика – 10000 об/мин;

механическую постоянную времени ДМ – $k_d = 38,8$;

коэффициент передачи ЭД – $T_m = 40$;

номинальное напряжение питания – 27 В.

Зависимости исследуемых величин от угла разворота при различных моментах инерции маховика представлены на рис. 2.

Анализ графиков (рис. 2) показывает, что при увеличении момента инерции маховика время оптимального по быстрдействию разворота уменьшается, но разница между временем окончания разворота и временем переключения управления при возрастании программного угла практически не меняется.

Исследуем зависимость времени от величины угла программного поворота при различных значениях механической постоянной ДМ T_m .

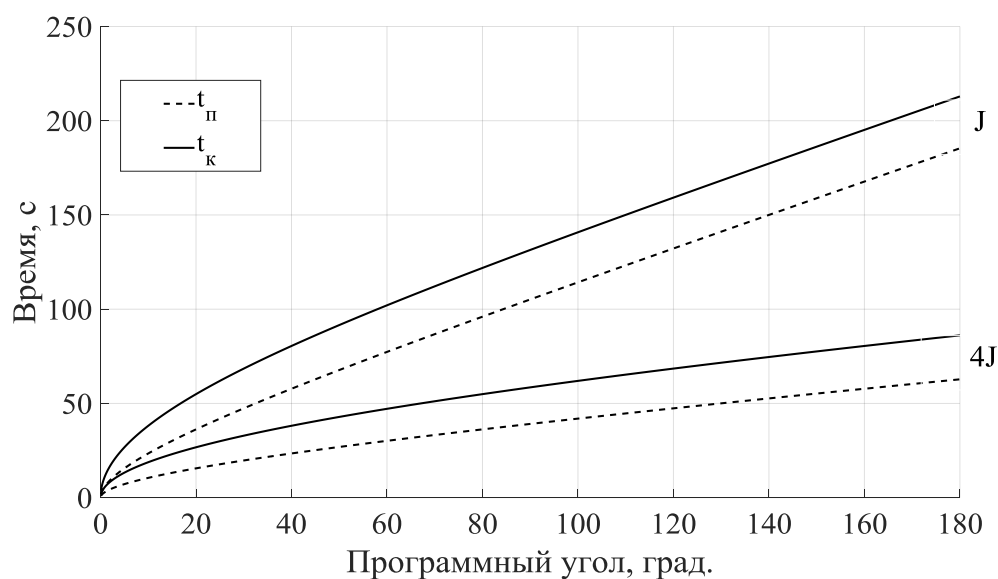


Рис. 2. Зависимость времени разворота от величины программного угла при различных моментах инерции маховика

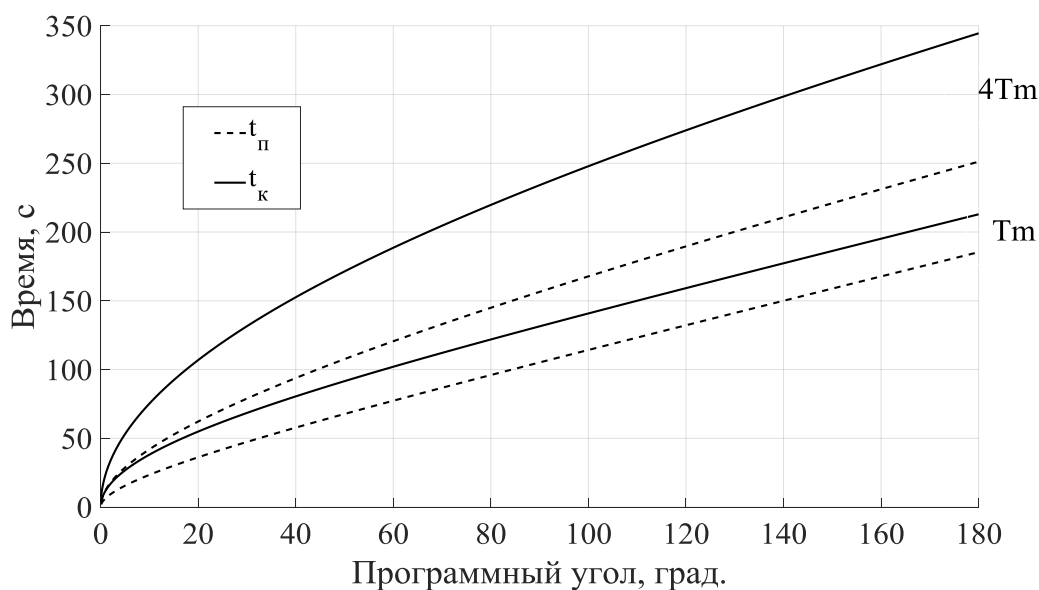


Рис. 3. Зависимость времени разворота от величины программного угла при различных значениях механической постоянной ДМ

На рис. 3 видно, что при увеличении механической постоянной времени ДМ происходит увеличение времени окончания программного разворота, а также увеличивается разница между моментом времени переключения управления и временем окончания программного поворота.

Исследуем зависимость времени от величины угла программного разворота при различных значениях коэффициента передачи электродвигателя.

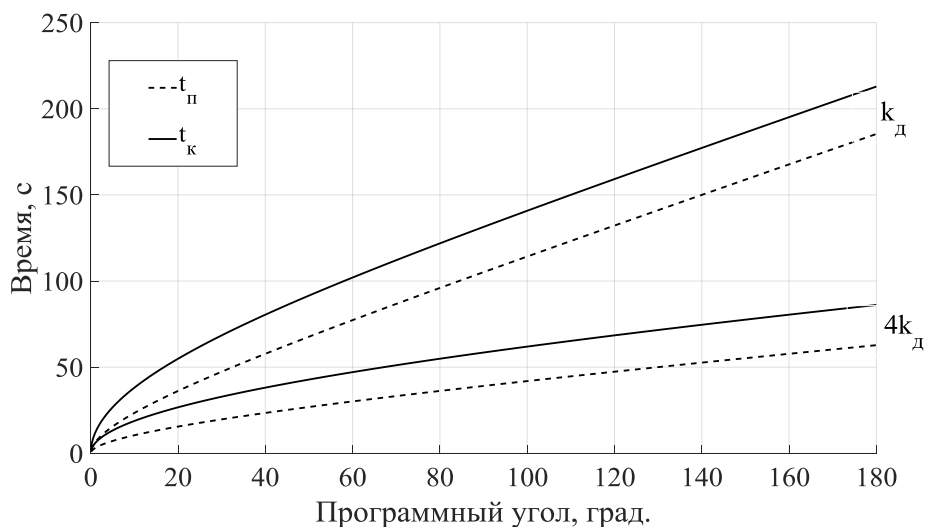


Рис. 4. Зависимость времени разворота от величины программного угла при различных значениях коэффициента передачи ЭД

Анализ графиков на рис. 4 свидетельствует о том, что характер изменения времени программного разворота в зависимости от изменения коэффициента передачи электродвигателя аналогичен случаю с вариацией момента инерции (см. рис. 2), так как в выражении (14) эти два параметра влияют одинаково на формирование коэффициента k_u .

Вызывает практический интерес исследование динамики оптимального по быстродействию разворота МКА на фиксированный угол с использованием различных ДМ отечественных производителей (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики ДМ различных отечественных производителей

| Производитель, модель ДМ | Потреб. мощность Вт, | Упр. момент Н·м, | Макс. кинет. момент, Н·м·с, | Момент инерции маховика, кг·м ² | Частота вращения, об/мин | Напряжение питания, В | k_d , рад/В·с | T_m , с | Масса ДМ, кг |
|--------------------------|----------------------|------------------|-----------------------------|--|--------------------------|-----------------------|-----------------|-----------|--------------|
| НПЦ ВНИИЭМ, ДМ-5 | 27,0 | 0,020 | 1,0 | 0,0016 | 6000 | 27 | 23,2 | 50 | 1,5 |
| КБ ПО «Полет», ДМ-1,2 | 8,5 | 0,005 | 1,2 | 0,0011 | 10000 | 27 | 38,8 | 240 | 1,1 |
| НПЦ «Полюс», МДМ-0,5 | 15,0 | 0,015 | 0,5 | 0,0008 | 6000 | 27 | 23,2 | 33,3 | 1,4 |

Так, например, для разворота МКА на программный угол $\varphi=60$ градусов время переключения управления и время окончания оптимального по быстродействию разворота имеют следующие значения:

- для ДМ-5 НПЦ ВНИИЭМ $t_n = 28,4$ с, $t_k = 46,4$ с;
- для ДМ-1,2 КБ ПО «Полет» $t_n = 51,3$ с, $t_k = 93,7$ с;
- для МДМ-0,5 НПЦ «Полюс» $t_n = 38,4$ с, $t_k = 55,9$ с.

На рис. 5–7 представлены графики, отражающие зависимость ориентации МКА по углу, значению управляющего сигнала, величине управляющего момента и угловой скорости вращения маховика от времени для соответствующих ДМ.

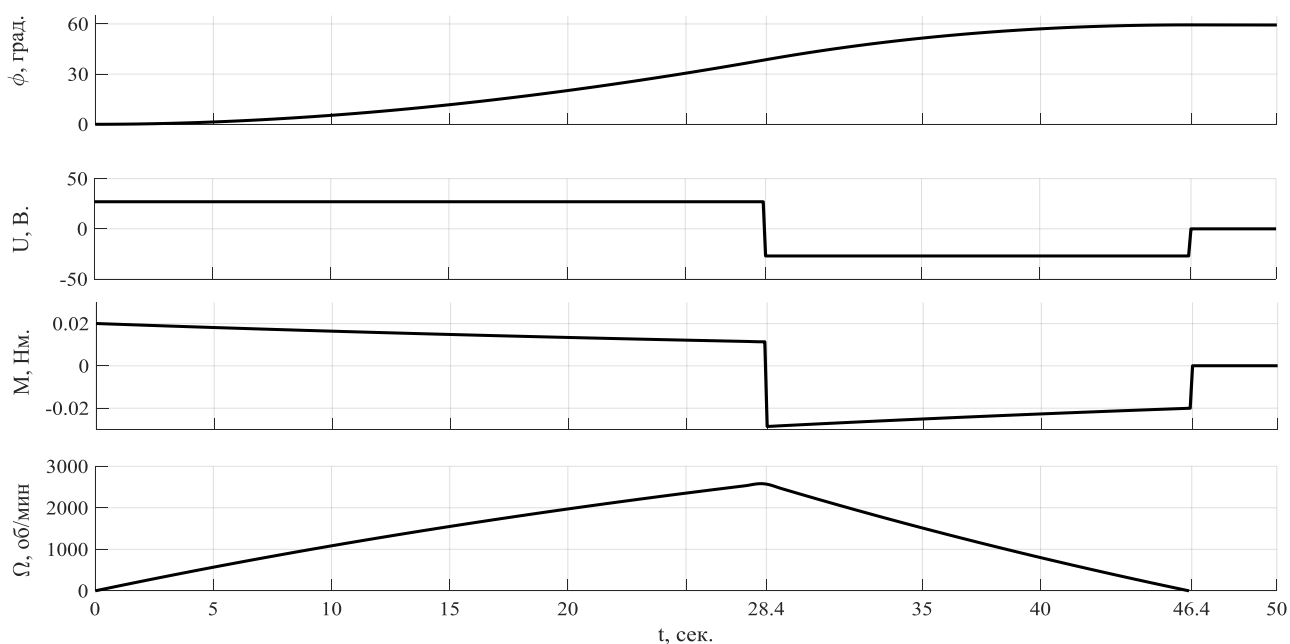


Рис. 5. Динамика разворота МКА с помощью ДМ-5 (ВНИИЭМ)

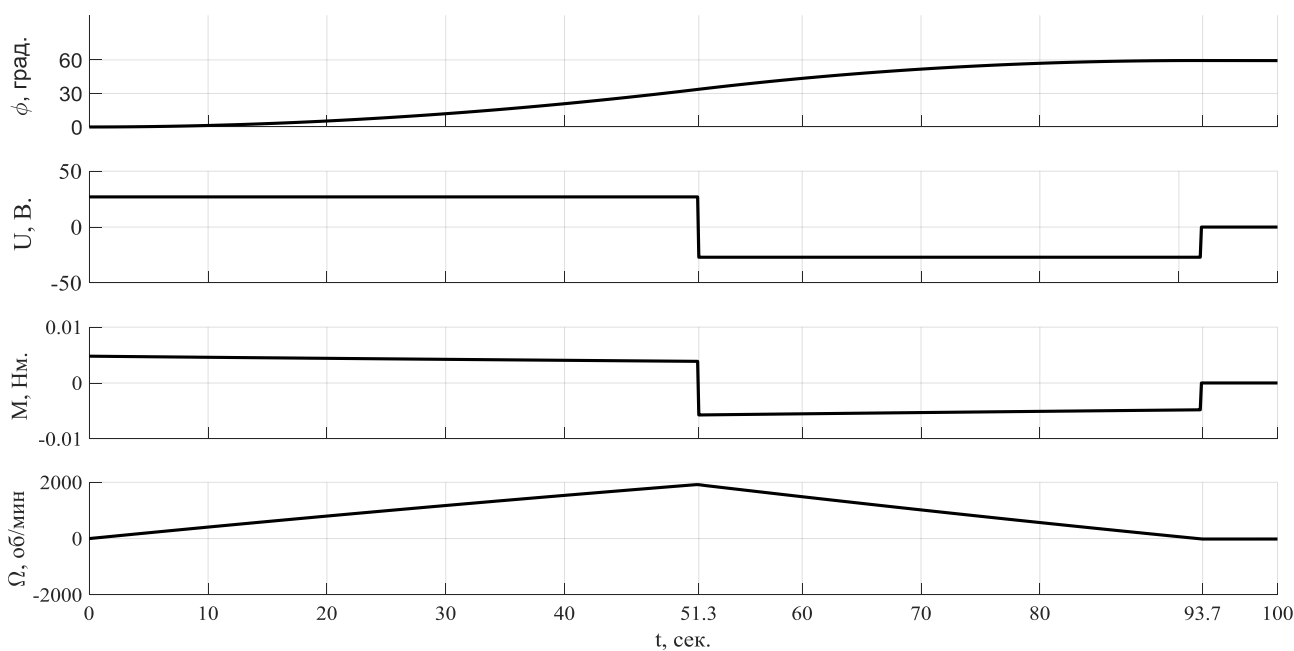


Рис. 6. Динамика разворота МКА с помощью ДМ-1,2 (КБ «Полет»)

Представленные результаты моделирования показывают, что оптимальным выбором для МКА с заданным моментом инерции является маховик ДМ-5 производства АО «НПЦ ВНИИЭМ», поскольку он обеспечивает наименьшее время выполнения программного разворота на заданный угол.

Оценивание затрат электроэнергии для каждого ДМ в отдельности требует дополнительного исследования. При его проведении возможно выбрать рациональный вариант применения ДМ для отдельно взятого КА с учетом требований к быстродействию и энергопотреблению.

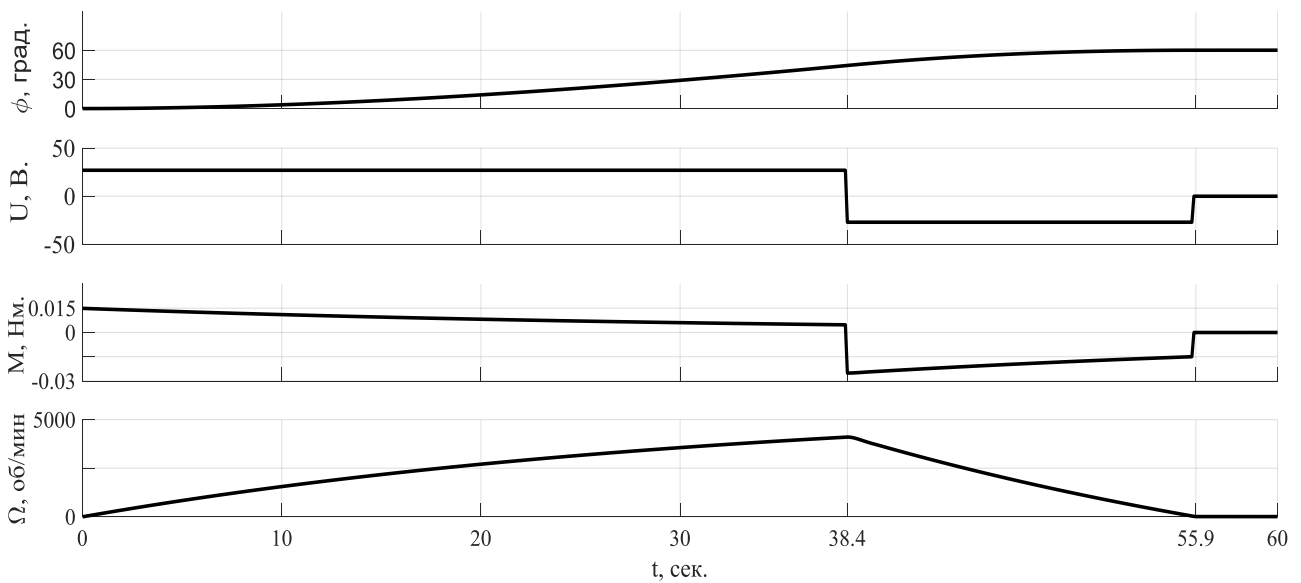


Рис. 7. Динамика разворота МКА с помощью МДМ-0,5 (НПЦ «Полюс»)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе решена задача синтеза оптимального по быстродействию управления одноканальным программным поворотом МКА с помощью ДМ. При этом получены аналитические выражения (14) расчета времени переключения управления ДМ для одноканальной системы, обеспечивающее процесс переориентации МКА из нулевого углового положения с нулевой начальной угловой скоростью в конечное программное угловое положение с конечной угловой скоростью за минимальное время.

Исследована зависимость влияния параметров ДМ T_m , k_d , J на время программного разворота МКА для различных значений программных углов.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что для получения оптимального по быстродействию разворота МКА на программный угол с помощью ДМ, сопоставимый с разворотом с помощью управляющих реактивных двигателей, необходимо выбирать ДМ с большим моментом инерции в отношении к моменту инерции КА и низкой постоянной времени T_m .

Список используемых источников

1. Фоминов И.В., Хлебников С.Г. Анализ технологических проблем построения роя малых космических аппаратов // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. – 2019. – № 1. – С. 24–28.
2. Ключников В.Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 423–428.
3. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1974. – 340 с.
4. Алексеев К.Б. Экстенсивное управление ориентацией космических летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1977. – 120 с.
5. Авксентьев А.А. Оптимальное управление угловым движением космического аппарата при оперативном сближении с орбитальным объектом // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 128–133.

6. *Акимов И.О.* Исследование быстродействия алгоритма управления малогабаритным космическим аппаратом с использованием двигателей-маховиков // Наука и инновации: инженерный журн. – 2019. – № 4. – URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1871> (дата обращения: 06.07.2020).
7. *Якимовский Д.О., Бураков М.В., Коновалов А.С.* Управление ускорением двигателя-маховика космического аппарата. – СПб.: ГУАП, 2018. – 152 с.
8. *Толтегин О.А., Литвинова П.Ю.* Управление малым космическим аппаратом с использованием двигателя-маховика на основе метода управления с поводьрем // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – № 6. – С. 44–52.

А.В. Клепов,
кандидат техн. наук, доцент;
С.А. Поляков;
Д.В. Шаповалов,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛАНОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК

В работе выполнен анализ проблемы долгосрочного планирования при управлении техническим состоянием оборудования, входящего в состав сложных технических комплексов космических войск (СТК КВ).

Представлена модель функционирования оборудования СТК КВ, и сформулирована задача перспективного планирования затрат на ремонтно-профилактические работы путем минимизации функции потерь. Предложен подход к решению задачи, основанный на концепции локально-оптимального управления с прогнозированием.

Разработан алгоритм решения сформулированной задачи, описаны входящие в его состав процедуры.

Ключевые слова: планирование, принятие решения, сложная техническая система, управление техническим состоянием, эксплуатация.

ВВЕДЕНИЕ

Поддержание требуемого уровня технического состояния (ТС) технологического оборудования (ТлОб) сложных технических комплексов космических войск (СТК КВ) является одной из главных задач, решаемых органами управления их эксплуатации разных уровней. При этом решение вопросов планирования мероприятий по обеспечению их эксплуатации необходимыми ресурсами, а также принятие соответствующих управленческих решений в условиях усиления требований к обоснованности таких решений имеют важное значение для повышения эффективности функционирования СТК КВ.

Вопросам повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем и комплексов посвящены многие научные работы. Наиболее близкой к сфере деятельности органов управления эксплуатацией СТК КВ, по содержанию решаемых задач, является сфера эксплуатации оборудования объектов наземной космической инфраструктуры (НКИ). В этой области хорошо известны авторы работ [1, 2]. Многие положения и выводы, приведенные в указанных, а также в других работах этих авторов, в полной мере применимы к специфике эксплуатации оборудования СТК КВ. В работах отмечено, что управление эксплуатацией (в частности, планирование и принятие соответствующих управленческих решений) оборудования многих объектов НКИ на современном этапе связано с объективным существованием естественных процессов старения и износа оборудования и действием принципа неравнопрочности компонентов сложных комплексов, к которым относятся объекты НКИ. Вследствие этого составные части указанных объектов неравномерно расходуют заложенный при их проектировании и изготовлении запас технического ресурса. Динамика изменения ТС разных видов оборудования является достаточно разнородной. Перечисленные факторы, а также наличие случайных факторов условий функционирования и применения объектов НКИ значительно усугубляют трудность планирования и принятия решений в вопросах управления ТС оборудования при его эксплуатации.

Наибольшую трудность с точки зрения учета факторов динамики ТС оборудования и неопределенности условий его функционирования представляет задача *перспективного планирования ресурсов*, необходимых для обеспечения эксплуатации этого оборудования. Решение этой задачи играет важную роль, например, при формировании органами управле-

ния эксплуатации верхних уровней заявок на бюджетное финансирование на долгосрочную перспективу, а также при планировании финансирования работ и поставок ЗИП и материальных средств (МС), выполняемых предприятиями промышленности.

Указанные обстоятельства стимулировали разработку научно-методического обеспечения, позволяющего принимать обоснованные решения при долгосрочном планировании эксплуатации и применения оборудования СТК КВ. В состав этого научно-методического обеспечения входит модель функционирования оборудования СТК КВ.

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СТК КВ

Исходной посылкой разработки этой модели является тот факт, что основной объем работы органов управления эксплуатацией связан с управлением процессами целевого применения (штатные работы) оборудования СТК КВ и процессами поддержания требуемого уровня ТС. В ходе их реализации потребляется большая часть ресурсов, выделяемых на эксплуатацию оборудования. Поэтому возникающие эксплуатационные затраты на интервале времени τ_k могут быть представлены в виде суммы

$$C_{\tau k}^{\Sigma}(u_{\tau k}) = c_{\tau k}^n + u_{\tau k} + c_{\tau k}^e(u_{\tau k}), \quad (1)$$

где $c_{\tau k}^n$ – средние затраты на реализацию процессов целевого применения на интервале τ_k ;

$c_{\tau k}^e$ – среднее значение затрат на восстановление системы после отказа при применении на интервале τ_k ;

$u_{\tau k}$ – средние затраты на проведение профилактических ремонтов оборудования.

Сумма двух последних слагаемых в выражении (1) представляет собой *функцию потерь* $J_{\tau k}(u_{\tau k})$. Эта функция характеризует затраты, связанные с необходимостью компенсации старения и износа техники путем проведения профилактических ремонтов и ремонтов, вызванных отказами техники при применении. Очевидно, что с ростом $u_{\tau k}$ значение $c_{\tau k}^e$ на интервале τ_k до некоторых пор будет убывать, поскольку с ростом затрат на профилактику вероятность отказа системы при применении будет снижаться. Это позволяет выдвинуть предположение о наличии оптимизационной ситуации и возможности отыскания минимума функции потерь, а задача планирования обеспечения ресурсами для достижения требуемого уровня ТС может быть решена на основе минимизации функции потерь. Сформулируем условие этой задачи.

Пусть в процессе функционирования оборудования в некоторые моменты времени происходят его отказы. Для их предотвращения периодически планируется и реализуется комплекс ремонтно-профилактических работ. Вложение средств в проведение профилактических ремонтов и сами ремонты производятся в начале года, например в процессе полугодового технического обслуживания.

В процессе профилактического ремонта выполняются работы по замене элементов систем (оборудования) из множества $\{x_i\}$. Это множество формируется исходя из доступных для проведения ремонта средств и на основании построенной относительно текущего момента времени функции отклика $P_{\tau k}^c(u_{\tau k})$, отображающей размер затрат на восстановление ТС системы в пространство значений показателей ее безотказности [3] (см. рис. 3).

После реализации на некотором интервале τ_k комплекса профилактических работ значение показателя безотказности (вероятности безотказной работы на ВБР) изменяется на некоторую величину $\Delta P_{\tau k}^c(\{x_i\}; u_{\tau k})$ и становится равным $P_{\tau k}^c = P_{\tau k-1}^c \pm \Delta P_{\tau k}^c(\{x_i\}; u_{\tau k})$, где $P_{\tau k}^c$ и $P_{\tau k-1}^c$ – значения показателей безотказности системы на текущем (τ_k) и предшествующем

(τ_{k-1}) интервалах. В дальнейшем, до начала следующего этапа восстановления $k+1$, его значение полагается неизменным.

Если принять, что периоды представляют собой отдельные, непересекающиеся интервалы времени, то для решения задачи управления (планирование и контроль выполнения работ) можно применить модель объекта с мгновенным восстановлением [4, 5].

На основании использования этой модели, в которой установлена связь между $P_{\tau k}^c$ и функцией $H_{\tau k}$ восстановления (ведущей функцией потока) на интервале τ_k , можно получить соотношение, связывающее результаты профилактических воздействий на отдельных этапах всего горизонта планирования и сводящее эти результаты к единому аддитивному показателю, который выше был введен как **функция потерь**,

$$J_{\tau_k}(u_{\tau_k}, P_{\tau_k}) = \sum_{k=1}^{K-1} u_{\tau_k} + \bar{c}_e \cdot [H_{\tau_{k-1}}(u_{\tau_{k-1}}, P_{\tau_{k-1}}) - \Delta H_{\tau_k}(u_{\tau_k}, P_{\tau_k})]. \quad (2)$$

В этой формуле введены следующие обозначения: $H_{\tau_{k-1}}$ – значение функции восстановления на интервале планирования τ_{k-1} ; u_{τ_k} – суммарные затраты на проведение работ по профилактической замене элементов системы на интервале τ_k ; ΔH_{τ_k} – приращение значения функции восстановления; \bar{c}_e – среднее значение стоимости устранения одного отказа на этапе применения; K – индекс при t_K , соответствующий правой временной границе горизонта планирования (рис. 1).

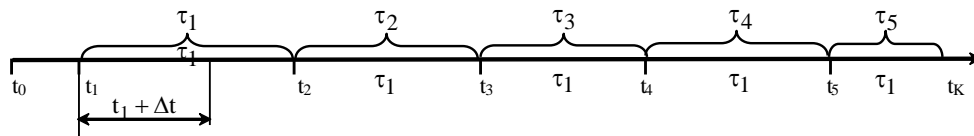


Рис. 1. Этапы планирования

Значение функции потерь на каждом интервале τ_k представляет собой локальный показатель качества функционирования системы, подвергаемой профилактическим воздействиям (далее в качестве синонима этому термину могут использоваться: профилактические работы, мероприятия, ПфМ). Значения этих показателей для каждого из интервалов оказывают аддитивное влияние на значение интегрального показателя для всего горизонта планирования. Тогда содержательная постановка задачи – задача планирования – имеет следующую формулировку.

При имеющихся исходных данных и ограничениях на допустимую ресурсоемкость профилактических мероприятий, а также на показатель безотказности при применении для каждого периода планирования τ_k необходимо найти такой вектор затрат на профилактические работы, который обеспечивал бы минимум функции потерь.

Дано: $T = \{\tau_k\}$, где $k = \overline{1, K}$, \bar{c}_e , $P_{\tau 1}^c(u_{\tau 1})$, $\Omega_u = \{u_{\tau k}^0\}$, $\Omega_P = \{P_{\tau k}^{c,0}\}$,
 $\{\tilde{P}_{\tau k, i}^c(\tau_k; u_{\tau k-1} = 0)\}$, где $i = \overline{1, N}$.

Найти: (3)

$$U_{\langle K \rangle}^* = \langle u_{\tau 1}^*, \dots, u_{\tau K}^* \rangle : \min_{\substack{u_{\tau k} \in \Omega_u \\ P_{\tau k}^c \in \Omega_P}} J_T^*(U_{\langle K \rangle}, P_{\tau k \langle K \rangle}^c),$$

где T – весь интервал (горизонт) планирования, включающий в себя множество единичных интервалов $\{\tau_k\}$;

$P_{\tau_1}^c(u_{\tau_1})$ – функция отклика для первого единичного интервала;

Ω_u, Ω_p – области допустимых значений затрат и вероятности успешного функционирования системы на этапе применения;

$U_{<K>}$ – вектор затрат на проведение ПфМ, компонентами которого являются затраты ресурсов на проведение ПфМ на единичных интервалах τ_k ;

$\{\tilde{P}_{\tau_k.i}^c(\tau_k; u_{\tau_{k-1}} = 0)\}$ – прогнозируемые значения ВБР i -го элемента системы при условии отсутствия профилактических воздействий.

Рассмотрим один из возможных подходов к решению задачи (3). Этот подход используется при разработке алгоритмов решения задач управления детерминированными динамическими системами и основан на концепции локально-оптимального управления, представленной в работе [6]. В этой работе показано, что в ряде случаев для оценки качества принимаемого решения эффективной оказывается оценка на локальных временных интервалах с помощью локальных показателей качества. В частности, если отсутствует возможность в начале всего периода планирования построить достаточно адекватную математическую модель исследуемой операционной системы или процесса, то в этом случае следует проводить поиск рационального (оптимального) управления на локальных участках, одновременно уточняя основные параметры модели.

Тогда, если задан произвольный интервал $\tau_k = [t_k, t_{k-1}] \subset T$, то можно снова ввести в рассмотрение функционал $J_{\tau_k}(u_{\tau_k})$, где u_{τ_k} – сужение процесса управления $U_{<K>}$, на интервале τ_k . Будем рассматривать этот функционал как своеобразную характеристику качества процесса управления, отнесенную лишь к подмножеству τ_k , и в связи с этим будем называть его локальным показателем качества процесса управления (по отношению к интервалу T), а интервал τ_k – интервалом локализации.

В связи с введением локального показателя качества $J_{\tau_k}(u_{\tau_k})$ проблема управления может быть формализована как последовательность задач локального выбора, решаемых друг за другом и заключающихся в минимизации соответствующих локальных показателей качества. Соответствующие процессы управления называются многошаговыми процессами локально-оптимального управления.

Один из вариантов алгоритма решения подобной задачи может быть построен следующим образом.

Рассмотрим последовательность фиксированных интервалов $T = \{\tau_k\}$, $k = \overline{1, K}$ и соответствующую последовательность локализованных задач выбора для каждого из моментов времени, соответствующих началу интервалов локализации:

$$J_k(u_{\tau_k}) = J_{\tau_k}^*(u_{\tau_k}; P_{\tau_k}^c) \rightarrow \min_{\substack{u_{\tau_k} \in \Omega_u \\ P_{\tau_k}^c \in \Omega_p}}, \quad (4)$$

Процесс управления начинается с решения задачи

$$J_1^*(u_{\tau_1}; P_{\tau_1}^c) \rightarrow \min_{\substack{u_{\tau_1} \in \Omega_{u1} \\ P_{\tau_1}^c \in \Omega_{p1}}}, \quad (5)$$

в результате чего система к началу интервала локализации τ_2 , т. е. в момент t_2 , оказывается в одном из состояний множества

$$\{\Psi_{2<2>}\}_{\Omega_{u1}} = \{<t_2; u_{\tau_1}>\}_{\Omega_{u1}} = P_{t_2}^c(t_2; u_{\tau_1}), \quad (6)$$

где $u_{\tau_1} \in \Omega_{u1}$, а Ω_{u1} – область допустимых значений затрат на интервале τ_1 .

Такое состояние является начальным для следующего этапа локально-оптимального выбора. Соответствующий процесс управления называется процессом локально-оптимального управления с прогнозированием (для фиксированных интервалов локализации).

Рассмотрим основные процедуры, лежащие в основе алгоритма решения задачи (4).

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Процедура оценивания состояния системы в начале интервала локализации. Выше было указано на то, что в начале интервала локализации система находится в одном из начальных состояний, определяемом вектором

$$\{\Psi_{k < 2 >}\}_{\Omega_{uk-1}} = \langle t_k; u_{\tau k-1} \rangle = P_{tk}^c(t_k; u_{\tau k-1}), \quad (7)$$

где $u_{\tau k-1} \in \Omega_{uk-1}$, Ω_{uk-1} – альтернативы затрат на ПФМ и соответствующая им область допустимых значений.

Тогда, если рассматривается первый интервал, т. е. рассматривается начало интервала τ_1 , то система находится в состоянии

$$\Psi_1 = P_{\tau_1}^c(t_1; u_{\tau_0}^* = 0). \quad (8)$$

После выбора и реализации управляющего воздействия на первом этапе $u_{\tau_1}^*$, а также в результате действия процессов старения и износа система переходит в состояние $P_{\tau_1}^c(t_1; u_{\tau_0}^* = 0, u_{\tau_1}^*)$. Опишем такой переход. Для этого необходимо учитывать следующие особенности решаемой задачи.

Во-первых, по условиям задачи для всех интервалов локализации известна реакция i -х составных частей системы на отсутствие профилактических воздействий на предыдущем этапе

$$\tilde{P}_{\tau k.i}^c(\tau_k; u_{\tau k-1} = 0) = \tilde{P}_{\tau k.i}^c(\tau_k). \quad (9)$$

Очевидно, что в этом случае

$$\tilde{P}_{\tau k.i}^c(\tau_k) = \tilde{P}_{\tau(k-1).i}^c(\tau_{k-1}) + \Delta \tilde{P}_{\tau k.i}^c(\tau_k), \quad (10)$$

где $\Delta \tilde{P}_{\tau k.i}^c(\tau_k)$ – некоторое значение отрицательного приращения ВБР элемента системы, величина которого определяется интенсивностью процессов естественного старения и износа. По условиям задачи приращение производится в начале интервала локализации. В рамках настоящей работы принято допущение о том, что скорость изменения $\tilde{P}_{\tau k.i}^c(\tau_k)$ на всех интервалах постоянна, соответственно принято, что $\Delta \tilde{P}_{\tau k.i}^c(\tau_k) = \text{const}$.

Для системы, отрицательное приращение ВБР определится как функция $\Phi_{\tau k}(\Delta \tilde{P}_{\tau k.i}^c(\tau_k))$ от приращений прогнозируемых ВБР элементов (при условии отсутствия профилактических воздействий, т. е. характеризует чисто деградационные процессы).

Во-вторых, после реализации в начале интервала локализации комплекса работ по профилактической замене элементов из множества $\{x_i\}$ значение показателя качества функционирования изменяется на некоторую величину, соответствующую объему проведенных работ. То есть приращение представляет собой некоторую функцию $\Delta P_{\tau k}^c(\{x_i\}; u_{\tau k}^*)$.

Тогда для любого интервала можно записать:

$$P_{\tau k}^c(t_k; u_{\tau k}) = P_{\tau k-1}^c(u_{\tau k-1}) + \Phi_{\tau k}(\tau_k) + \Delta P_{\tau k}^c(u_{\tau k}), \text{ где } u_{\tau k} \in \Omega_{uk}. \quad (11)$$

Функция (11) описывает состояние системы, в которое она переходит в начале каждого интервала планирования, и учитывает изменения, происходящие как вследствие действия деградационных процессов, так и вследствие реализации процессов управления (восстановления) из множества допустимых.

Процедура формирования множества допустимых альтернатив управления. Исходной информацией для оптимального планирования являются данные о ТС системы, включающие в себя результаты мониторинга параметров ТС состояния системы и результаты решения задачи построения ступенчатой, неубывающей функции отклика (рис. 3) оборудования НКИ на вложение средств в проведение профилактических мероприятий (ПфМ) [3]. После анализа этой функции несложно получить максимально возможное в контексте имеющихся ограничений значение показателя затрат на первом и последующих интервалах локализации. Очевидно, что оно равно сумме затрат u_{Σ} на профилактическую замену всех элементов системы, которые могут привести к отказу системы на этапе ее применения.

Далее полагаем, что допустимое управляющее воздействие на первом интервале локализации задано, поскольку перспективы финансирования эксплуатации на предстоящий год, как правило, являются достаточно четкими. Хотя, в принципе, этого может и не быть. Тогда размерность задачи значительно увеличивается, поскольку в этом случае необходимо принять решение о выделении на ПфМ ресурсов из диапазона $u_{\tau 1} = 0 \dots u_{\Sigma}$. В этом случае только на первом интервале локализации потребуются рассмотреть и оценить общее число альтернатив, равное u_{Σ} .

На рис. 2 представлен пример с вариантами возможного распределения ресурсов по интервалам локализации. Для наглядности на данной схеме принято, что $u_{\Sigma} = 101$ ед.

Если допустимое управляющее воздействие на первом интервале не задано, тогда можно руководствоваться свойством функции отклика, которое заключается в ее кусочно-постоянном характере (см. рис. 3). В данном случае размерность задачи формирования области допустимых альтернатив снижется, а число альтернатив по первоначальным вложениям будет соответствовать числу ступеней в графике функции отклика.

В рамках рассматриваемого примера примем, что $u_{\tau 1}^0 \leq 30$. Анализ графика (рис. 3) свидетельствует о том, что 30 ед. дадут тот же самый эффект, что и 26. Следовательно, можно задаться именно этим значением (рис. 3).

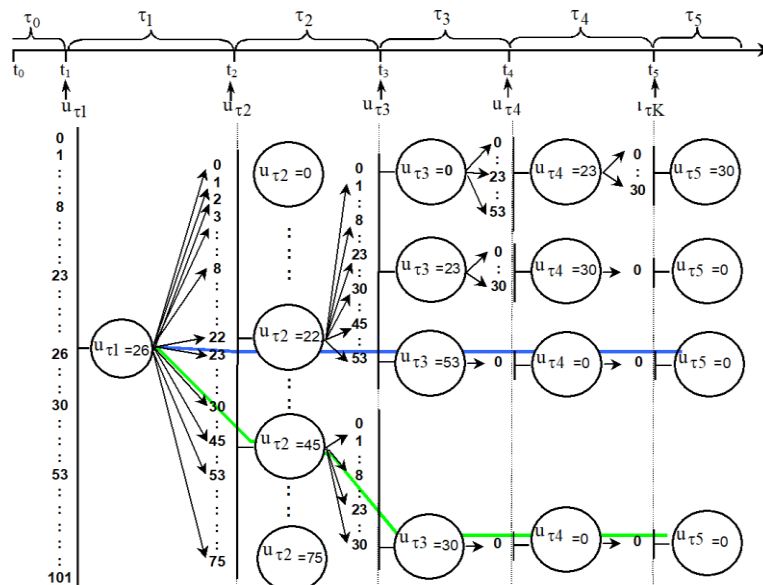


Рис. 2. Варианты возможного распределения ресурсов по интервалам локализации

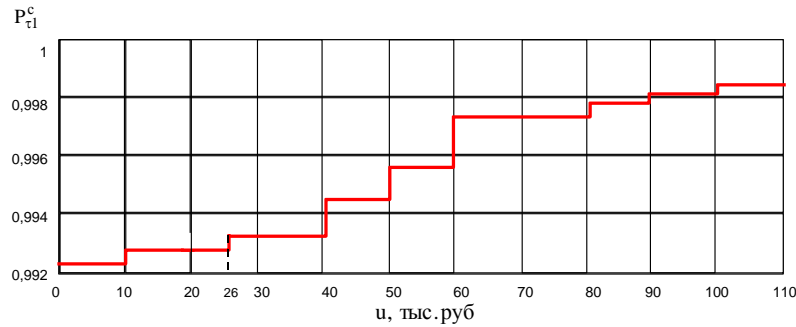


Рис. 3. Функция отклика

В соответствии с вышесказанным в первый год выполняется объем профилактических работ в объеме $\{x_i\}: u_{\tau k}^* = 26$, где $k=1$, а $u_{\tau k}^*$ – альтернатива, признанная для интервала локализации τ_k наиболее приемлемой. Объем $u_{\tau 1}^* = 26$ соответствует функции отклика $P_{\tau 1}^c(u_{\tau 1})$, построенной для первого года.

После реализации комплекса профилактических работ значение этого показателя изменится на некоторую величину $\Delta P_{\tau 1}^c(\{x_i\}: u_{\tau 1})$ и составляет

$$P_{\tau 1}^c = P_{\tau 0}^c + \Delta P_{\tau 1}^c(\{x_i\}: u_{\tau 1}^*). \quad (12)$$

В дальнейшем, до начала следующего этапа восстановления (до начала следующего года), его значение полагается неизменным. Выполнение комплекса работ $\{x_i\}: u_{\tau 1} = 26$ подразумевает обновление части элементов системы, характеристики безотказности которых соответствуют характеристикам новых приработанных элементов. На следующих интервалах локализации вложение средств на замену этих элементов, в условиях низкой интенсивности использования оборудования, будет оказывать гораздо меньшее влияние на показатель качества функционирования всей системы. Принимая это во внимание, ресурсы на проведение ПфМ по замене элементов из множества уже замененных на первом этапе могут не планироваться. Тогда для второго интервала локализации множество допустимых альтернатив управления сужается до диапазона $u_{\tau 2}^{\partial} = 0, (u_{\Sigma} - u_{\tau 1}^*)$. Соответственно, для произвольного интервала локализации множество допустимых управлений может быть сформировано на основе следующего соотношения:

$$u_{\tau k}^{\partial} = 0, (u_{\Sigma} - \sum_{k=1}^{K-1} u_{\tau k-1}^*). \quad (13)$$

Анализ чувствительности функции потерь к реализации управляющих воздействий. После определения границ области допустимых управляющих воздействий производится выбор приемлемой в условиях налагаемых ограничений стратегии. Если четких ограничений для текущего интервала локализации не задано, необходимо выполнить анализ чувствительности функции потерь к реализации всего спектра возможных управляющих воздействий из области допустимых. Для этого можно воспользоваться свойствами скачкообразного перехода значения функции отклика в некоторых точках и постоянства указанной функции между точками перехода. С этой целью должны быть выполнены следующие шаги.

1. Выполнить проверку необходимости дальнейшего управления.

Проверка выполняется по критерию пригодности, т. е. необходимость отсутствует, если

$$\forall \{\Psi_k\} \rightarrow G: \bigcap_k (\Psi_k \in \Omega_p) \approx U;$$

если какое-либо состояние признается пригодным и затраты на его достижение приемлемы, т. е. $u_{\tau k-1}^* \in \Omega_{u_{\tau k-1}}$, то задача считается решенной, в противном случае необходимо перейти ко 2-му шагу.

2. Построить функцию отклика $P_{\tau k}^c(u_{\tau k})$ для текущего интервала локализации.

3. Построить функцию потерь вида (2).

4. Определить множество $\{u_{\tau k}^*\}$ эффективных вложений в проведение ПфМ путем численного дифференцирования $J_k(u_{\tau k})$ по $u_{\tau k}$ [решаем задачу (4)]:

$$J_{\Delta \tau k}^c(u_{\tau k}) = \frac{\Delta J_{\tau k}^c(u_{\tau k})}{\Delta u_{\tau k}} = \frac{J_{\tau k}^c(u_{\tau k} + \Delta u_{\tau k}) - J_{\tau k}^c(u_{\tau k})}{\Delta u_{\tau k}}, \tag{14}$$

где $u_{\tau k} \in u_{\tau k}^{\delta} = 0, (u_{\Sigma} - \sum_{k=1}^k u_{\tau k-1})$.

Эффективными являются такие вложения, при которых результат численного дифференцирования имеет минимальное значение.

Ниже, на рис. 4 и 5, представлены функции отклика и функции потерь соответственно, построенные применительно к началу 2 и 3 интервалов локализации. Исходными данными для их построения являлись:

- для интервала τ_2 : $u_{\tau 1}^* = 26$;
- для интервала τ_3 : $u_{\tau 1}^* = 26$; $u_{\tau 2}^* = 22$.

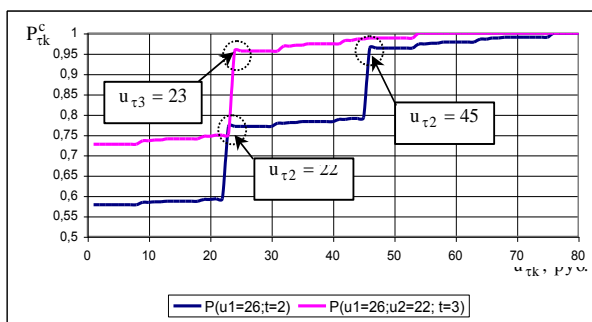


Рис. 4. Функции отклика для 2 и 3 интервалов локализации

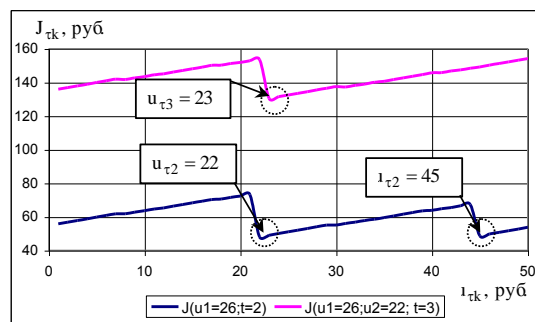


Рис. 5. Функции потерь для 2 и 3 интервалов локализации

На рис. 6 проиллюстрирована процедура определения множества эффективных вложений путем численного дифференцирования функции потерь.

Рассматривая совместно рис. 5 и 6, убеждаемся, что минимальные производные соответствуют локальным минимумам функции потерь. Так, для второго интервала локализации минимумы функции потерь соответствуют $u_{\tau 2}^*$, равным 22 и 45 ед. (рис. 6). Именно эти значения и выбираются в качестве наиболее приемлемых для второго интервала локализации.

Одним из полезных свойств графиков производных по вложениям в ПфМ (рис. 6) является то, что их минимумы соответствуют стоимостям единичных профилактических работ и их возможных сочетаний. Очевидно, что планирование затрат, отличающихся от этих значений приведет к неоправданному перерасходу ресурсов или наоборот – к нехватке.

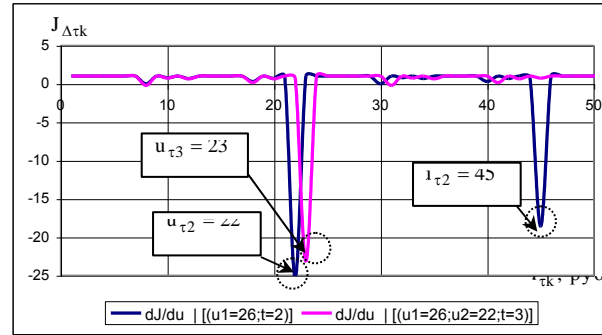


Рис. 6. Определение множества эффективных вложений

В заключение раздела отметим, что анализ чувствительности функции затрат позволяет выявить наиболее эффективные управляющие воздействия. Однако поиск ответа на вопрос о принятии того или иного возможного управления из множества m для дальнейшего анализа жестко алгоритмизировать не удастся. Поиск ответа на вопрос, какую альтернативу выбрать, очевидно, связан с привлечением дополнительной неформализуемой информации о перспективах и возможностях системы эксплуатации по реализации данного варианта управления, которая доступна специалистам, глубоко разбирающимся в тонкостях планирования и обеспечения.

ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ

После того как определено множество возможных $\{u_{\tau_k}^*\}_{\{m\}}$ эффективных вложений в проведение ПфМ, необходимо рассчитать значение функции потерь, которое будет достигнуто в результате реализации каждого из m возможных управляющих воздействий. Для этого необходимо выполнить следующие шаги.

1. Определить значение функции отклика $P_{\tau_k}^c$ при $u = u_{\tau_k}^*$.
2. Определить и сохранить $\{x_i\}: u_{\tau_k}^*$.
3. По формуле (2) рассчитать соответствующее значение функции восстановления.
4. Рассчитать значение функции потерь, учитывающее результаты реализации стратегии управления на предыдущих интервалах:

$$J_{\tau_k}(u_{\tau_k}^*) = \sum_{k=1}^{K-1} u_{\tau_k}^* + \bar{c}_e \cdot H_{\tau_k}(u_{\tau_k}^*). \quad (15)$$

5. Повторить шаги 1–4 m раз.
6. Далее можно перейти к анализу результатов и выбору наиболее приемлемой стратегии управления.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленный в работе алгоритм позволяет осуществить подготовку исходных данных для обоснования принимаемых при долгосрочном планировании решений, связанных с разработкой наиболее приемлемых вариантов распределения ресурсов на проведение ПфМ агрегатов и систем сложных технических комплексов по этапам локализации. При этом каждый из вариантов распределения ресурсов ложится в основу принимаемой на планируе-

мом интервале стратегии управления ТС систем и комплексов. Основными рассматриваемыми в работе стратегиями являются две стратегии:

- 1) эксплуатация системы до отказа, без проведения вложений в ПФМ;
- 2) профилактическая замена (проведение вложений в ПФМ) на планируемом интервале отдельных элементов системы, перечень которых получен в результате решения сформулированной в работе задачи.

Приведем краткое описание полученных путем численного моделирования результатов.

Исходя из принятых в модельном примере исходных данных, сформулированный алгоритм позволил сформировать четыре возможных стратегии, учитывающих предполагаемые ограничения по финансированию на интервалах планирования (рис. 7).

На диаграмме (рис. 7) над каждой серией проставлено значение наиболее эффективных затрат на единичном интервале в пределах имеющихся или предполагаемых ограничений. Здесь же пятой по счету обозначена стратегия, реализация которой не предполагает использования на каждом интервале функции отклика для определения наиболее эффективных вложений. Эта стратегия предполагает распределение средств по принципу «На какие работы хватает средств, те и выполняются». Выбор мероприятий для включения их в план работ выполнялся случайным подбором.

На рис. 8. представлены графики изменения вероятности успешного функционирования объекта НКИ во времени при различных стратегиях управления. Под успешным функционированием понимается выполнение оборудованием СТК КВ возложенных на нее при целевом применении функций.

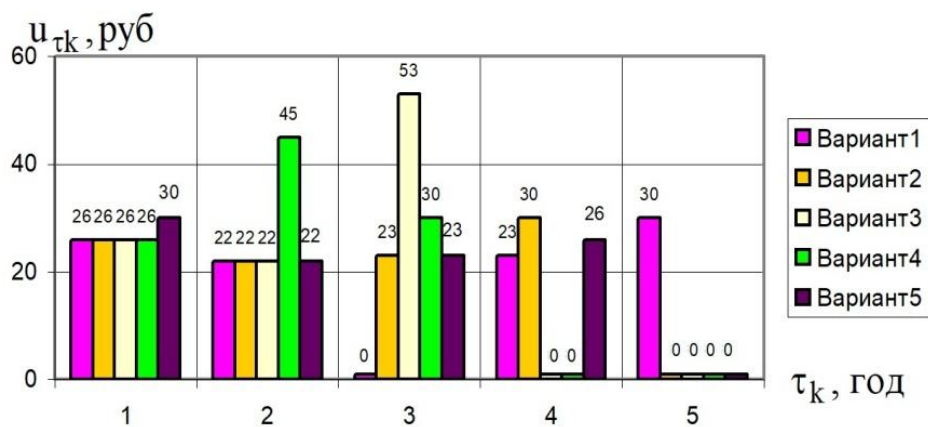


Рис. 7. Стратегии управления

Из анализа полученных результатов следует, что пятая стратегия по значению функции потерь является наихудшей. Значение показателя потерь при реализации этой стратегии ($J = 317$), что приблизительно в 1,5 раза выше показателя для первой стратегии ($J = 193$) и почти в 2,5 раза выше наилучшего значения ($J = 131$, четвертая стратегия).

Такое положение объясняется неоптимальным выбором комплекса ПФМ на каждом интервале, в результате чего профилактическим воздействиям на первых этапах подвергались наименее критичные элементы, обладающие «достаточным запасом прочности», и поэтому их профилактическая замена не принесла необходимого на начальных этапах вклада в рост вероятности успешного функционирования. В результате первые интервалы планирования отличаются большими затратами на устранение отказов в процессе применения, о чем свидетельствуют низкие значения вероятности на первых двух интервалах.

Наиболее эффективной является четвертая стратегия со значением показателя потерь $J = 131$. Она предполагает достаточно высокие затраты на ПФМ на начальных интервалах. В этом случае происходит достаточно быстрая компенсация деградиационных процессов, происходящих в системе, и их последствий в виде отказов на этапе применения восстановитель-

ными процессами. С этой точки зрения идеальным мог бы стать вариант, при котором ограничения на потребляемые ресурсы отсутствуют, и, следовательно, имеется возможность проведения всего комплекса ПфМ на первом интервале планирования. Подобная ситуация соответствует случаю капитального ремонта системы.

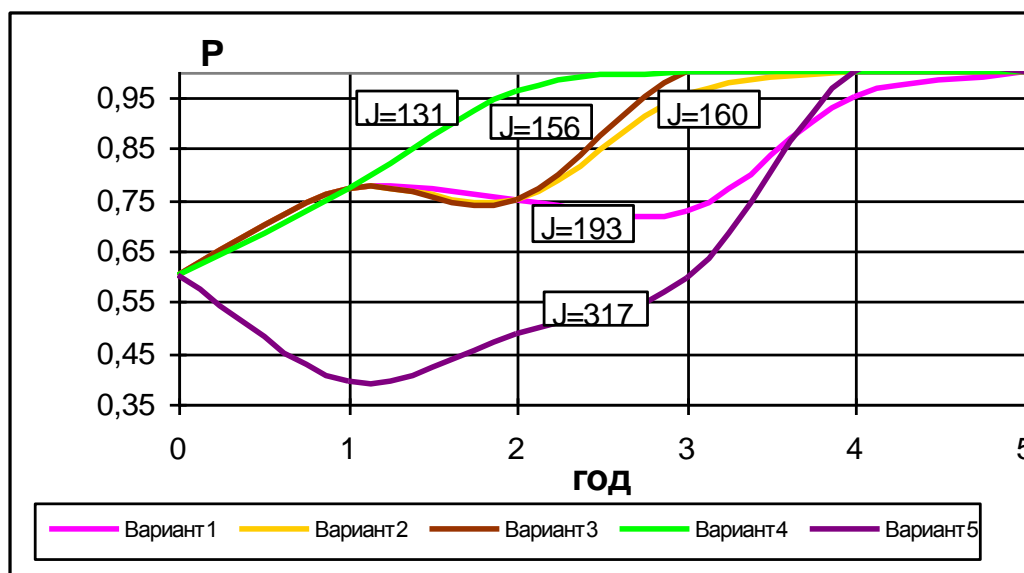


Рис. 8. Графики изменения вероятности успешного функционирования оборудования СТК КВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе разработанной методики лежит использование методологии оптимизации многошаговых процессов локально-оптимального управления. В ней для оценивания эффективности принимаемых решений на каждом этапе локализации использован новый показатель – *показатель функции потерь*. Этот показатель позволяет связать технические и экономические результаты управления ТС оборудования, входящего в состав СТК КВ, а также связать результаты профилактических воздействий на отдельных этапах всего горизонта планирования.

Методика позволяет учитывать на каждом этапе локализации действие факторов старения и износа оборудования, а также результаты реализованных управляющих воздействий на предыдущих этапах локализации.

Разработанная методика может быть использована в органах управления эксплуатацией оборудования СТК КВ в качестве инструмента для технико-экономического анализа, а также поддержки принятия решения при долгосрочном планировании ПфМ, поставок ЗИП и технологического оборудования при существующих ограничениях, накладываемых на необходимые для этого ресурсы.

Список используемых источников

1. Пеньков М.М., Петров Г.Д., Птушкин А.И. Новые принципы построения системы эксплуатации космодромов // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2015. – № 4. – С. 55–65.
2. Перминов А.Н. Управление наземной космической инфраструктурой на основе мониторинга ее состояния. – СПб.: МО РФ, 2005. – 320 с.

3. *Клепов А.В.* Разработка подходов к анализу чувствительности показателей состояния объектов наземной космической инфраструктуры к инвестиционным вложениям // Научно-методические вопросы совершенствования эксплуатации космических средств: научно-техн. сб. – 2005, в/ч 11284.
4. *Волков Л.И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М.: Высш. шк., 1981.
5. Эксплуатация космических средств: теория и практика: учебник / под ред. А.П. Ковалева. – СПб., 2002. – Ч. 2: Эксплуатационное качество космических средств. Организация эксплуатации космических средств. – 420 с.
6. *Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И.* Теория систем и оптимального управления. – МО СССР, 1987. – Ч. 2: Понятия, модели и алгоритмы оптимального выбора.

Ф.Е. Ковалев,
кандидат техн. наук;
А.Н. Миргородский,
кандидат техн. наук;
Д.А. Эльцофон

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье рассматривается комплексный подход по обоснованию оптимальных затрат на реконструкцию сооружения (системы теплоснабжения и теплоизоляции ограждающих конструкций), позволяющий минимизировать затраты на дальнейшую эксплуатацию. Учтены все виды затрат, как энергетические, так и неэнергетические, определяющие суммарные затраты на эксплуатацию, выведены функциональные зависимости по формированию затрат каждого вида. Оптимизация затрат с одновременным учетом термодинамических и экономических показателей проводится методом термоэкономики (эксергоэкономики), учитывающим как затраты на реконструкцию, так и затраты на дальнейшую эксплуатацию в течение всего срока службы.

Ключевые слова: реконструкция сооружения, эксплуатация сооружения, теплоснабжение, теплоизоляция, энергоэффективность, затраты на эксплуатацию, термоэкономика, эксергоэкономика, приведенные затраты, технические системы, система отопления.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации реализуется госпрограмма вооружения ГПВ-2027, ориентированная на совершенствование качественных параметров вооружения и военной техники, на повышение эффективности боевого управления войсками и обеспечения их деятельности.

Создание и поддержание требуемых условий эксплуатации изделий военной техники (ИВТ) обеспечивается зданиями и сооружениями как средствами эксплуатации [1]. Из этого следует, что при реализации ГПВ-2027 для приведения характеристик зданий и сооружений в соответствие с требованиями, предъявляемыми новыми образцами ИВТ, а также с современными требованиями по энергоэффективности необходимо проведение реконструкции существующих сооружений. Такая реконструкция вызвана следующими причинами:

- необходимостью снижения затрат на эксплуатацию сооружений;
- несоответствием инженерных решений, реализованных при проектировании и строительстве сооружений более 35–40 лет назад, современным требованиям;
- необходимостью приведения показателей энергоэффективности сооружений в соответствие с современными требованиями.

Повышение эффективности применения по назначению объектов наземной космической инфраструктуры, к которым относятся специальные сооружения, предназначенные для размещения изделий военной техники, технологического оборудования, технических систем, а также размещения личного состава, эксплуатирующего ИВТ, достигается путем повышения эффективности применения по назначению, в том числе и технических систем, обеспечивающих поддержание требуемых параметров микроклимата в обслуживаемых помещениях [2].

Следовательно, при реконструкции сооружений должна быть решена задача повышения эффективности функционирования технических систем, параметры которых определяются в том числе и характеристиками ограждающих конструкций сооружений. Это позволяет рассматривать технические системы и ограждающие конструкции как единую энергетическую систему.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ

Анализ технических систем и ограждающих конструкций сооружений командного пункта показал, что основные затраты на эксплуатацию данных сооружений (до 60–80%) приходятся на теплопотребление (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика сооружений

| Сооружение | Год постройки | Теплопотребление (стоимость теплопотребления) | Состав и термические сопротивления ограждающих конструкций | | |
|------------|---------------|---|---|---|---|
| | | | Стены | Покрытие | Окна |
| 1А | 1973 | 6498 ГДж/год (3,1 млн. руб.) | Керамзитобетон без утеплителя, $R_{огр} = 0,64 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ | Ж/б плита с утеплителем $R_{покр} = 2,41 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ | Деревянные с двойным переплетом $R_{ок} = 0,25 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ |
| 1Г | 1987 | 2885 ГДж/год (1,4 млн. руб.) | | | |
| 2А, 2Б, 2В | 1973 | 2720 ГДж/год (1,3 млн. руб.) | | | |

Таким образом, основными факторами, влияющими на теплопотребление сооружением, являются теплотехнические характеристики ограждающих конструкций и отопительного оборудования.

Снижение теплопотребления сооружениями возможно за счет снижения теплопотерь (утепления ограждающих конструкций: окон, наружных стен, кровли и т. д.), что позволит снизить количество отопительного оборудования (отопительных приборов, запорно-регулирующей арматуры, трубопроводов, теплообменников и циркуляционных насосов индивидуального теплового пункта и т. д.) и приведет к снижению затрат на реконструкцию. Однако дополнительная теплоизоляция ограждающих конструкций приведет к увеличению этих затрат [3, 4].

Величина, позволяющая оценить эффективность затрат на реконструкцию сооружения называется *приведенные затраты*. На рис. 1 показана зависимость приведенных затрат Z от величины термического сопротивления $R_{огр}$ (толщины теплоизоляции) наружных стен.

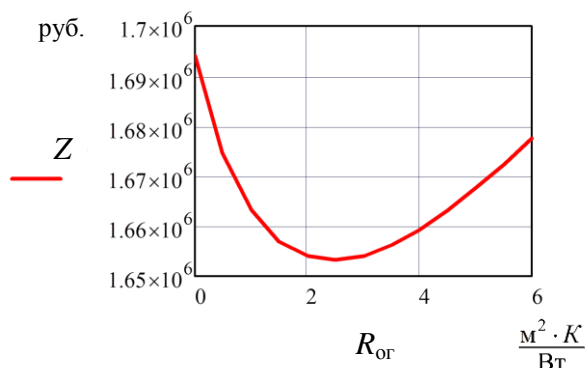


Рис. 1. Зависимость приведенных затрат Z от коэффициента термического сопротивления $R_{огр}$ теплоизоляции наружных стен сооружения

Учитывая, что аналогичное влияние на приведенные затраты имеют и другие факторы (отопительное оборудование, теплообменник, теплоизоляция кровли и т. д.) [4] для минимизации затрат на эксплуатацию сооружения после реконструкции необходимо комплексное решение, позволяющее определить оптимальные затраты на реконструкцию отопительного оборудования и теплоизоляции ограждающих конструкций.

ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

Затраты на реконструкцию и последующую эксплуатацию сооружения состоят как из энергетических затрат (электроэнергия, тепловая энергия, вода и др.), так и неэнергетических (затраты на оборудование и материалы, затраты на обслуживание, текущий ремонт, зарплата персоналу, тарифы, зависящие от местных условий и др.) [2–6].

Метод, позволяющий одновременно учитывать все виды затрат, называется методом термозаконономики (эксергоэконономики) и, как видно из названия, оперирует термодинамическими и экономическими показателями [2–6].

В методе термозаконономики в качестве целевой функции рассматриваются приведенные затраты:

$$\sum_{i=1}^n Z_i(X) = E_{\text{нн}} C_i(X) + U_i(X) \rightarrow \min_{X \in D}, \quad (1)$$

где $Z_i(X)$ – суммарные приведенные затраты, руб;

$C_i(X)$ – капиталовложения в i -й элемент, руб.;

$E_{\text{нн}}$ – коэффициент дисконтирования (эффективности капиталовложений);

D – множество допустимых вариантов реконструкции, определяемых структурой;

X – множество варьируемых переменных (факторов);

n – количество рассматриваемых факторов;

$U_i(X)$ – эксплуатационные затраты на i -й элемент, руб., которые определяются как

$$U_i(X) = b_i C_i(X) + \sum_{i=1}^m S_i^{\text{ЭН}}(X) + S_{0i}, \quad (2)$$

где m – количество потребляемых видов энергии;

$S_i^{\text{ЭН}}(X)$ – затраты на энергию в i -м элементе, руб.;

S_{0i} – затраты на обслуживание, текущий ремонт i -го элемента, зарплату персоналу, руб.;

b_i – коэффициент отчислений на амортизацию и капитальный ремонт i -го элемента.

В качестве обобщающей величины, используемой для учета различных видов потребляемой энергии в термозакономике (эксергоэкономике), применяется эксергия e . Она определяется как максимальная работа вещества или энергии при достижении ими термодинамического равновесия с окружающей средой [7].

Суммарные энергетические затраты, т. е. затраты на потребляемую энергию любого вида, определяются выражением

$$\sum_{i=1}^m S_i^{\text{ЭН}}(X) = e_i(X) W_i t_{\text{пр}}, \quad (3)$$

где e_i – подводимая эксергия i -го вида («эксергетическая производительность»), Дж/с;

W_i – цена эксергии i -го вида, руб/Дж;

$t_{\text{пр}}$ – расчетное время работы системы отопления за год (за отопительный период), с.

Эксергия потребляемой сооружением тепловой энергии за единицу времени («эксергетическая производительность системы отопления») с учетом безвозвратных потерь при теплообмене в отопительных приборах и теплообменном аппарате индивидуального теплового пункта определяется следующим образом:

$$e_t = Q_{\text{п}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{ос}}}{T_{\text{п}} + \frac{\Delta T_{\text{в}}}{2} + \Theta_{\text{оп}} + \Theta_{\text{то}}} \right), \quad (4)$$

где e_t – эксергия теплоты, подводимой к системе отопления сооружения, Дж/с;

$Q_{\text{п}}$ – производительность системы отопления сооружения, кВт;

$T_{\text{ос}}$ – температура воздуха окружающей среды, °С;

$T_{\text{п}}$ – температура воздуха в сооружении, °С;

$\Delta T_{\text{в}}$ – изменение температуры нагреваемого в отопительном приборе воздуха, °С;

$\Theta_{\text{оп}}$ – температурный напор в отопительном приборе, °С;

$\Theta_{\text{то}}$ – температурный напор в теплообменном аппарате, °С.

Определение эксергии, потребляемой циркуляционным насосом электрической энергии, проводится в соответствии с выражением [4]

$$e_{\text{эл}} = \frac{\rho_{\text{т}} \cdot g \cdot H \cdot e_t}{\left(1 - \frac{T_{\text{ос}}}{T_{\text{п}} + \frac{\Delta T_{\text{в}}}{2} + \Theta_{\text{оп}}} \right) \cdot \lambda_{\text{т}} \cdot \Delta T_{\text{то}} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{д}}}. \quad (5)$$

где $\rho_{\text{т}}$ – плотность теплоносителя кг/м³;

H – напор, развиваемый циркуляционным насосом, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\lambda_{\text{т}}$ – теплоемкость теплоносителя, Дж/м³·°С;

η_i – к.п.д. насоса, передачи, электродвигателя.

Из выражений (1) и (2) с учетом формулы (3) следует, что неэнергетические затраты составляют

$$\sum_{i=1}^n S_i^{\text{неэн}}(X) = E_{\text{н}i} C_i(X) + b_i C_i(X) + S_{0i}. \quad (6)$$

Функциональные зависимости капиталовложений C_i от характеристик и режимов работы отопительного оборудования, оборудования индивидуального теплового пункта, теплоизоляции ограждающих конструкций представлены в работе [4].

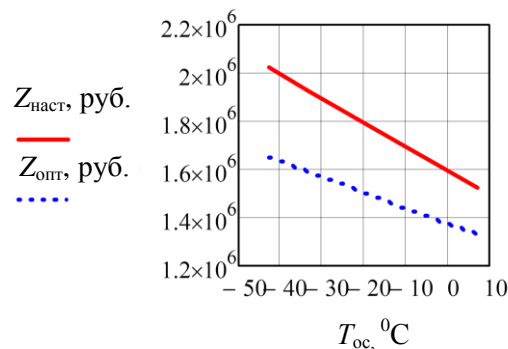


Рис. 2. Зависимость приведенных затрат Z от температуры окружающей среды $T_{\text{ос}}$ до и после оптимизации

Подстановка полученных зависимостей в выражение (1) позволяет найти экстремум функции приведенных затрат, при котором величина капиталовложений C в реконструкцию каждого элемента отопительного оборудования и теплоизоляции ограждающих конструкций соответствует их оптимальным характеристикам, позволяющим минимизировать затраты на последующую эксплуатацию сооружения (рис. 2).

Как видно из анализа рис. 2, среднее снижение приведенных затрат составляет около 14%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При эксплуатации сооружений реконструкция технических систем и ограждающих конструкций, составляющих единую энергетическую систему, должна проводиться с одновременным учетом всех факторов, определяющих затраты на эксплуатацию сооружения.

Применение метода термозкономики позволяет получить экономически обоснованное однозначное решение по реконструкции сооружения с определением оптимальных затрат на модернизацию элементов отопительного оборудования и теплоизоляцию ограждающих конструкций.

Реализация полученного решения позволит привести энергоэффективность сооружения в соответствие с современными требованиями [8–12] и повысить эффективность эксплуатации ИВТ путем повышения эффективности эксплуатации сооружения как средства эксплуатации изделий военной техники.

Список используемых источников

1. ГОСТ РВ 0101-001-2007. Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2007. – 23 с.
2. Авсюкевич Д.А., Миргородский А.Н., Ниезова С.Е. Повышение эффективности эксплуатации сооружений командного пункта на основе термозкономического метода // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 71–75.
3. Термозкономический метод обеспечения требуемых тепловых режимов эксплуатации специальных сооружений / Д.А. Авсюкевич, А.Н. Миргородский, С.Н. Буяков, С.Е. Ниезова // Специальные сооружения и объекты: актуальные проблемы изысканий, строительства и эксплуатации: сб. научных статей межвузовской научно-практич. конф. – СПб: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2017. – С. 117–121.
4. Оптимизация параметров функционирования системы отопления и теплозащиты зданий и сооружений на основе термозкономического метода / Д.А. Авсюкевич, С.Н. Буяков, А.В. Литвинюк, А.Н. Миргородский // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 7–13.
5. Табунициков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
6. Оносовский В.В. Моделирование и оптимизация холодильных установок: учеб. пособие. – Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1990. – 206 с.
7. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Энергетический метод и его приложения / под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
8. СП 131.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* «Строительная климатология». – М.: Минрегион России, 2012. – 109 с.
9. СП 50.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». – М.: Минрегион России, 2012. – 108 с.

10. СП 60.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» [взамен СНиП 41-01-2003]. – М.: Минрегион России, 2012.
11. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. – М.: Минэнерго РФ, 2009. – 117 с.
12. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: закон Российской Федерации от 23.11.2009 № 261-ФЗ // Российская газета. – 2009. – № 5050.

Е.В. Копкин,
доктор техн. наук, доцент;
Д.В. Попов;
В.А. Чикуров,
кандидат техн. наук, доцент

ЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА МНОГОЗНАЧНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ ИХ ЦЕННОСТИ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

В статье предложен простой в вычислительном отношении эвристический алгоритм, позволяющий выбрать минимальную совокупность проверок диагностических признаков, имеющих многозначную форму представления, обеспечивающую наибольшее значение показателя ценности диагностической информации, получаемой в процессе оценивания технического состояния объекта.

Ключевые слова: техническое состояние, диагностический признак, ценность диагностической информации.

ВВЕДЕНИЕ

Повсеместное усложнение аппаратного состава и логики функционирования существующих и проектируемых технических объектов, особенно тех, которые обладают свойствами автономного функционирования, приводит к ужесточению требований к качеству их диагностического обеспечения. Удовлетворение этих требований обеспечивается путем создания автоматизированных систем, решающих задачи поддержки принятия решений о техническом состоянии (ТС) объекта.

Существующие в настоящее время технологии принятия решений о ТС основаны, как правило, на опыте и квалификации экспертов-специалистов, которые при обнаружении нестандартных ситуаций должны оперативно выдавать свои рекомендации об их возможных причинах, чтобы своевременно подготовить программу для восстановления работоспособности объекта.

При этом в большей степени автоматизированы лишь процессы обработки измерительной информации, а процессы ее анализа базируются преимущественно на анализе эксплуатационной документации и имеют недостаточную степень автоматизации.

Большую часть измерительной информации, подлежащей обработке и анализу, можно воспринимать как диагностическую, при этом учитывается, в основном, ее синтаксическая составляющая, а семантическая и прагматическая части используются недостаточно. Между тем нас интересует не столько количественный аспект измерительной информации, которая по определению избыточна, сколько ценность (полезность) этой информации для определения ТС, т. е. интерпретация этой информации, выделение из нее причинно-следственных связей и практическое использование для достижения цели.

Вопросами ценности информации научное сообщество занимается на протяжении последних 60 лет [1–5]. Однако использование различных мер ценности информации применительно к решению задач оценивания ТС объектов в течение длительного времени не находило своего применения, за исключением отдельных работ [6–9]. Предложенные в этих работах алгоритмы, в том числе оптимальные, позволяют определять любое из заданных ТС объекта таким образом, чтобы выбранный показатель оптимизации (ценность или полезность диагностической информации) принимал максимальное значение. Однако оптимизация требует значительных вычислительных затрат. В связи с этим очевидны актуальность и практическая значимость разработки достаточно простого в вычислительном отношении

эвристического алгоритма, позволяющего определять ТС объекта на основе использования показателя ценности диагностической информации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ ЭВРИСТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ВЫБОРА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

При постановке и решении задачи воспользуемся известными агрегированными моделями объекта и процесса анализа (M_o и M_n), описанными в работе [10] и представленными кортежами:

$$M_o = \langle \mathbf{S}, \Pi, S, P, \Phi \rangle, \quad (1)$$

$$M_n = \langle \mathbf{S}, \hat{\Pi}, \Omega, \mathbf{P} \rangle, \quad (2)$$

в состав которых включены:

– множество подлежащих распознаванию технических состояний $\mathbf{S} = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$;

– множество несущих информацию о ТС объекта признаков $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$, которые доступны для измерения и являются параметрами диагностируемого объекта или некоторыми функциями от них;

– множество $S = \{s_{ij} \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$, элементы которого s_{ij} означают наиболее вероятные (модельные) значения диагностического признака $\pi_j \in \Pi$ для объекта, находящегося в ТС $S_i \in \mathbf{S}$;

– множество $P = \{P(S_i) \mid i = \overline{1, m}\}$ вероятностей ТС $S_i \in S$, образующих полную группу несовместных событий, т. е. $\sum_{i=1}^m P(S_i) = 1$;

– отображение $\Phi: \mathbf{S} \times \Pi \rightarrow S$, устанавливающее взаимосвязь между множествами \mathbf{S} , Π и S , задаваемое в виде так называемой таблицы состояний, строками которой являются ТС $S_i \in \mathbf{S}$ ($i = \overline{1, m}$), столбцами – признаки $\pi_j \in \Pi$ ($j = \overline{1, n}$), а в ячейках находятся модельные значения s_{ij} ;

– множество проверок $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j \mid j = \overline{1, n}\}$ диагностических признаков;

– множество $\Omega = \{R_k \subseteq \mathbf{S} \mid k = \overline{1, N}\}$ информационных состояний (ИС) процесса анализа, необходимое для учета исходной неопределенности ТС объекта, подлежащего распознаванию;

– множество $\mathbf{P} = \{P(R_k) \mid R_k \in \Omega\}$ вероятностей анализируемых информационных состояний.

Кроме того, может быть задано множество $C = \{c(\hat{\pi}_j) \mid j = \overline{1, n}\}$, элементами которого являются цены (затраты) на выполнение проверок.

Информационные состояния $R_k \in \Omega$ являются виртуальными, характеризуют неопределенность ТС объекта и представляют собой подмножества множества \mathbf{S} , различающиеся по количеству содержащихся в них элементов. Будем отличать конечные ИС $R_i = \{S_i\}$ ($i = \overline{1, m}$), являющиеся одноэлементными множествами, от неконечных ИС $R_k \subseteq \mathbf{S}$ ($k = \overline{m+1, N}$), для которых $2 \leq \text{card}\{R_k\} \leq m$. Начальное (исходное) ИС $R_k = \mathbf{S}$ будем анализировать отдельно.

Весь интервал возможных вариаций каждого параметра $\pi_j \in \Pi$ можно разделить на подынтервалы, характеризующие уровни представления этого параметра. Подынтервалы, относящиеся к одному и тому же параметру, имеют идентификационные признаки (обычно это числа натурального ряда или буквы алфавита), задающие шкалу измерений параметра. Такие числа (или буквы) выступают в роли модельных значений диагностических признаков, имеющих многозначную форму представления.

В процессе выполнения проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ осуществляются измерение текущего значения y_j параметра $\pi_j \in \Pi$, сопоставление этого значения с модельными значениями $s_{ij} \in S$ и принятие решения о том, какие из ТС $S_i \in S$ идентифицируются с помощью данного параметра.

Обозначим через $s_{ij}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$ пронумерованные порядковыми номерами v ($v = \overline{1, \omega_{kj}}; 2 \leq \omega_{kj} < m$) возможные градации модельных значений s_{ij} параметра $\pi_j \in \Pi$.

Каждая проверка $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$, выполняемая в ИС R_k , имеет конечное число ω_{kj} возможных исходов с порядковыми номерами $v = \overline{1, \omega_{kj}}$.

Случайное событие ($y_j = s_{ij}^v$), $v = \overline{1, \omega_{kj}}$, является исходом проверки. Количество ω_{kj} градаций модельных значений параметра π_j совпадает с количеством исходов проверки, поэтому конкретный исход проверки с номером v обозначим $\hat{\pi}_j^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$.

Процесс анализа ТС при выполнении проверки $\hat{\pi}_j$ случайным образом переходит из некоторого ИС $R_k \subseteq S$ в одно из ИС $R_{kj}^v \subset R_k (v = \overline{1, \omega_{kj}})$, реализуя отображение

$$\hat{\pi}_j : R_k \rightarrow R_{kj}^v, \text{ если } y_j = s_{ij}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}}), \quad (3)$$

где $R_{kj}^v = \{S_i / S_i \in R_k, \hat{\pi}_j^v = s_{ij}^v\}; \text{card}\{R_{kj}^v\} < \text{card}\{R_k\}; \bigcup_{v=\overline{1, \omega_{kj}}} R_{kj}^v = R_k$.

Вероятность $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ исхода проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$, т. е. вероятность получения ИС R_{kj}^v из ИС R_k , можно вычислить, используя выражение

$$P_k(\hat{\pi}_j^v) = P(R_{kj}^v / R_k) = \frac{P(R_{kj}^v)}{P(R_k)} = \frac{\sum_{S_i \in R_{kj}^v} P(S_i)}{\sum_{S_i \in R_k} P(S_i)} (v = \overline{1, \omega_{kj}}). \quad (4)$$

В общем случае для распознавания конкретного ТС объекта, т. е. для того, чтобы из начального ИС $R_k = S$ достичь одно из конечных ИС $R_i = \{S_i\}$, требуется выполнить отображение (3) несколько раз, применяя при этом разные проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$, которые в совокупности составляют упорядоченное подмножество $\hat{\Pi}_i \subseteq \hat{\Pi}$, такое, что

$$\hat{\Pi}_i = \left\{ \hat{\pi}_j \mid \hat{\pi}_j \in \hat{\Pi} : \forall S_i \in S, \forall S_f \in S \setminus \{S_i\}, s_{ij} \neq s_{if} \right\}. \quad (5)$$

Подмножества $\hat{\Pi}_i \subseteq \hat{\Pi}$ являются упорядоченными, поскольку входящие в них проверки размещены по порядку их выполнения в процессе распознавания ТС. Для того чтобы определить i -е ТС объекта, требуется проведение каждой из проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_i$.

Множество проверок $\hat{\Pi}^* = \bigcup_i \hat{\Pi}_i$ в сочетании с правилами их выполнения образует гибкую программу анализа (ГПА) ТС объекта, которая определяет состав и порядок выполнения проверок для определения всех известных ТС $S_i \in S (i = \overline{1, m})$.

Гибкая программа анализа ТС представляется ориентированным графом G . Он содержит начальную вершину – ИС $R_k = \mathbf{S}$ и m конечных вершин $R_i = \{S_i\}$. Результаты $\hat{\pi}_j^v$ проверок, выполняемых в ИС R_k , являются дугами графа. Каждая ветвь G_i графа G приводит к конкретному ТС S_i ($i = \overline{1, m}$). С учетом заданных исходных данных требуется:

1. Построить ГПА ТС объекта на основе использования показателя V ценности диагностической информации, получаемой в процессе принятия решения о ТС при выполнении проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$;

2. Определить подмножество $\hat{\Pi}^* \subseteq \hat{\Pi}$ проверок, обеспечивающих полную наблюдаемость ТС объекта анализа и максимальное значение показателя V согласно условию

$$\forall S_i \in \mathbf{S}, S_f \in \mathbf{S} \setminus \{S_i\} \exists \hat{\Pi}^* \subseteq \hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j | j = \overline{1, n}\} : \exists V = \max_{\hat{\Pi}^* \subseteq \hat{\Pi}} \{V(\hat{\Pi}^*)\}.$$

ПОСТРОЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКОЙ ГПА ТС ОБЪЕКТА

Сущность наиболее простой, так называемой «интуитивной» или «эвристической», стратегии определения технического состояния заключается в том, что выбор наилучшей проверки $\hat{\pi}_j$ в каждом из рассматриваемых ИС R_k осуществляется исходя из наибольшего значения показателя $V_k(\hat{\pi}_j)$ ценности получаемой диагностической информации. Сначала выбирается наиболее «ценная» проверка для начального ИС $R_k = \mathbf{S}$, а затем – для каждого из ее исходов, пока не будут получены все конечные ИС $R_i = \{S_i\}$. При этом проверка $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ в ИС R_k должна быть такой, чтобы она позволяла отличить хотя бы одно ТС, входящее в состав ИС R_k , от других ТС, т. е. допустимой. Множество $\hat{\Pi}_k$ допустимых в ИС R_k проверок определяется в соответствии с условием

$$\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k, \text{ если } (\exists S_i, S_f \in R_k) : (s_{ij} \neq s_{jf}). \quad (6)$$

Проверка $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$, выполняемая в ИС R_k , частично или полностью снимает исходную неопределенность ТС объекта. Иначе говоря, проверка $\hat{\pi}_j$ является средством получения, а ИС R_k – источником диагностической информации.

Ценность информации в трактовке Р.Л. Стратоновича [3] определяется разностью априорных (до получения информации) и апостериорных (после ее получения) «потерь», которые возникают в процессе достижения цели.

В процессе определения ТС объекта осуществляется анализ диагностической информации, получение которой сопряжено с некоторыми потерями, измеряемыми в единицах каких-либо затрачиваемых ресурсов [8, 9]. Эти потери тоже можно трактовать как априорные и апостериорные (до выполнения проверок и после их выполнения). Тогда разностью априорных и апостериорных средних потерь, получаемых при определении ТС объекта, можно оценить ценность анализируемой диагностической информации.

Средние априорные «потери» (до проверки $\hat{\pi}_j$ в ИС R_k) оцениваются выражением

$$L(R_{kj}^u) = P(R_{kj}^1)\beta_1 + P(R_{kj}^2)\beta_2 + \dots + P(R_{kj}^{u-1})\beta_{u-1} + P(R_{kj}^u)\alpha + P(R_{kj}^{u+1})\beta_{u+1} + \\ + P(R_{kj}^{u+2})\beta_{u+2} + \dots + P(R_{kj}^{\omega_{kj}})\beta_{\omega_{kj}} = P(R_{kj}^u)\alpha + \sum_{R_{kj}^w \in R_k \setminus \{R_{kj}^u\}} P(R_{kj}^w)\beta_w,$$

в котором R_{kj}^u ($u = \overline{1, \omega_{kj}}$) – априорные гипотезы относительно возможных результатов проверки; $P(R_{kj}^u)$ – априорные вероятности гипотез; $\alpha \geq 0$ и $\beta_w \geq \alpha$ ($w = \overline{1, \omega_{kj} \setminus \{u\}}$) – «потери» на

распознавание ТС, когда в результате проверки $\hat{\pi}_j$ ИС $R_{kj}^v = R_{kj}^u$ и $R_{kj}^v \neq R_{kj}^u$ соответственно. После проверки $\hat{\pi}_j$ в ИС R_k средние апостериорные «потери» можно оценить выражением

$$L(R_{kj}^v/R_{kj}^u) = P(R_{kj}^1)\beta_1 + P(R_{kj}^2)\beta_2 + \dots + P(R_{kj}^{v-1})\beta_{v-1} + P(R_{kj}^v)\alpha + P(R_{kj}^{v+1})\beta_{v+1} + \\ + P(R_{kj}^{v+2})\beta_{v+2} + \dots + P(R_{kj}^{\omega_{kj}})\beta_{\omega_{kj}} = P(R_{kj}^v)\alpha + \sum_{R_{kj}^w \in R_k \setminus \{R_{kj}^v\}} P(R_{kj}^w)\beta_w,$$

где R_{kj}^v – апостериорные гипотезы относительно результатов проверки,

$$R_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}});$$

$P(R_{kj}^v)$ – апостериорные вероятности этих гипотез.

Ценность диагностической информации, получаемой с появлением исхода R_{kj}^v , при условии выбора гипотезы R_{kj}^u в качестве основной, определяется выражением

$$V_k(\hat{\pi}_j^{v,u}) = L(R_{kj}^u) - L(R_{kj}^v/R_{kj}^u); v, u = \overline{1, \omega_{kj}}. \quad (7)$$

После выполнения проверки подтверждение основной гипотезы R_{kj}^u (если $R_{kj}^u = R_{kj}^v$) или ее отклонение в пользу другой гипотезы (если $R_{kj}^u \neq R_{kj}^v$) осуществляется с вероятностью $P_k(\hat{\pi}_j^v)$.

В зависимости от исхода R_{kj}^v выполняемой проверки и от того, какая из гипотез R_{kj}^u принята в качестве основной, значение показателя $V_k(\hat{\pi}_j^{v,u})$ будет изменяться.

Среднее значение ценности диагностической информации, содержащейся в проверке $\hat{\pi}_j$, выполненной в ИС R_k , можно вычислить, усреднив показатель (7) сначала по числу ω_{kj} гипотез R_{kj}^u , а затем по числу исходов R_{kj}^v . Значения вероятностей $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ используются при этом в качестве весовых коэффициентов. Для вычисления значения показателя $V_k(\hat{\pi}_j)$ будем использовать формулу

$$V_k(\hat{\pi}_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} \sum_{u=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) V_k(\hat{\pi}_j^{v,u}), \quad (8)$$

которая достаточно просто преобразуется к следующему виду:

$$V_k(\hat{\pi}_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P(R_{kj}^v)(\beta_v - \alpha) [\omega_{kj} P_k(\hat{\pi}_j^v) - 1]. \quad (9)$$

С целью упрощения расчетов преобразуем выражение (9) к векторно-матричной форме. Для этого сформируем векторы:

$$P_{R_{kj}(\omega_{kj})} = [P(R_{kj}^1) \quad P(R_{kj}^2) \quad \dots \quad P(R_{kj}^{\omega_{kj}})]^T, \quad (10)$$

$$P_{kj(\omega_{kj})} = [P_k(\hat{\pi}_j^1) \quad P_k(\hat{\pi}_j^2) \quad \dots \quad P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}})]^T, \quad (11)$$

$$I_{kj(\omega_{kj})} = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T \quad (12)$$

и матрицу

$$\mathbf{L}_{kj(\omega_{kj})} = \begin{bmatrix} \beta_1 - \alpha & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_2 - \alpha & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \beta_{\omega_{kj}} - \alpha \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Тогда вместо формулы (9) можно использовать выражение

$$V_k(\hat{\pi}_j) = P_{R_{kj}(\omega_{kj})}^T \mathbf{I}_{kj[\omega_{kj}]} \left[\omega_{kj} P_{kj(\omega_{kj})} - I_{kj(\omega_{kj})} \right]. \quad (14)$$

Пока не определен способ вычисления «потерь» α и β_v , составляющих диагональные элементы матрицы (13), можно упростить задачу, приняв допущение о том, что при любом исходе проверки $\alpha = 0$, а $\beta_v = 1$ ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$). В этом случае формула (14) преобразуется к виду

$$V_k(\hat{\pi}_j) = P_{R_{kj}(\omega_{kj})}^T \mathbf{I}_{kj[\omega_{kj}]} \left[\omega_{kj} P_{kj(\omega_{kj})} - I_{kj(\omega_{kj})} \right], \quad (15)$$

где $\mathbf{I}_{kj[\omega_{kj}]}$ – единичная матрица.

Усреднение показателя $V_k(\hat{\pi}_j)$ по множеству $\Omega_k \subset \Omega$ всех неконечных ИС $R_k \subseteq \mathbf{S}$, входящих в состав ГПА ТС объекта, дает оценку среднего значения ценности $V(G)$ диагностической информации, получаемой в процессе определения ТС объекта по уже построенной программе, т. е.

$$V(G) = \sum_{R_k \in \Omega_k} P(R_k) V_k(\hat{\pi}_j). \quad (16)$$

Подстановка в формулу (16) выражений (9) или (14) дает следующие равнозначные результаты:

$$V(G) = \sum_{R_k \in \Omega_k} \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P(R_{kj}^v) (\beta_v - \alpha) \left[\omega_{kj} P(R_{kj}^v) - P(R_k) \right]; \quad (17)$$

$$V(G) = \sum_{R_k \in \Omega_k} \left[P(R_k) \right]^2 \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) (\beta_v - \alpha) \left[\omega_{kj} P_k(\hat{\pi}_j^v) - 1 \right]. \quad (18)$$

Если в формулу (16) подставить выражение (15), то получим

$$V(G) = \sum_{R_k \in \Omega_k} \left[P(R_k) \right]^2 P_{R_{kj}(\omega_{kj})}^T \mathbf{I}_{kj[\omega_{kj}]} \left[\omega_{kj} P_{kj(\omega_{kj})} - I_{kj(\omega_{kj})} \right]. \quad (19)$$

Выбор наиболее «ценной» проверки в каждом из рассматриваемых ИС $R_k \subseteq \mathbf{S}$, осуществляется из условия

$$\hat{\pi}_j \in \text{Arg max}_{\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_k} \{ V_k(\hat{\pi}_s) \}. \quad (20)$$

Процедура построения эвристической ГПА ТС объекта на основе использования показателя ценности диагностической информации состоит из последовательного выполнения следующих этапов:

1. Получим, согласно отображению (3), возможные результаты R_{kj}^v ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$) проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$, выполняемой в начальном ИС $R_k = \mathbf{S}$ и определим по формуле (4) значения вероятностей $P(R_{kj}^v)$ и $P_k(\hat{\pi}_j^v)$.

2. Используя выражения (10), (11) и (12), построим векторы $P_{R_{kj}(\omega_{kj})}$, $P_{kj(\omega_{kj})}$ и $I_{kj(\omega_{kj})}$ соответственно, а также единичную матрицу $\mathbf{I}_{kj[\omega_{kj}]}$.

3. По формуле (15) определим величину показателя $V_k(\hat{\pi}_j)$ для проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в начальном ИС $R_k = \mathbf{S}$.

4. Выполним этапы 1, 2 и 3 для остальных проверок $\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_k \setminus \{ \hat{\pi}_j \}$ в начальном ИС $R_k = \mathbf{S}$ и получим соответствующие величины $V_k(\hat{\pi}_s)$.

5. Проверку $\hat{\pi}_j$, при выполнении которой выполняется условие (20), выберем в качестве наиболее «ценной» для начального ИС $R_k = S$.

6. Определим наиболее «ценные» проверки для всех ИС R_{kj}^v (кроме конечных), являющихся исходами проверки $\hat{\pi}_j$, выбранной на этапе 5. Для этого рассмотрим каждое из ИС R_{kj}^v как новое исходное ИС $R_k \subset S$ и повторим выполнение этапов 1–5.

7. Завершим вычисления при достижении всех конечных ИС $R_i = \{S_i\} (i=\overline{1, m})$.

8. Построим ориентированный граф G , отображающий синтезированную ГПА. Сформируем для каждого ТС $S_i \in S (i=\overline{1, m})$ объекта упорядоченные по очередности их выполнения подмножества $\hat{\Pi}_i$ проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_i$, необходимых для распознавания этих состояний.

На рис. 1. представлена схема эвристического алгоритма, реализующего ГПА ТС объекта по показателю ценности диагностической информации для дискретных диагностических признаков.

Подготовительный этап работы алгоритма охватывает модули 1 и 2. *Модуль 1* – начало алгоритма. К исходным данным, ввод которых осуществляется в *модуле 2*, относятся: $S = \{S_i | i=\overline{1, m}\}$ – массив возможных ТС объекта; $\Pi = \{\pi_j | j=\overline{1, n}\}$ – массив диагностических признаков, обеспечивающих попарную различимость ТС $S_i \in S$; $S = \{s_{ij} | i=\overline{1, m}; j=\overline{1, n}\}$ – массив модельных значений диагностических признаков, характеризующих наиболее вероятный исход проверки $\hat{\pi}_j$ в ТС S_i ; $P = \{P(S_i) | i=\overline{1, m}\}$ – массив вероятностей ТС S_i ; $C = \{c(\hat{\pi}_j) | j=\overline{1, n}\}$ – массив затрат на выполнение проверок $\hat{\pi}_j$, элементами которого являются цены проверок признаков в сопоставимых (условных) единицах.

Модуль 3 – формирование номера для начального ИС в виде множества индексов ТС S_i , входящих в его состав.

Модуль 4 – выбор исходного ИС $R_k = S$.

Модуль 5 – формирование, в соответствии с условием (6), множества $\hat{\Pi}_k$ допустимых проверок для ИС R_k .

Модуль 6 – модуль 18 – цикл анализа проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$.

Модуль 7 – в модуле 7 для ИС R_k в соответствии с отображением (3) выполняется проверка $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$, и получаются ее исходы $R_{kj}^v (v=\overline{1, \omega_{kj}})$.

Модули 8–12 образуют цикл анализа исходов проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в ИС R_k .

В модулях 9 и 10 с помощью формулы (4) вычисляются вероятности $P(R_{kj}^v)$ и $P(\hat{\pi}_j^v)$, соответственно.

Модуль 11 – вычисление разности в потерях, получаемых при выполнении проверки, когда основная гипотеза подтверждается или отклоняется. Как уже отмечалось, в рассматриваемом случае эта величина приравнена к единице.

Модули 13–16 – в модулях с 13 по 16 формируются векторы $R_{kj\langle\omega_{kj}\rangle}$, $P_{kj\langle\omega_{kj}\rangle}$, $I_{kj\langle\omega_{kj}\rangle}$ и матрица $L_{kj[\omega_{kj}]}$.

Модуль 17 – вычисление по формуле (14) значения показателя $V_k(\hat{\pi}_j)$ ценности диагностической информации.

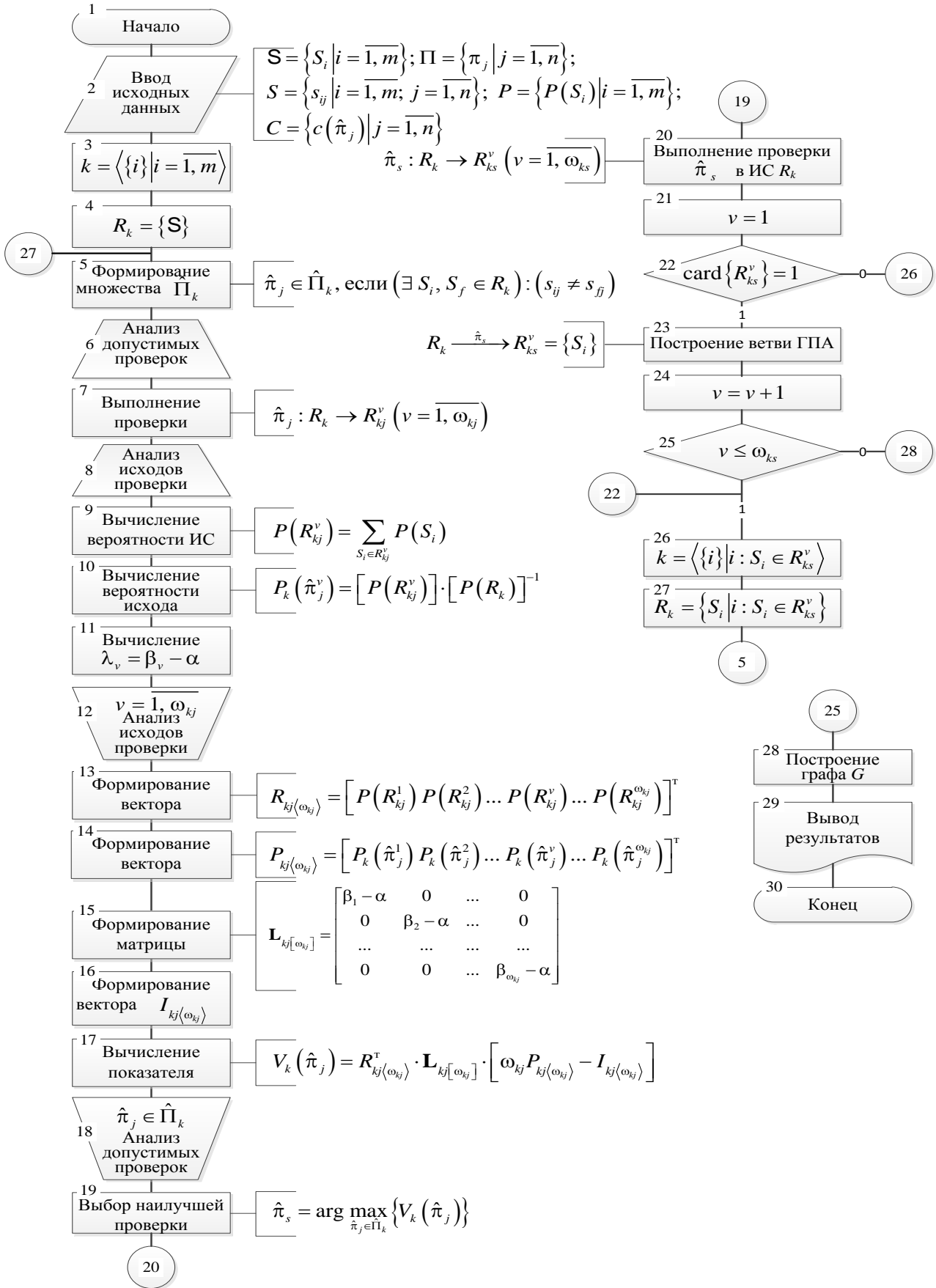


Рис. 1. Схема эвристического алгоритма построения ГПА ТС объекта по показателю ценности диагностической информации

Модуль 18 – анализ допустимых проверок.

Модуль 19 – выбор наиболее «ценной» проверки $\hat{\pi}_s$ в соответствии с условием (19).

Модуль 20 – определение исходов проверки $\hat{\pi}_s$, выбранной в модуле 19, при ее выполнении в ИС R_k .

Модуль 21 – выбор первого исхода проверки $\hat{\pi}_s$, выполненной в модуле 20.

Модуль 22 – проверяет условие о том, является ли рассматриваемый исход конечным, т. е. $\text{card}\{R_{ks}^v\} = 1$. Если условие выполняется, то осуществляется переход к модулю 23, если нет – к модулю 26.

Модуль 23 – строит ветвь ГПА, переводящую ИС R_k в конечное состояние $R_{ks}^v = R_i = \{S_i\}$.

Модуль 24 – в модуле 24 выбирается для рассмотрения следующий исход проверки $\hat{\pi}_s$, выполненной в ИС R_k .

Модуль 25 – проверяет условие о том, все ли исходы проверки $\hat{\pi}_s$, выполненной в ИС R_k , рассмотрены. Если условие $v \leq \omega_{ks}$ выполняется, осуществляется переход к модулю 26, если нет – к модулю 28.

Модуль 26 – формирование для ИС R_{ks}^v собственного номера k .

Модуль 27 – присвоение номера k , сформированного в модуле 26, информационному состоянию R_{ks}^v .

Модуль 28 – построение ориентированного графа G для отображения синтезированной ГПА.

Модуль 29 – выводит результаты работы алгоритма в виде упорядоченных подмножеств проверок $\hat{\Pi}_i (i=\overline{1, m})$, необходимых для распознавания всех заданных ТС $S_i (i=\overline{1, m})$.

Пример. Построим ГПА ТС объекта по критерию максимума ценности диагностической информации (по мере Р.Л. Стратоновича) на основе предложенного эвристического алгоритма.

Пусть модель M_0 объекта анализа технического состояния задана в виде таблицы состояний (табл. 1), содержащей все элементы модели (1), а также цены $c(\hat{\pi}_j)$ проверок признаков (в условных единицах).

Таблица 1

Таблица состояний объекта анализа

| ТС S_i | Диагностические параметры π_j | | | | | | $P(S_i)$ |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | π_1 | π_2 | π_3 | π_4 | π_5 | π_6 | |
| S_1 | a | a | a | a | a | a | 0,16 |
| S_2 | b | b | a | c | b | a | 0,07 |
| S_3 | a | b | c | b | b | a | 0,12 |
| S_4 | a | a | b | d | b | b | 0,11 |
| S_5 | a | a | c | a | a | c | 0,08 |
| S_6 | b | b | b | b | a | c | 0,09 |
| S_7 | b | a | c | d | b | b | 0,06 |
| S_8 | a | b | c | a | b | c | 0,13 |
| S_9 | a | a | b | c | a | b | 0,10 |
| S_{10} | b | a | a | d | a | c | 0,08 |
| $c(\hat{\pi}_j)$, усл. ед. | 2 | 3 | 2,5 | 5 | 3,5 | 4 | |

Решение.

1. Получим исходы одной из проверок, допустимых в начальном ИС R_{1-10} , например $\hat{\pi}_3$, выполнив отображение (3), и вычислим их вероятности:

$$\hat{\pi}_3 : R_{1-10} \rightarrow \begin{cases} R_{1-10;3}^1 = \{S_1, S_2, S_{10}\} = R_{1,2,10}, \text{ если } y_3 = a; \\ R_{1-10;3}^2 = \{S_4, S_6, S_9\} = R_{4,6,9}, \text{ если } y_3 = b; \\ R_{1-10;3}^3 = \{S_3, S_5, S_7, S_8\} = R_{3,5,7,8}, \text{ если } y_3 = c. \end{cases}$$

Вероятности $P(R_{1-10;3}^v)$ и $P_{1-10}(\hat{\pi}_3^v)$, $v = \{1; 2; 3\}$, определим, используя формулу (4), учитывая, что для начального ИС $P(R_{1-10;3}^v) = P_{1-10}(\hat{\pi}_3^v)$:

$$\begin{aligned} P(R_{1-10;3}^1) &= P(S_1) + P(S_2) + P(S_{10}) = 0,31; & P_{1-10}(\hat{\pi}_3^1) &= 0,31; \\ P(R_{1-10;3}^2) &= P(S_4) + P(S_6) + P(S_9) = 0,3; & P_{1-10}(\hat{\pi}_3^2) &= 0,3; \\ P(R_{1-10;3}^3) &= P(S_3) + P(S_5) + P(S_7) + P(S_8) = 0,39; & P_{1-10}(\hat{\pi}_3^3) &= 0,39. \end{aligned}$$

2. Сформируем векторы $P_{R_{1-10;3}\langle 3 \rangle}$, $P_{1-10;3\langle 3 \rangle}$ и $I_{1-10;3\langle 3 \rangle}$ по формулам (10)–(12) соответственно, а также единичную матрицу $\mathbf{I}_{1-10;3\langle 3 \rangle}$:

$$\begin{aligned} P_{R_{1-10;3}\langle 3 \rangle} &= [0,31 \quad 0,3 \quad 0,39]^T; & P_{1-10;3\langle 3 \rangle} &= [0,31 \quad 0,3 \quad 0,39]^T; & I_{1-10;3\langle 3 \rangle} &= [1 \quad 1 \quad 1]^T; \\ \mathbf{I}_{1-10;3\langle 3 \rangle} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

3. Подставим полученные значения в формулу (15) и вычислим величину показателя $V_{1-10}(\hat{\pi}_3)$ для проверки $\hat{\pi}_3$, выполняемой в начальном ИС $R_{1-10} = \mathbf{S}$:

$$V_{1-10}(\hat{\pi}_3) = P_{R_{1-10;3}\langle 3 \rangle}^T \mathbf{I}_{1-10;3\langle 3 \rangle} [3P_{1-10;3\langle 3 \rangle} - I_{1-10;3\langle 3 \rangle}] = 0,0146.$$

4. Вычислим значения показателей $V_{1-10}(\hat{\pi}_s)$ ценности информации для оставшихся нерассмотренными в начальном ИС проверок $\hat{\pi}_s$ ($s \in \{1; 2; 4; 5; 6\}$), повторив для них выполнение этапов 1, 2 и 3. В результате получим:

$$\begin{aligned} V_{1-10}(\hat{\pi}_1) &= 0,16; & V_{1-10}(\hat{\pi}_2) &= 0,0324; & V_{1-10}(\hat{\pi}_4) &= 0,0896; \\ V_{1-10}(\hat{\pi}_5) &= 0,0004; & V_{1-10}(\hat{\pi}_6) &= 0,0194. \end{aligned}$$

5. В соответствии с условием (20) наиболее «ценной» для исходного ИС R_{1-10} является проверка $\hat{\pi}_1$, имеющая следующие исходы:

$$\hat{\pi}_1 : R_{1-10} \rightarrow \begin{cases} R_{1-10;1}^1 = \{S_1, S_3, S_4, S_5, S_8, S_9\} = R_{1,3,4,5,8,9}, \text{ если } y_1 = a; \\ R_{1-10;1}^2 = \{S_2, S_6, S_7, S_{10}\} = R_{2,6,7,10}, \text{ если } y_1 = b. \end{cases}$$

6. Повторим выполнение этапов 1–5 для ИС $R_{1-10;1}^1 = R_{1,3,4,5,8,9}$ и $R_{1-10;1}^2 = R_{2,6,7,10}$, рассматривая каждое из них как новое исходное ИС, и определим для них наиболее «ценные» проверки. Результаты расчетов сведены в табл. 2. Выбираемые в рассматриваемых ИС наиболее «ценные» проверки выделены подчеркиванием.

В случае, когда для нескольких проверок максимальное значение показателя $V_k(\hat{\pi}_j)$ будет одинаковым, то в качестве наилучшей проверки можно выбрать ту, которая имеет меньшую стоимость ее выполнения, т. е. можно использовать условие

$$\hat{\pi}_j \in \text{Arg} \min_{\hat{\pi}_s \in \Pi_k} \{c(\hat{\pi}_s)\}.$$

7. Поскольку все конечные ИС $R_i = \{S_i\}$ ($i = \overline{1, 10}$) достигнуты, вычисления можно завершить.

8. Построим ГПА в виде ориентированного графа G , представленного на рис. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов показателей $V_k(\hat{\pi}_j)$ и выбора проверок

| R_k | $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$ | R_{kj}^v | $P(R_{kj}^v)$ | $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ | $V_k(\hat{\pi}_j)$ |
|-------------------|---|---------------|---------------|----------------------|--------------------|
| $R_{1,3,4,5,8,9}$ | $\hat{\pi}_2$ | $R_{1,4,5,9}$ | 0,45 | 0,6429 | 0,0571 |
| | | $R_{3,8}$ | 0,25 | 0,3571 | |
| | $\hat{\pi}_3$ | R_1 | 0,16 | 0,2286 | 0,0654 |
| | | $R_{4,9}$ | 0,21 | 0,3 | |
| | | $R_{3,5,8}$ | 0,33 | 0,4714 | |
| | $\hat{\pi}_4$ | $R_{1,5,8}$ | 0,37 | 0,5286 | 0,2909 |
| | | R_3 | 0,12 | 0,1714 | |
| | | R_4 | 0,11 | 0,1571 | |
| | | R_9 | 0,1 | 0,1429 | |
| | $\hat{\pi}_5$ | $R_{1,5,9}$ | 0,34 | 0,4857 | 0,0006 |
| | | $R_{3,4,8}$ | 0,36 | 0,5143 | |
| | $\hat{\pi}_6$ | $R_{1,3}$ | 0,28 | 0,4 | 0,0140 |
| $R_{4,9}$ | | 0,21 | 0,3 | | |
| $R_{5,8}$ | | 0,21 | 0,3 | | |
| $R_{1,5,8}$ | $\hat{\pi}_2, \hat{\pi}_5$ | $R_{1,5}$ | 0,24 | 0,6486 | 0,0327 |
| | | R_8 | 0,13 | 0,3514 | |
| | $\hat{\pi}_3, \hat{\pi}_6$ | R_1 | 0,16 | 0,4324 | 0,0068 |
| | | $R_{5,8}$ | 0,21 | 0,5676 | |
| $R_{1,5}$ | $\hat{\pi}_3, \hat{\pi}_6$ | R_1 | 0,16 | 0,6667 | 0,0267 |
| | | R_5 | 0,08 | 0,3333 | |
| $R_{2,6,7,10}$ | $\hat{\pi}_2$ | $R_{2,6}$ | 0,16 | 0,5333 | 0,0013 |
| | | $R_{7,10}$ | 0,14 | 0,4667 | |
| | $\hat{\pi}_3$ | $R_{2,10}$ | 0,15 | 0,5 | 0,0420 |
| | | R_7 | 0,06 | 0,2 | |
| | | R_6 | 0,09 | 0,3 | |
| | $\hat{\pi}_4$ | R_2 | 0,07 | 0,2333 | 0,0260 |
| | | R_6 | 0,09 | 0,3 | |
| | | $R_{7,10}$ | 0,14 | 0,4667 | |
| | $\hat{\pi}_5$ | $R_{2,7}$ | 0,13 | 0,4333 | 0,0053 |
| | | $R_{6,10}$ | 0,17 | 0,5667 | |
| | $\hat{\pi}_6$ | R_2 | 0,07 | 0,2333 | 0,0740 |
| | | R_7 | 0,06 | 0,2 | |
| $R_{6,10}$ | | 0,17 | 0,5667 | | |
| $R_{6,10}$ | $\hat{\pi}_2, \hat{\pi}_3, \hat{\pi}_4$ | R_6 | 0,09 | 0,6667 | 0,0006 |
| | | R_{10} | 0,08 | 0,3333 | |

Для распознавания всех заданных ТС $S_i \in S$ ($i = \overline{1,10}$) объекта сформируем искомые упорядоченные подмножества $\hat{\Pi}_i$ ($i = \overline{1,10}$) проверок и сведем их в табл. 3.

Таблица 3

Перечень проверок, необходимых для распознавания ТС объекта

| ТС S_i | $\hat{\Pi}_i \subset \hat{\Pi}$ | ТС S_i | $\hat{\Pi}_i \subset \hat{\Pi}$ |
|----------|--|----------|--|
| S_1 | $\hat{\Pi}_1 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2, \hat{\pi}_3\}$ | S_6 | $\hat{\Pi}_6 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_6, \hat{\pi}_3\}$ |
| S_2 | $\hat{\Pi}_2 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_6\}$ | S_7 | $\hat{\Pi}_7 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_6\}$ |
| S_3 | $\hat{\Pi}_3 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_4\}$ | S_8 | $\hat{\Pi}_8 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$ |
| S_4 | $\hat{\Pi}_4 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_4\}$ | S_9 | $\hat{\Pi}_9 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_4\}$ |
| S_5 | $\hat{\Pi}_5 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2, \hat{\pi}_3\}$ | S_{10} | $\hat{\Pi}_{10} = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_6, \hat{\pi}_3\}$ |

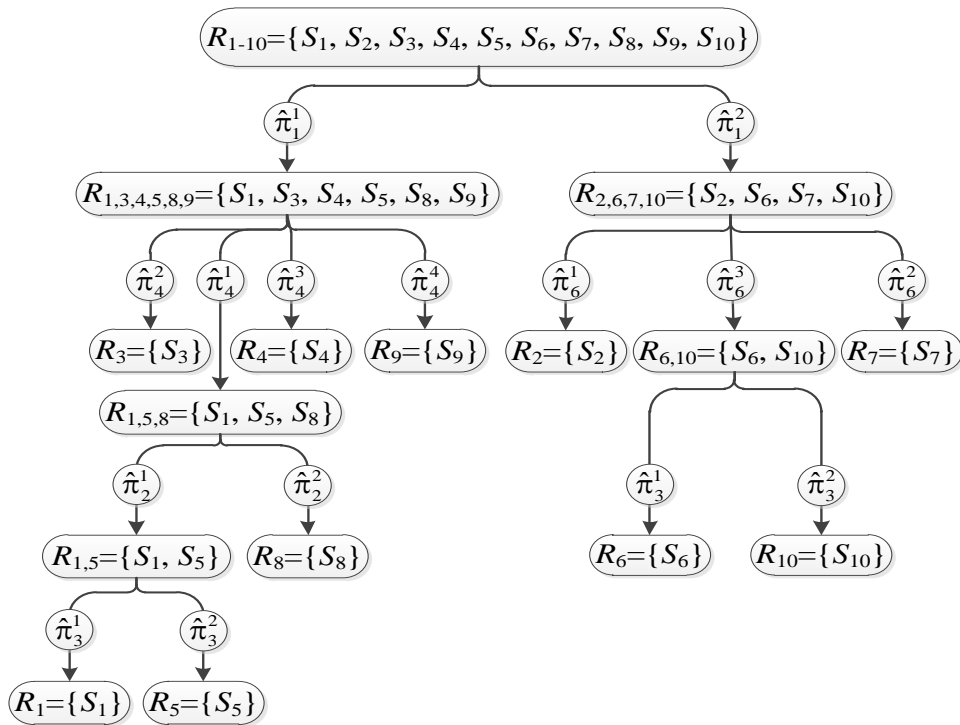


Рис. 2. ГПА ТС объекта по показателю ценности диагностической информации

Используя формулу (19), рассчитаем значение средней ценности диагностической информации, получаемой при реализации построенной ГПА. Сначала определим вероятности имеющихся в программе неконечных ИС R_k :

$$P(R_{1-10}) = \sum_{i=1}^{10} P(S_i) = 1; P(R_{1,3,4,5,8,9}) = \sum_{i \in \{1,3,4,5,8,9\}} P(S_i) = 0,7;$$

$$P(R_{2,6,7,10}) = \sum_{i \in \{2,6,7,10\}} P(S_i) = 0,3; \quad P(R_{1,5,8}) = \sum_{i \in \{1,5,8\}} P(S_i) = 0,37;$$

$$P(R_{6,10}) = \sum_{i \in \{6,10\}} P(S_i) = 0,17; \quad P(R_{1,5}) = \sum_{i \in \{1,5\}} P(S_i) = 0,24.$$

Подставим полученные значения в формулу (19) и произведем вычисление:

$$V(G) = [P(R_{1-10})]^2 P_{1-10;1(2)}^T \mathbf{I}_{1-10;1[2]} [2P_{1-10;1(2)} - I_{1-10;1(2)}] +$$

$$+ [P(R_{1,3,4,5,8,9})]^2 P_{1,3,4,5,8,9;4(4)}^T \mathbf{I}_{1,3,4,5,8,9;4[4]} [4P_{1,3,4,5,8,9;4(4)} - I_{1,3,4,5,8,9;4(4)}] +$$

$$+ [P(R_{2,6,7,10})]^2 P_{2,6,7,10;6(3)}^T \mathbf{I}_{2,6,7,10;6[3]} [3P_{2,6,7,10;6(3)} - I_{2,6,7,10;6(3)}] +$$

$$+ [P(R_{1,5,8})]^2 P_{1,5,8;2(2)}^T \mathbf{I}_{1,5,8;2[2]} [2P_{1,5,8;2(2)} - I_{1,5,8;2(2)}] +$$

$$+ [P(R_{6,10})]^2 P_{6,10;3(2)}^T \mathbf{I}_{6,10;3[2]} [2P_{6,10;3(2)} - I_{6,10;3(2)}] +$$

$$+ [P(R_{1,5})]^2 P_{1,5;3(2)}^T \mathbf{I}_{1,5;3[2]} [2P_{1,5;3(2)} - I_{1,5;3(2)}] = 0,4044.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная ГПА оказалась идентичной программе, построенной по таким же исходным данным методом динамического программирования [8]. Идентичность результатов объясняется принятием допущения о том, что разность получаемых «потерь» в виде коэффициентов $(\beta_v - \alpha)$ равна единице. При этом ценность диагностической информации зависит только от значений вероятностей исходов проверок.

Существенным достоинством предложенного алгоритма является значительное (в 6 раз для заданных исходных данных) снижение вычислительных затрат на его реализацию по сравнению с методом динамического программирования. Снижение вычислительных затрат связано с отсутствием необходимости определения всех возможных информационных состояний процесса анализа.

В качестве направления дальнейших исследований следует отметить необходимость разработки математических формализмов для учета реальных «потерь», получаемых при выполнении проверок, основываясь на данных об их стоимости.

Список используемых источников

1. Харкевич А.А. О ценности информации // Проблемы кибернетики. – 1960. – Вып. 4. – С. 53–57.
2. Бонгард М.М. Проблема узнавания. – М.: Наука, 1967. – 320 с.
3. Стратонович Р.Л. Теория информации. – М.: Сов. радио, 1975. – 424 с.
4. Корогодина В.И., Корогодина В.Л. Информация как основа жизни. – Дубна: Издательский центр «Феникс», 2000. – 208 с.
5. Шанкин Г.П. Ценность информации: Вопросы теории и приложений. – М.: Филоматис, 2004. – 128 с.
6. Дмитриев А.К., Копкин Е.В. Построение информационно-поисковой системы по критерию максимума полезности получаемой информации // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 6. – С. 46–51.

7. Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Лазутин О.Г. Выбор дискретных диагностических признаков с учетом их ценности для распознавания технических состояний объекта // *Информация и космос*. – 2015. – № 2. – С. 111–117.
8. 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. 15–31.
9. Копкин Е.В., Кобзарев И.М. Использование меры ценности информации Стратоновича для оптимизации гибких программ диагностирования технических объектов // *Труды СПИИРАН*. – 2019. – Т. 18, № 6. – С. 1434–1461.
10. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: моногр. / В.В. Мышко, А.Н. Кравцов, Е.В. Копкин и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 303 с.

С.В. Косырев,
доктор военных наук, профессор;
М.Ю. Лебедев;
Д.А. Соколов

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ НА ВОЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

В статье рассмотрен научно-методический подход к решению одной из основных задач, определенных «Стратегией экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года», по повышению уровня утилизации отходов потребления на примере военных объектов космодрома Плесецк с позиции экономической целесообразности такой деятельности для организаций, осуществляющих утилизацию отходов на территории Архангельской области.

Ключевые слова: обеспечение экологической безопасности, утилизация и снижение образования отходов, критерий, целевые показатели, экономический эффект.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из активно решаемых задач в области обеспечения экологической безопасности на федеральном и региональном уровнях является создание системы, позволяющей минимизировать количество захораниваемых отходов, максимально обеспечив при этом ресурсосбережение, повторное вовлечение в хозяйственный оборот утилизируемых компонентов отходов в качестве сырья.

Анализ текущего состояния обращения с отходами показывает, что, как правило, никаких действенных регулятивно-управленческих решений по повышению эффективности деятельности в области обращения с отходами не принимается. Подавляющая часть отходов IV–V классов опасности направляется в соответствии с утвержденными лимитами их размещения на захоронение [2].

Актуальность настоящей статьи определяется тем, что в перечень организаций – источников образования отходов для объектов отрасли промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов – включены объекты военно-промышленного комплекса [космодромы, аэродромы, объекты и (или) полигоны]. Следовательно, достижение целей, определенных «Стратегией развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» [2] (далее – «Стратегия...»), возможно только при организации эффективного межведомственного, межотраслевого взаимодействия органов управления федерального, регионального и местного уровней. При этом требования приказов Министра обороны Российской Федерации, регламентирующих обеспечение экологической безопасности военных объектов, не определяют критериев и показателей оценки результатов деятельности по сокращению количества несортированных отходов и по ресурсосбережению.

Недостаточное количество отходов, поступающих на мусоросортировочные комплексы (от 5 до 13%) приводит к тому, что большинство предприятий, ориентированных на районный, городской или региональный рынок сырья, загружены не более чем на 50–60% уровня проектной мощности [2]. Причинами такой ситуации, по оценкам товаропроизводителей, являются отсутствие налаженной системы сбора отходов, высокие технологические затраты, низкое качество сырья, увеличивающее расходы на обработку, нестабильный спрос на продукты переработки.

СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМА ОБРАЗОВАННЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ОБЪЕКТОВ КОСМОДРОМА ПЛЕСЕЦК УВЕЛИЧЕНИЕМ ДОЛИ УТИЛИЗИРОВАННЫХ И ОБЕЗВРЕЖЕННЫХ ОТХОДОВ

Исходя из сложившихся условий, авторы статьи исследуют организацию обращения с твердыми коммунальными отходами (далее – отходы) в районе дислокации 1 Государственного испытательного космодрома (ГИК) Российской Федерации и предлагают подходы к совершенствованию методов сбора и обработки отходов на территории Архангельской области. Здесь эффективным решением может стать организация раздельного сбора отходов от военных объектов с учетом функционирования приемных пунктов, в том числе передвижных, с последующей утилизацией таких отходов [2].

На территории Архангельской области расположено 305 объектов размещения отходов и функционируют 22 лицензированных организации обезвреживания отходов, осуществляющих сбор, транспортировку, обработку, утилизацию, обезвреживание, размещение отходов I–IV классов опасности. Плесецкий муниципальный район ежедневно производит 426,87 кубических метров твердых коммунальных отходов (ТКО) [3]. При этом расчетная доля отходов от использования потребительских товаров личным составом ГИК и членами их семей составляет 19,68%. В соответствии с региональной программой [3] ожидаемым конечным результатом на перспективу до 2030 года установлены доли обращения отходов от общего объема отходов: обезвреженных – 7,5%; утилизированных – 12,1%. К 2030 году планируется обеспечить охват населения региональной системой очистки на 99%. Нарращивание целевых показателей в целях сокращения объемов захоронения отходов по годам определено администрацией Архангельской области (табл. 1) [3].

Таблица 1

Ожидаемое изменение объемов обработки, обезвреживания и утилизации отходов

| Доля ТКО в общем объеме, % | Срок | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
| Обрабатываемых | 36,2 | 40,4 | 21,9 | 23,5 | 80,3 | 80,9 | 80,9 |
| Обезвреживаемых | 2,6 | 6 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 |
| Утилизируемых | 5,4 | 6 | 3,2 | 3,6 | 12,1 | 12,1 | 12,1 |
| Направляемых на размещение (захоронение) | 92 | 88 | 89,2 | 88,9 | 80,4 | 80,4 | 80,4 |

Достижение намеченных результатов следует ожидать при эффективном привлечении населения региона, в том числе персонала ГИК, к участию в организованных мероприятиях обработки отходов (предварительная подготовка к дальнейшей утилизации [1]), при этом необходимо учитывать особенности размещения производств по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов.

По экспертным оценкам, эффективность выделения таких ценных утильных групп однородных отходов (далее – групп), как черные и цветные металлы, картон и бумага, полимеры, стекло должна составлять не менее 30% общей массы при оптимальном плече транспортирования отходов не более 50 км [2].

Объекты инфраструктуры, осуществляющие деятельность по утилизации групп отходов на территории Архангельской области, расположены от ГИК на удалении, большем желаемого, в г. Архангельске (305 км), Вельском районе (384 км) и г. Котласе (538 км). Таким образом, решение поставленных задач на территории Плесецкого района потребует реализации мероприятий по периодическому сбору обработанных отходов, организованных с привлечением органов военного управления ГИК во взаимодействии с администрацией муниципаль-

ного образования и техническими средствами организаций, осуществляющих деятельность по обращению с отходами.

Для планирования таких мероприятий необходимо оценить потенциал привлекаемого личного состава и населения по сбору необходимого количества материально-сырьевых ресурсов (МСР) для дальнейшей утилизации (переработки), характеризующий целесообразность и периодичность их проведения. Кроме того, следует установить критерий, в соответствии с которым организация, осуществляющая обезвреживание отходов, сочтет свое участие целесообразным.

Для определения потенциала по сбору обработанных отходов примем нормы накопления отходов в соответствии с [4]. При этом исходным допущением будем считать равенство ежемесячно производимых их объемов, а долю их сбора и утилизации – соответствующей существующему уровню, определенному «Стратегией...» [2]. Тогда расчет прогнозируемого количества сортированных отходов на человека за принятый период сбора может быть выполнен с использованием выражения

$$K_i^{\text{обр}}(\tau) = \frac{Q \times D_i \times U_i}{\tau}, \quad (1)$$

где $K_i^{\text{обр}}$ – возможное количество обработанных и представленных военным объектом отходов i -й группы на человека, кг/чел. × период;

Q – годовая норма (статистические данные) накопления ТКО соответствующей территории на человека, кг;

D_i – доля отходов i -й группы от общего объема ТКО;

U_i – уровень сбора отходов i -й группы, пригодных для использования в качестве МСР;

τ – единица времени (период) сбора обработанных отходов (неделя, месяц и т. д.).

Результаты расчетов, проведенных по зависимости (1), представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Предполагаемый состав и количество производимых ТКО
одним жителем Плесецкого района Архангельской области,
пригодных для утилизации**

| Состав общей массы ТКО | Доля, от общего объема ТКО, % [2, 7] | Годовой норматив накопления ТКО на человека [4] | | Существующий уровень сбора МСР, % [2, 7] | Возможности сбора отходов от 1 чел. для переработки | | | | | |
|------------------------|--------------------------------------|---|------------------------|--|---|--------|-------------|--------|--|--|
| | | кг | куб. м | | ежемесячно | | еженедельно | | | |
| | | | | | кг | куб. м | кг | куб. м | | |
| Бумага и картон | 9–39 | от 180,7 до 277,7 | от 2,2 до 3,4 | 15 - 30 | 1,76 | 0,02 | 0,4405 | 0,01 | | |
| Пищевые отходы | 9–30 | | | | | | | | | |
| Полимеры | 6–25 | | | 10 - 20 | 0,18 | 0,0022 | 0,0452 | 0,0006 | | |
| Стекло | 5–20 | | | 3 - 7,5 | 0,06 | 0,0007 | 0,0141 | 0,0002 | | |
| Текстиль | 3–5 | | | | | | | | | |
| Металлы | черные | | | 2–4 | нет дан-ных | | | | | |
| | цветные | | | 1–2 | | | | | | |
| Древесные отходы | 2–5 | | | | | | | | | |
| Кожа и резина | 2–3 | | | | | | | | | |
| Другое | 2 | | | | | | | | | |

По отношению к военному объекту отсутствие данных по уровню собираемого металлолома и резиновых изделий не оказывает значительного влияния на конечные результаты рас-

четов, поскольку в ВС РФ функционирует система централизованного сбора металлолома, аккумуляторов, непригодных к использованию покрышек и изделий из резины для их последующей утилизации.

Таким образом, зная предполагаемое количество личного состава и населения, которое может быть привлечено к мероприятиям, способствующим обеспечению экологической безопасности, можно рассчитать планируемый объем МСР, который может быть передан на обработку, и спланировать периодичность проведения таких мероприятий.

Определяя критерий пригодности для участия в планируемых экологических мероприятиях по сбору и передаче сортированных отходов организаций, осуществляющих переработку отходов, за основу целесообразно принять экономический эффект участия в экологических мероприятиях на выезде. Показатель экономического эффекта (\mathcal{E}) за определенный период может быть определен по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = P - Z - \left[\sum_{i=1}^n (S_i \times K_i) + C + T \right]. \quad (2)$$

В формуле (2) введены следующие обозначения:

P – прибыль предприятия от реализации переработанных МСР, руб.;

Z – затраты предприятия без учета расходов на участие в экологическом мероприятии на выезде, руб.;

S_i – стоимость расчетной единицы количества i -й группы отходов при приеме на переработку в ходе сбора ресурсов (табл. 3), руб./кг;

K_i – количество принятых отходов i -й группы при участии в экологических мероприятиях на выезде, кг;

C – расходы на деятельность при приеме отходов, в том числе для обеспечения работы персонала на выезде, руб.;

T – транспортные расходы на доставку вторичного МСР от места сбора к предприятию-потребителю, руб.

С учетом того, что деятельность военных объектов Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ) не предусматривает получение прибыли, средства, предусмотренные в качестве оплаты за сданные на утилизацию отходы $\sum_{i=1}^n (S_i \times K_i)$, могут использоваться организацией для компенсации расходов на функционирование передвижных приемных пунктов.

Таблица 3

Средняя стоимость МСР на территории Архангельской области при приеме на переработку [9]

| Отходы | | Цена |
|------------|------------------------------|-------------------------|
| Пластик | Полиэтилен высокого давления | 5,5–6,8 руб./кг |
| | Пластмасса | 4,2 руб./кг |
| | Полиэт. бутылки | 5,5 руб./кг |
| Макулатура | | от 0,84 до 3,97 руб./кг |
| Металл | Медь | 120–292 руб./кг |
| | Алюминий | 14–56 руб./кг |
| | Черный металл | 6,6–9,2 руб./кг |
| Стекло | Распространенные бутылки | 0,5–1 руб./шт. |
| | Банки | 1–3 руб./шт. |
| | Стеклобой | 1,5–3 руб./кг |

Существует и другой путь в определении критерия пригодности участия в экологических мероприятиях для организаций. Анализ рынка услуг по сбору отходов различных классов опасности для их дальнейшей переработки показывает, что предприятия Архангельской области также испытывают дефицит загруженности проектных мощностей, в связи с чем уста-

новлены количественные нормы, при соблюдении которых осуществляются предприятием прием и самовывоз сортированных отходов: для пластика – от 100 кг; для макулатуры – от 300 кг; для металла – от 40 кг [9].

Организации Архангельской области, осуществляющие деятельность по вывозу перерабатываемых отходов, руководствующиеся вышеуказанными нормами и активно взаимодействующие с администрацией различных организаций, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Социально активные организации, осуществляющие переработку групп ТКО, на территории Архангельской области [9]

| Наименование предприятия | Адрес в г. Архангельске | Перерабатываемые отходы |
|--|---|-------------------------------------|
| Деловой мир | ул. Лесозаводская, 8 | Пластик |
| Экопромсервис | ул. Октябрят, 33 | Пластик |
| Архангельский мусоро-перерабатывающий комбинат | 6-й проезд, Кузнечихинский промузел, стр. 8 | Пластик, макулатура, опасные отходы |
| Пункт приема макулатуры | ул. Дрейера, 67 | Макулатура |
| Чистый город | ул. Грузовой проезд, 25 | Макулатура, стекло |
| Альтера | ул. Полины Осипенко, 29 | Макулатура, стекло, опасные отходы |
| ГК «Вторресурсы» | ул. Советская, 1Г | Металл |
| ООО «Архресурс» | ул. Зеленоборский промузел, стр. 12 | Металл |
| Утилизационная компания | Ленинградский пр., 159 | Опасные отходы |
| ООО «Экоресурс» | ул. Ленина, 23 | Пластик, макулатура |

Следовательно, критерием пригодности проведения экологических мероприятий для предприятий, указанных в табл. 4, является сбор необходимого количества отходов, достаточного относительно установленной нормы. Выражение показателя результативности (R) проведенных экологических мероприятий по сбору утилизируемых групп ТКО может быть представлено формулой (3), а условие, при котором значение показателя (R_i) превышает единицу, в рассматриваемой ситуации означает целесообразность участия предприятий по i -й группе ТКО:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i, R_i = \frac{K_i}{N_i}, \quad (3)$$

где N_i – количественная норма отходов i -й группы, гарантирующая их самовывоз утилизирующей организацией, кг.

В свою очередь, возникает задача, решение которой возлагается на органы управления и должностных лиц военных объектов различного уровня. Речь идет о проведении заблаговременных мероприятий по подготовке необходимого количества МСР для последующей передачи организациям, осуществляющим их переработку, с таким качеством, чтобы количество МСР, по тем или иным причинам непригодных для дальнейшей утилизации, было бы минимальным [6]. То есть

$$\frac{K_i^{\text{обп}}(\tau) \times L}{K_i(\tau)} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где L – количество военнослужащих, гражданского персонала, членов их семей и населения, принявших участие в мероприятиях сбора и обработки отходов для их передачи на переработку, чел.

Для решения поставленной задачи органам экологической безопасности военных объектов и уполномоченным должностным лицам необходимо организовать эффективную систему мероприятий подготовки военнослужащих, членов их семей и населения в области экологической безопасности и информационной работы, направленной на охрану окружающей среды, разъясняющую значение проводимых мероприятий и порядок предварительной подготовки отходов для их дальнейшей утилизации. Проведение таких мероприятий должно быть направлено на формирование у людей структурированных знаний о видах отходов, пригодных для повторного использования в качестве сырья, о предъявляемых требованиях к их качеству и необходимых мерах подготовки, перечисленных в табл. 5, а в глобальном плане – о важности участия в реализации общегосударственной «Стратегии...» [2].

Таблица 5

Классификация и требования, предъявляемые к отходам, принимаемым на утилизацию[9]

| Сырьевой ресурс в составе отходов | Классификация компонентов ресурсов | Требования к МСР при приеме |
|-----------------------------------|--|--|
| Пластик | Поливинилхлорид; полиэтилентерефталат; полиэтилен низкого и высокого давления; полипропилен | Чистое; освобождено от этикетки и крышки; не применялось для хранения масла и смазочных материалов |
| Макулатура | Сорт А (высокое качество) – отходы чистой бумаги (обрезки); сорт Б (среднее качество) – гофрированный картон, книги и журналы; сорт В (низкое качество) – отходы, оставшиеся от потребления газет, гильзы (втулки) из бумаги, картон с пропиткой и покрытием | Чистое, не отсырело; не относится к упаковке, используемой в пищевой промышленности (коробки для упаковки продуктов, одноразовая посуда); скомпоновано в кипы. В кипе нет небумажных предметов (пластиковых, металлических элементов) |
| Металл | Цветной (изделия из алюминия, латуни, бронзы, дюралюминия, меди); черный | Освобождено от неметаллических частей (обмотки). Не принимаются: железнодорожные и канализационные принадлежности; металлическая стружка; обрывки тросов и строп; неразобранная бытовая электротехника; невскрытые баллоны и емкости |
| Стекло | Тара оборотная; стеклобой (эксклюзивная тара) | Чистое; освобождено от этикетки и крышки |

Особо следует отметить, что органы управления военных объектов не должны решать задачу накопления обработанных отходов в связи со сложностью ее организации и необходимостью лицензирования такой деятельности. Указанную задачу необходимо решать на региональном, муниципальном и отраслевом уровнях путем создания системы межпоселенческих (межмуниципальных) объектов инженерной инфраструктуры, включающих объекты накопления, предварительной обработки и обеспечения перегрузки. Постановлением администрации муниципального образования «Плесецкий район» на создание мест (площадок) накопления (в том числе раздельного накопления) отходов на 2019 год было выделено 1555 тысяч рублей [5].

Критерием эффективности деятельности военных объектов следует считать уменьшение количества несортированных отходов, которое характеризуется целевыми показателями ее результативности.

Основным целевым показателем в обращении с ТКО для военных объектов является доля утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов. Значение показателя демонстрирует количество извлеченных и направленных для повторного использования ценных утильных групп.

Следующим целевым показателем является уровень снижения образования отходов, характеризующий процессы максимального вовлечения отходов в хозяйственный оборот и снижения количества образующихся отходов, вывезенных с мест накопления. Данный показатель определяет поэтапное переориентирование сложившейся системы обращения с отходами, способствующее уменьшению нагрузки негативного влияния антропогенных факторов на окружающую среду.

Финансовым целевым показателем для военного объекта является количество сэкономленных денежных средств за вывоз отходов с мест накопления.

В соответствии с изложенными положениями и эмпирическими формулами, на примере ГИК определим потенциальный эффект от организации функционирования передвижных приемных пунктов на территории Плесецкого района Архангельской области.

Исходными данными для проводимых расчетов примем:

- существующую укомплектованность личным составом ГИК, сведения о численности членов семей военнослужащих и населения, проживающего на территории военных городков;
- состав и уровень сбора ТКО в соответствии с данными, указанными в табл. 2, (выбираются из интервалов случайным образом с единичным распределением);
- минимальную цену на МСР при их приеме для утилизации;
- среднюю стоимость услуг по перевозке ТКО на территории Архангельской области грузовым транспортом.

На первом этапе определим минимальный (с точки зрения экономической выгоды) необходимый уровень привлечения личного состава и населения, компенсирующий транспортные расходы функционирования передвижных приемных пунктов сбора МСР ($\sum_{i=1}^n (S_i \times K_i) - T$), с учетом периодичности проведения мероприятий. В соответствии с полученными результатами расчетов построим графики, где ось абсцисс – экономическая результативность (руб.), ось ординат – доля привлечения личного состава (%). Искомый уровень соответствует началу положительных значений экономической результативности (рис. 1).

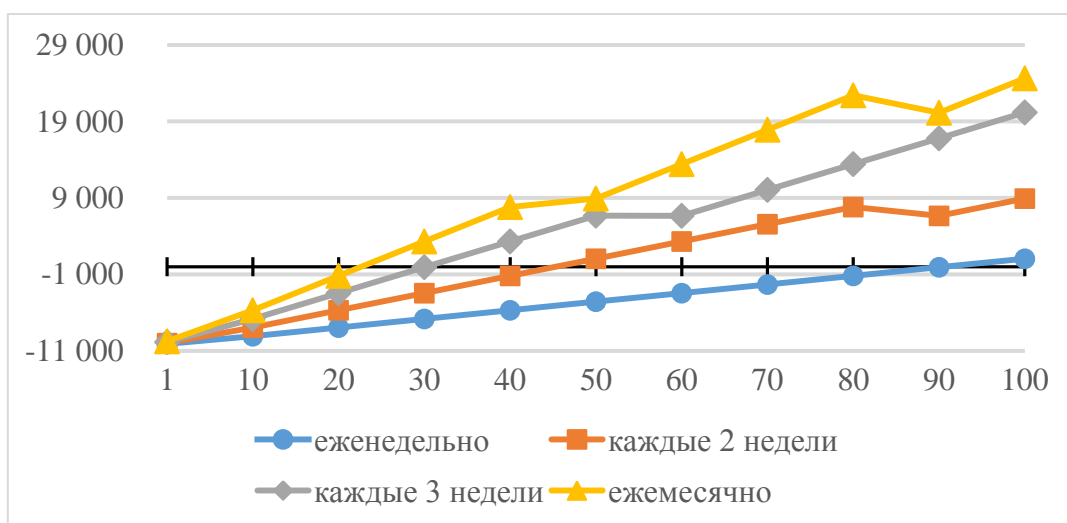


Рис. 1. Экономическая результативность деятельности организаций, осуществляющих переработку ТКО, при функционировании передвижных приемных пунктов сбора МСР на территории Плесецкого муниципального образования

На втором этапе определим наиболее благоприятную периодичность проведения мероприятий сбора МСР. Так как в настоящее время статистические данные о результатах проведения таких мероприятий на военных объектах отсутствуют, в основу положим принципы принятия решений в условиях неопределенности. Анализ матриц потерь (выбор наилучшей альтернативы из наихудших) по результатам моделирования отражен в табл. 6.

Таблица 6

Выбор оптимальной периодичности проведения мероприятий сбора МСР

| Периодичность | Минимизация альтернатив убытков возможного решения в соответствии с критерием | | |
|-----------------|---|---------|---------|
| | Лапласа | Сэвиджа | Гурвица |
| Еженедельно | 4126,07 | 6830,72 | 5146,07 |
| Каждые 2 недели | 1833,81 | 3461,43 | 4584,53 |
| Каждые 3 недели | 1038,43 | 92,15 | 3461,43 |
| Ежемесячно | 1372,29 | 2276,91 | 6861,43 |

Из анализа данных табл. 6 следует, что оптимальным интервалом времени для минимизации потенциальных убытков по всем критериям определен период в 3 недели.

На завершающем этапе определим значения целевых показателей. Последовательность проведения расчетов и усредненные результаты математического моделирования представлены в табл. 7.

Таблица 7

Расчет определения эффективности мероприятий по сбору МСР от личного состава, членов семей военнослужащих и населения, проживающего вблизи ГИК

| Показатель | | Формула | Единицы измерения | Значение | | |
|--|------------|--|-------------------------------|-----------|-----------|----------|
| Доля привлечения личного состава, членов их семей и населения к участию в мероприятиях – Y | | | процентов | 30 | 50 | |
| Стоимость перевозки твердых отходов автомобильным транспортом (5 тонн) | | | рублей/машина рейс | 3400 | | |
| Периодичность проведения мероприятий | | | период | 3 недели | | |
| Потенциальная результативность проведения мероприятий по сбору МСР | по массе | макулатура | $K_i^{обп} \times L \times Y$ | килограмм | 2571,07 | 4306,2 |
| | | пластик | | килограмм | 1367,68 | 2296,32 |
| | | стеклобой | | килограмм | 365,34 | 597,97 |
| | по прибыли | макулатура | $S_i \times K_i - T$ | рублей | -1240,35 | 217,21 |
| | | пластик | | рублей | 4119,36 | 9229,76 |
| | | стеклобой | | рублей | -2851,99 | -2503,05 |
| Доля утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов | | $\frac{\sum K_i}{Q \times L} \times 100$ | процентов | 3,98 | 6,64 | |
| Уровень снижения образования отходов, вывезенных с мест накопления | | $\sum_{i=1}^n K_i$ | килограмм/год | 97773,58 | 162955,97 | |
| Экономия денежных средств за вывоз отходов с мест накопления по существующему тарифу (T_{TKO}) для Плесецкого МО | | $\sum_{i=1}^n K_i \times T_{TKO}$ | рублей/год | 265859,74 | 443099,56 | |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей статье рассмотрено одно из направлений деятельности военных объектов, обеспечивающее участие ВС РФ в решении основных задач государственной политики в сфере обеспечения экологической безопасности по ресурсосбережению, возврату

в производство материально-сырьевых ресурсов, уменьшению количества образующихся отходов, созданию комплексной системы экологически безопасного обращения с отходами.

Следует также отметить, что руководство МО РФ рассматривает варианты создания технологической базы по переработке отходов на территории военных объектов, о чем свидетельствует заявление Министра обороны Российской Федерации генерала армии Шойгу С.К. в интервью программе «Главное» (30.06.2019) на полях форума «Армия-2019» [8]. Потенциал реализации этих замыслов позволяет оценить рассмотренные положения статьи.

В глобальном масштабе вклад МО РФ в обработку, утилизацию и обезвреживание отходов в валовом внутреннем продукте страны может быть определен на основе данных по реализации на внутреннем и внешнем рынках вторичного сырья и продукции из него.

Список используемых источников

1. Об отходах производства и потребления: федеральный закон от 24 июня 1998 года № 89-ФЗ [с изменениями и дополнениями от 19.07.2019]. – URL: <http://www.garant.ru/> (дата обращения: 03.07.2020).

2. Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 года № 84-р. – URL: <http://www.garant.ru/> (дата обращения: 03.07.2020).

3. Об утверждении региональной программы в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными, в Архангельской области: постановление администрации Архангельской области от 12 декабря 2017 г. № 556-пп. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/region29> (дата обращения: 03.07.2020).

4. Об утверждении нормативов накопления твердых коммунальных отходов на территории Архангельской области Постановление администрации Архангельской области от 4 июля 2019 г. № 20п. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/region29> (дата обращения: 03.07.2020).

5. Об утверждении распределения субсидий бюджетам поселений Плесецкого района на создание мест (площадок) накопления (в том числе отдельного накопления) отходов на 2019 год: постановление администрации муниципального образования «Плесецкий район» от 19 сентября 2019 г. № 738-па. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/region29> (дата обращения: 03.07.2020).

6. Рациональное использование твердых бытовых отходов как фактор экономической и экологической безопасности регионов / А.В. Графов, Л.Я. Аврашков, Г.Ф. Графова, С.А. Шахватова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 575–580.

7. *Ильиных Г.В.* Использование результатов определения морфологического состава твердых бытовых отходов для обоснования системы обращения с отходами // Вестник ПНИПУ. Урбанистика / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2012. – № 1. – С. 35–42.

8. Официальный интернет-портал. – URL: <http://www.tvzvezda.ru> (дата обращения: 06.06.2020).

9. Официальный интернет-портал. – URL: <http://www.arkhangelsk.eko-a.ru> (дата обращения: 06.06.2020).

Н.Б. Литвинова,
доктор педагогических наук;
Ю.Е. Тупицин,
кандидат техн. наук;
Е.В. Шишкин,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКОВ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГИБКИХ СТРАТЕГИЙ

Представлена методика определения сроков проведения технического обслуживания элементов технических систем, эксплуатируемых по фактическому техническому состоянию. Исходной информацией в предлагаемой методике являются статистические данные о значениях параметров, характеризующих техническое состояние оборудования.

В качестве модели случайного процесса изменения определяющих техническое состояние параметров используются верные линейные и экспоненциальные случайные функции.

Для определения сроков проведения технического обслуживания рассматривается время достижения определяющего параметра критического значения, соответствующего параметрическому отказу оборудования.

Ключевые слова: диагностический параметр, техническое состояние, верные случайные функции, математическая модель, распределение случайной величины, технические системы.

ВВЕДЕНИЕ

Технические системы (ТС) сооружений специальных объектов, предназначенные для формирования и поддержания параметров микроклимата в помещениях, играют важную роль в обеспечении выполнения целевых задач вооружением, военной техникой и технологическими системами объектов [1].

Технические системы, обеспечивающие требуемые параметры температуры, влажности и газового состава воздуха в помещениях сооружений включают в себя следующие подсистемы: системы вентиляции и кондиционирования воздуха, системы холодоснабжения, системы обратного водоснабжения, системы отопления, системы дистанционного и автоматического управления [1].

Известно, что значительную роль в повышении надежности и, в частности, готовности ТС играет система технического обслуживания оборудования [2]. При этом теоретические исследования и опыт практического внедрения показывают эффективность применения гибких стратегий обслуживания по фактическому техническому состоянию.

При использовании гибких стратегий периодически контролируют параметры, характеризующие техническое состояние элементов технической системы. Достижение одним из параметров критического значения определяется как параметрический отказ, поэтому важнейшей задачей является определение момента достижения параметром предотказного состояния с целью заблаговременного проведения профилактических операций при техническом обслуживании [3].

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЕРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Повреждения и отказы, возникающие при эксплуатации элементов ТС, сопровождаются изменениями структурных параметров, характеризующих их техническое состояние. Оценка величины этих изменений может производиться на основе диагностических параметров, в качестве которых могут выступать параметры рабочих и сопутствующих процессов. Периодический контроль в процессе эксплуатации этих параметров позволяет производить оценку и прогнозирование технического состояния обслуживаемых элементов и определять сроки проведения профилактических восстановительных работ с целью предупреждения отказов [4].

Общими свойствами практически всех процессов изменения определяющих параметров элементов ТС являются их непрерывность и нестационарность. Учитывая влияние деградационных факторов, воздействующих на оборудование ТС в процессе эксплуатации, случайный процесс изменения параметра элемента можно записать в виде следующего выражения [5]:

$$Y(t) = \eta(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $\eta(t)$ – случайный процесс необратимых изменений определяющего параметра, который имеет нестационарный характер;

$\varepsilon(t)$ – стационарный случайный процесс обратимых изменений определяющего параметра.

В результате воздействия на элементы ТС деградационных процессов (изнашивания, наростообразования, накопления усталостных повреждений и старения) происходят необратимые изменения параметров. Эти нестационарные случайные процессы являются основной причиной постепенных отказов. Изменения определяющих параметров оборудования ТС во времени являются в большинстве случаев медленными и монотонными. Для этих изменений характерны достаточно жесткие связи между значениями параметра в последовательные моменты времени [6].

Следовательно, сам процесс необратимых изменений параметра $\eta(t)$ имеет две составляющие: стохастическую и детерминированную. Модели таких процессов целесообразно отображать в виде случайных процессов, которые имеют некоторую функциональную зависимость от времени, а их стохастический характер обуславливается случайными параметрами, не зависящими от времени. Процессы такого вида называют полуслучайными [7].

Таким образом, процесс $\eta(t)$ можно рассматривать как полуслучайный процесс и представить его как неслучайную функцию времени и случайных аргументов:

$$\eta(t) = \varphi(A, B, C, \dots, t). \quad (2)$$

Более удобно полуслучайный процесс $\eta(t)$ рассматривать в виде

$$\eta(t) = A_0 + \int_0^t B(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где A_0 – значение параметра в начальный момент эксплуатации элемента;

$B(\tau)$ – случайный процесс скорости изменения определяющего параметра.

Интеграл в правой части выражения (3) характеризует накопление необратимых изменений параметра, характеризующего техническое состояние элемента. Начальное значение параметра представляет собой случайную величину, имеющую усеченное распределение, причем в большинстве случаев ее дисперсией можно пренебречь, так как она значительно меньше дисперсии второго слагаемого в выражении (3). Это позволяет использовать в качестве модели случайного процесса изменения определяющего параметра элементов ТС веерные случайные функции (ВСФ). Такие функции имеют общую для всех возможных

реализаций точку – полюс с координатами $(A^0, t_{и})$, где $t_{и}$ – момент проведения последнего изменения. Реализация ВСФ во времени зависит от одной случайной величины – скорости изменения определяющего параметра $B(\tau)$ [8].

Наиболее простыми из ВСФ являются веерные линейные случайные функции (ВЛСФ). Они с достаточной для практики точностью описывают основные особенности процессов изменения определяющих параметров элементов ТС.

Среди ВЛСФ можно выделить следующие модификации:

- веерную с ненулевым начальным разбросом;
- веерную с нулевым начальным разбросом.

ВЛСФ удобны для математического описания процессов изменения определяющих параметров тем, что позволяют характеризовать эти процессы незначительным числом аргументов модели и ограничиться минимальным объемом измерений [9]. Следует отметить, что результаты обработки определяющих параметров оборудования ТС показали, что некоторые из них имеют нелинейный характер и для повышения точности предсказания момента достижения отказа целесообразно использовать нелинейные модели процессов приближения к отказам. В качестве таких моделей предлагается использовать веерные экспоненциальные случайные функции (ВЭСФ).

Таким образом, рассмотренные различные виды линейных и нелинейных ВСФ можно использовать для описания процессов изменения определяющих параметров элементов ТС, так как они отражают основные особенности этих процессов и требуют минимального количества экспериментальных данных.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА НАЧАЛА МАССОВЫХ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ И СРОКОВ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Вероятность безотказной работы элемента ТС зависит от момента выхода за пределы области работоспособности определяющего параметра, который, в свою очередь, определяется его скоростью изменения и начальным значением. Если учесть, что скорость изменения определяющего параметра элемента ТС носит стохастический характер, то и момент выхода определяющего параметра за границу области работоспособности тоже есть случайная величина [10].

Определим, какое распределение будет иметь момент выхода определяющего параметра элемента ТС за пределы области работоспособности. Для элементов ТС, как правило, задается только одна граница области работоспособности, при достижении определяющим параметром которой элемент считается неработоспособным. Поэтому все дальнейшие математические выражения будем приводить при условии, что задается односторонняя граница области работоспособности.

Для нахождения плотности распределения наработки до отказа $f(t)$, где t – момент выхода определяющего параметра элемента ТС за пределы области работоспособности, по характеристикам процесса изменения определяющего параметра будем использовать аппроксимацию этого процесса с помощью ВСФ $\hat{W}(t)$ вида

$$W(t) = A_0 + \int_0^t B(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где A_0 – ордината ВСФ;

$B(\tau)$ – случайная функция скорости изменения определяющего параметра элемента ТС, имеющая в любом временном сечении нормальное распределение случайной величины B .

Отметим, что время t отсчитывается от точки временной оси, соответствующей абсциссе полюса ВСФ.

Точки пересечения реализаций ВСФ $W(t)$ с линией $\omega = \omega_0$, где ω_0 – граница области работоспособности, соответствуют отказу элемента. Учитывая это условие, выражение (4) можно записать таким образом:

$$\omega_0 = A_0 + \int_0^T B(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где T – момент выхода определяющего параметра элемента ТС за пределы области работоспособности.

Случайные величины B и T связаны, в общем случае, некоторой функциональной зависимостью, т. е. $T = G(B)$. Таким образом, необходимо найти распределение случайной величины T , которая является функцией случайной величины B , имеющей нормальное распределение. Согласно правилам получения законов распределения функций случайных аргументов имеем

$$f_T(t) = f_B(H(t)) \left| \frac{dH(t)}{dt} \right|, \quad (6)$$

где $H(t)$ – функция, обратная функции $G(B)$.

Принимая во внимание, что случайная величина B распределена по нормальному закону, получим плотность распределения T :

$$f_T(t) = \frac{1}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(H(t) - m_b)^2}{2\sigma_b^2} \right] \left| \frac{dH(t)}{dt} \right|. \quad (7)$$

Распределение (7) получило название распределения Кептейна [8, 10]. Таким образом, при нормально распределенной скорости изменения определяющего параметра наработка до отказа элемента ТС, в общем случае, будет подчинена распределению Кептейна.

Найдем распределение наработки до отказа при представлении случайного процесса изменения определяющего параметра с помощью ВСФ.

Выражения (4) и (5) для ВЛСФ имеют, соответственно, следующий вид:

$$W(t) = A_0 + Bt, \quad (8)$$

$$\omega_0 = A_0 + BT. \quad (9)$$

Из выражения (9) запишем:

$$T = \frac{|\omega_0 - A_0|}{B}. \quad (10)$$

Применяя правило (6), получим

$$f_T(t) = \frac{|\omega_0 - A_0|}{\sigma_b t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{|\omega_0 - A_0|}{\sigma_b t} - \frac{m_b}{\sigma_b} \right)^2 \right], \quad (11)$$

где m_b, σ_b – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение скорости изменения определяющего параметра;

b_1, b_2 – нижний и верхний пределы скорости изменения определяющего параметра.

Введем обозначения:

$$\beta = \frac{|\omega_0 - A_0|}{\sigma_b}; \quad \alpha = \frac{|m_b|}{\sigma_b}. \quad (12)$$

Тогда распределение (11) имеет вид

$$f_T(t) = \frac{\beta}{t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{t} - \alpha \right)^2 \right]. \quad (13)$$

В выражении (13) коэффициент β принято называть относительным запасом долговечности, а коэффициент α – относительной средней скоростью изменения параметра. Коэффициент β имеет размерность времени, коэффициент α безразмерен.

Распределение (13) получило название альфа-распределения [4].

Для экспоненциальной ВСФ плотность распределения $f_T(t)$ также имеет вид альфа-распределения, аналогично формуле (9), с параметрами:

$$\beta = \frac{1}{\sigma_b} \left| \ln \frac{\omega_0}{A_0} \right|, \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{m_b}{\sigma_b}, \quad (15)$$

где m_b , σ_b – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение натурального логарифма скорости изменения определяющего параметра.

Итак, при описании поведения определяющего параметра элемента ТС на интервале прогноза как линейной, так и экспоненциальной ВСФ наработки до отказа будет распределена по закону альфа-распределения, только параметры α и β будут вычисляться для линейной ВСФ по формулам (12), для экспоненциальной ВСФ – по формулам (14) и (15).

Характеристическое время изменения определяющего параметра θ является абсциссой точки пересечения $m_b(t)$ и границы рабочей области ω_0 :

$$\theta = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\omega_0 - A_0}{m_b}. \quad (16)$$

При $t = t_H$ начинается быстрое увеличение кривой плотности распределения наработки до отказа. Поэтому момент начала очередного ТО элемента ТС должен не превышать значения его наработки до начала массовых отказов t_H .

Величину t_H можно определить как точку, в которой ускорение изменения плотности распределения имеет максимальное значение, или как наименьший положительный корень уравнения

$$\frac{d^3 f_T(t)}{dt^3} = 0. \quad (17)$$

Уравнение (17) в результате преобразований сводится к алгебраическому уравнению шестой степени. Результатом его решения является кривая $g_H(\alpha)$ (рис. 1), которая может быть приближенно описана формулой

$$g_H \approx \frac{0,5}{\alpha}, \quad (18)$$

где $g_H \approx \frac{t_H}{\beta}$, т. е. выражение (18) можно записать в следующем виде:

$$t_H = 0,5 \cdot \frac{\beta}{\alpha}. \quad (19)$$

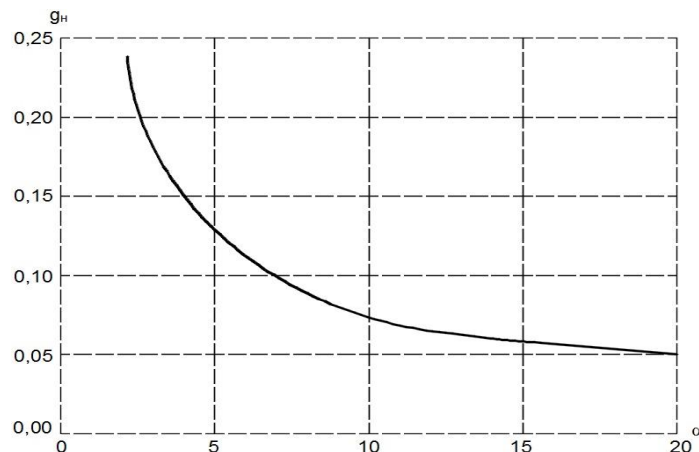


Рис. 1. Зависимость момента начала массовых отказов от параметра α

Значение t_H можно определить другим способом.

Из уравнения

$$\frac{d^2 f_T(t)}{dt^2} = 0 \quad (20)$$

находим ближайшую к началу координат точку перегиба $t_{\text{п}}$ кривой $f_T(t)$. Уравнение (20) сводится к алгебраическому уравнению четвертой степени.

Точку $t_{\text{н}}$ найдем как пересечение касательной к кривой $f_T(t)$ в точке с координатами $[t_{\text{п}}, f_T(t_{\text{п}})]$ с осью абсцисс. При этом

$$t_{\text{н}} = t_{\text{п}} - \frac{f_T(t_{\text{п}})}{\gamma}, \quad (21)$$

где $f_T(t_{\text{п}})$ – значение плотности распределения $f_T(t)$ при $t = t_{\text{п}}$;

γ – угловой коэффициент касательной в точке перегиба $t_{\text{п}}$.

Значение γ можно определить по формуле

$$\gamma = \operatorname{tg} \varepsilon = \left[\frac{df(t)}{dt} \right]_{t=t_{\text{п}}}. \quad (22)$$

Продифференцируем (14) и получим выражение для γ :

$$\gamma = \frac{\beta}{t_{\text{п}}^3 \cdot \sqrt{2\pi}} \left(\frac{\beta}{t_{\text{п}}} \cdot \left[\frac{\beta}{t_{\text{п}}} - \alpha \right] - 2 \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{t_{\text{п}}} - \alpha \right)^2 \right] \quad (23)$$

или

$$\gamma = \frac{f_T(t_{\text{п}})}{t_{\text{п}}} \cdot \left[\frac{\beta}{t_{\text{п}}} \cdot \left(\frac{\beta}{t_{\text{п}}} - \alpha \right) - 2 \right]. \quad (24)$$

Подставляя выражение (24) в (21), получим

$$t_{\text{н}} = t_{\text{п}} \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta}{t_{\text{п}}} \left(\frac{\beta}{t_{\text{п}}} - \alpha \right) - 2} \right]. \quad (25)$$

Найденные таким образом зависимости величины $t_{\text{н}}$ от значений α , β при $\alpha > 3$ практически совпадают со значениями, вычисленными по выражению (19), но при $\alpha < 3$ предпочтительнее использовать формулу (25), которая в этом диапазоне значений α дает более точные значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования закономерностей изменения параметров технического состояния оборудования ТС позволяют:

– определять сроки проведения профилактических работ до начала массовых отказов оборудования ТС, эксплуатируемого по гибкой стратегии с контролем параметров, определяющих техническое состояние;

– осуществляя контроль определяющего параметра элемента ТС в процессе эксплуатации, определять момент достижения параметром значения, соответствующего отказу $t_{\text{н}}$, и определить вероятность безотказной работы элемента за заданный интервал времени или наработки.

Таким образом, разработанная методика может быть применена в процессе планирования сроков проведения технического обслуживания оборудования ТС при практической реализации гибких стратегий эксплуатации специальных объектов.

Список используемых источников

1. Росляков Е.М. Специальные технические системы: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. – 330 с.

2. Эксплуатация космических средств: учебник / Г.Д. Петров и др.; под ред. А.П. Вышинского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 455 с.
3. *Авсюкевич Д.А.* Технология применения технических систем РКК по назначению: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 74 с.
4. *Дружинин Г.В.* Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 479 с.
5. *Абрамов О.В.* Оценка техногенного риска неконтролируемых систем // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», Пенза. – 2018. – № 1. – С. 5–7.
6. *Моисеев С.А.* Метод прогнозирующего контроля радиоэлектронной аппаратуры с адаптацией межконтрольного интервала: дисс. ... кандидата техн. наук. – Орел, 2013. – 198 с.
7. *Абрамов О.В., Розенбаум А.Н.* Прогнозирование состояния технических систем. – М.: Наука, 1990. – 125 с.
8. *Новиков А.С., Пайкин А.Г., Сиротин Н.Н.* Контроль и диагностика технического состояния газотурбинных двигателей. – М.: Наука, 2007. – 376 с.
9. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 2004. – 365 с.
10. *Сеньченков В.И.* Статистические методы обработки экспериментальных данных. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. – 206 с.

В.М. Сальников,
кандидат техн. наук;
Р.Р. Хальметов;
Е.В. Шишкин,
кандидат техн. наук, доцент

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА НА СТАРТОВОМ СООРУЖЕНИИ

В работе представлен предварительный аналитический обзор основных потребителей различных видов энергии на космодроме. Особое внимание уделено выбросам значительного количества теплоты при старте ракет космического назначения (РКН). Приведен обзор систем защиты технологического оборудования (ТО) стартового комплекса (СК) от воздействия сверхзвуковых потоков продуктов сгорания двигательной установки при старте РКН. Рассмотрены предложения по утилизации значительного количества теплоты, выбрасываемой в атмосферу в виде раскаленных газовых струй при старте ракет космического назначения.

Ключевые слова: пусковое оборудование, газодинамическое, ударно-волновое воздействие, защита от высокотемпературного воздействия, утилизация теплоты.

ВВЕДЕНИЕ

Космическая отрасль России является высокоинтеллектуальным и наиболее современным аппаратом для обеспечения научной, технической, исследовательской и оборонной мощи страны. Наиболее ярким воплощением величия страны являются космодромы. Космодромы состоят из множества площадок и позиций.

На стартовой позиции размещены общетехнологическое оборудование, предназначенное для содержания РКС, и спецтехнологическое оборудование [1].

Все системы и оборудование космодрома потребляют значительное количество энергии в виде: электроэнергии от государственной сети и от собственных автономных резервных источников; тепловой энергии для создания требуемых температурных параметров для работы оборудования и комфортных условий для жизнедеятельности личного состава космодрома. Кроме того, значительное количество энергии потребляется при старте РКН от сгорания ракетного топлива.

АНАЛИЗ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ СТАРТЕ РКН

Наиболее ответственным, опасным и в то же время зрелищным этапом эксплуатации РКК является пуск РКН [2, 3]. Воздействие сверхзвуковых потоков продуктов сгорания двигательной установки (ДУ) РКН на этом этапе может носить чрезвычайно разрушительный характер не только для технологического оборудования (ТО) стартового комплекса (СК), но и для ракеты.

Весь комплекс задач по организации пусковых процессов возложен на пусковое оборудование (ПО), которое обеспечивает, в том числе, газоотвод, тепловую, акустическую и вибрационную защиту РКН и ТО СК. Оставаясь при этом в поле влияния процессов пуска, ПО должно сохранять работоспособность в пределах назначенного для СК ресурса.

Сложный комплекс газодинамического воздействия состоит из процессов: ударно-волновых; течения в газотоках при движении ракеты на начальном участке траектории; тепловых и акустических [4].

В настоящее время созданы система газовой защиты от восходящих горячих газов и система эжекции. Применяются насосные системы водоподдачи с охлаждаемыми насадками для тепловой защиты отражателя, которые также оказались эффективными для снижения ударно-волнового давления и акустических нагрузок на стартовое сооружение [4].

Источником энергии газодинамических процессов при пуске ракет являются струи продуктов сгорания высокоэнтальпийного топлива ДУ.

Тепловое воздействие на газоотражатели характеризуется следующими данными:

- плотность теплового потока (в среднем) $q = 3000$ ккал/м²с;
- суммарное тепловое воздействие $Q = 5000 - 10000$ ккал/м²;
- время теплового воздействия от 3 до 10 с;
- высокими значениями числа Рейнольдса ($Re = 108$).

Закономерности изменения теплового воздействия, вызываемого изменением газодинамических и теплофизических параметров газа, аналогичны закономерностям теплообмена при обтекании поверхностей внешним потоком. Это выражается известной формулой Эккерта для коэффициента теплообмена в турбулентном потоке:

$$\alpha = 0,03 c_p \rho \cdot v_8 Re^{-0,2} Pr^{-2/3}.$$

Процесс теплообмена характеризуется:

- большим диапазоном изменения температуры в пограничном слое при высоких значениях $T_0 - 2000-3800$ К;
- высоким уровнем пульсаций давления в потоке вследствие действия акустического излучения струй ДУ 160–185 дБ.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Как показано в [2–5], наиболее эффективным способом снижения теплового воздействия на ГО является использование систем водоподдачи.

Значительное количество технических решений, описано в патентах [7–17].

Стартовые комплексы для подготовки и пуска ракет-носителей с космическими аппаратами содержат в своем составе в том числе и различные технические решения газоотводных устройств.

Существуют устройства, которые содержат элементы, обеспечивающие подачу воды в зону газовой струи ракетного двигателя.

Однако анализ показал, что рассмотренные устройства не обеспечивают утилизацию, вторичное использование значительного количества теплоты, выбрасываемой в атмосферу в виде раскаленных газов при старте ракет космического назначения.

Авторы считают, что введение струй воды в раскаленную газовую струю (в соотношении на 1 кг ракетного топлива – 1,5–2 кг воды) приводит к резкому увеличению турбулентности течения. Мгновенное испарение значительного количества воды приводит к еще большей турбулизации потока и увеличению акустического и газодинамического воздействия на элементы ракеты и стартового стола.

В процессе работы над НИР «Бризол» творческий коллектив профессорско-преподавательского состава 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского разработал устройство, обеспечивающее охлаждение и утилизацию значительного количества теплоты раскаленных газовых струй при старте ракеты (рис. 1).

Устройство обеспечивает передачу теплоты от высокотемпературной газовой струи, истекающей из сопел двигателя космических ракет (1), через стенку первого теплообменника (4), расположенного в газоотводном канале (3), к основному теплоносителю, который с помощью первого насоса (5) по первому замкнутому контуру (6) направляется в теплоизолированный резервуар-аккумулятор теплоты (7). Кроме того, устройство передает теплоту

из резервуара-аккумулятора с использованием второго замкнутого контура (8), через стенку второго теплообменника (9), с помощью второго насоса (10) и второго теплоносителя потребителю для обеспечения теплоснабжения, отопления и горячего водоснабжения зданий и сооружений стартового комплекса (11).

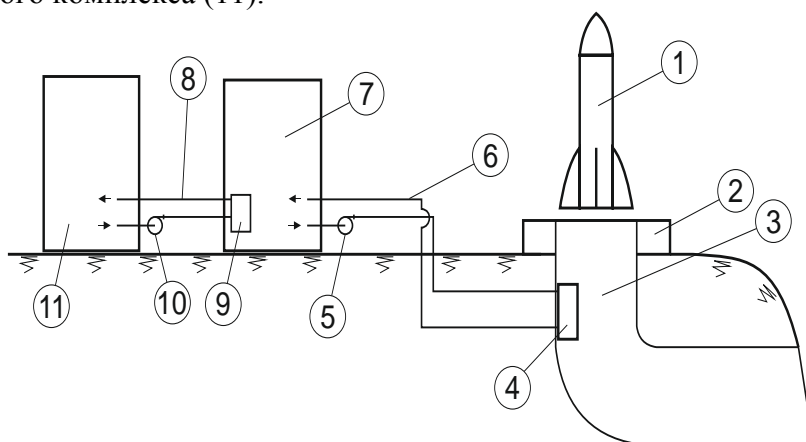


Рис. 1. Схема устройства, обеспечивающего охлаждение и утилизацию теплоты

Технический результат изобретения состоит в следующих свойствах:

- исключение подачи воды в газовую струю;
- охлаждение газовой струи ракетного двигателя;
- снижение акустического воздействия;
- утилизация теплоты высокотемпературной газовой струи, выбрасываемой из ракетного двигателя.

Здесь необходимо отметить, что в современной технике существуют устройства, работающие в газодинамических и тепловых условиях подобных воздействиям, возникающим при старте ракет, например, при температуре около 2000°C и сжигании мазута в топках энергетических котлов. В работе [18] приведены результаты измерения падающих тепловых потоков в топке мощного мазутного котлоагрегата до 600 кВт/м^2 ($515\,880 \text{ ккал/час/м}^2$).

Кроме того, в противопожарной технике отмечается, что при тушении водой пожаров с температурой $1800\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ происходит значительная диссоциация паров воды на кислород и водород, которые интенсифицируют процесс горения [19].

В патенте [16], владельцем которого является Федеральное казенное предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности», отмечается:

«Запуск мощных многоблочных ракет космического назначения, как во время старта, так и до их подъема на высоту $50\text{--}60 \text{ м}$ над стартовым столом комплекса, сопровождается мощными воздействиями от истекающих высокоскоростных и высокотемпературных струй продуктов сгорания на стартовое сооружение, ракету и инфраструктуру ракетного стартового комплекса».

В работе [20] отмечено, при подъеме РКН на высоту до 20 м (примерно за $5\text{--}10$ секунд) с ГО взаимодействует начальный участок струи, поэтому характер течения и действующие силовые и тепловые нагрузки изменяются незначительно. При этом система водоподдачи обеспечивает расход воды для охлаждения струи 1000 кг/с (10 секунд – 60 тонн).

В качестве примера рассмотрим основные характеристики РН «Союз» [21], стартовая масса – 310 т . Принимаем вес топлива – 300 т . Окислитель – $\text{O}_2\text{ж}$. Горючее – керосин РГ-1 [21]. Теплота химической реакции при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 1$ сгорания керосина в жидком кислороде составляет $9,49 \text{ МДж}$ на 1 кг ракетного топлива. КПД реактивных двигателей 55% , то есть 45% энергии топлива после его сгорания рассеивается в окружающей среде.

На стартовом столе сгорает 10 т . Количество тепла, выделяемое при старте, составляет $10\,000 \text{ кг} \cdot 0,45 \cdot 9,49 \text{ МДж/кг} = 42\,705 \text{ МДж}$ (1 мегаватт, $\text{МВт} = 1$ мегаджоуль в секунду, МДж/с).

Сравним с информацией из проекта 31 ГПИСС [21].

Сооружение 1, объем – 27712,8 м³, расчетная температура – 33°C, расход теплоты: отопление 100 000, вентиляция 505 260, всего – 605 260 Вт. Горячее водоснабжение – 356 000 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате применения предложенного устройства экономится тепловая энергия, которая ранее вырабатывалась источником теплоснабжения (например, котельной), для целей теплоснабжения, отопления и горячего водоснабжения.

Кроме того, для реализации предлагаемой системы утилизации используются существующие: резервуар запаса и система подачи воды в зону реактивной газовой струи, истекающей из ракетных двигателей, для снижения ее температуры.

Дальнейшее изучение энергетической схемы космодрома позволит предложить мероприятия по повышению рационального использования огромных энергетических ресурсов, потребляемых космодромом. Для анализа энергетической схемы необходимо изучить актуальный энергетический паспорт космодрома. На основании паспорта профессорско-преподавательский состав 43-й кафедры разработают рекомендации по оптимизации и снижению энергозатрат. Значительное количество теплоты можно утилизировать от холодильного центра и компрессорной станции.

Список используемых источников

1. Космодром / под общ. ред. А.П. Вольского. – М.: Воениздат, 1977. – 309 с.
2. Основы проектирования ракетно-космических комплексов / Г.П. Бирюков, Б.К. Гранкин, В.В. Козлов, В.Н. Соловьёв. – СПб.: Алфавит, 2002. – 395 с.
3. Маликов В.Г., Комисарик С.Ф., Коротков А.М. Наземное оборудование ракет. – М.: Воениздат, 1971. – 304 с.
4. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: инженерное пособие / под ред. д-ра техн. наук, проф. И.В. Бармина. – М.: Полиграфикс РПК, 2005. – Кн. 1. – 416 с.
5. Синильщиков Б.Е., Синильщиков В.Б. Исследование термосилового нагружения газоотражателей стартовых комплексов ракет космического назначения при работе систем водоподдачи // Исследования наукограда. – 2017. – Т. 1, № 2 (20). – С. 61–71.
6. Справочник по эксплуатации космических средств / Л.Т. Баранов, В.Л. Гузенко, А.П. Ковалев, А.П. Поляков, В.Е. Прохорович; под ред. проф. А.П. Полякова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. – 758 с.
7. Стартовый комплекс для подготовки и пуска ракет-носителей с космическими аппаратами: пат. 2270792 Рос. Федерации: МПК В64G 5/00 / И.В. Бармин, В.Н. Климов, Ж.Р. Рахманов, В.П. Сборец, А.М. Игнашин; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро общего машиностроения им. В.П. Бармина. – № 2004123779/11, заявл. 05.08.2004; опубл. 27.02.2006, Бюл. № 6. – 12 с.
8. Устройство для охлаждения газовой струи ракетного двигателя: пат. 2314234 Рос. Федерации: МПК В64G 5/00 / А.Б. Бут, Т.Т. Соколова, Л.А. Шилов, В.М. Юрин; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро транспортного машиностроения. – № 2006102079/11, заявл. 25.01.2006; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. – 9 с.
9. Стартовый комплекс для предстартовой подготовки и пуска ракеты-носителя с космической головной частью (варианты): пат. 2318706 Рос. Федерации: МПК В64G 5/00 / И.В. Бармин, В.Н. Климов, Ж.Р. Рахманов, В.Н. Неустроев, С.М. Михальченко, В.П. Сборец, П.В. Карташев; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро общего машиностроения им. В.П. Бармина. – № 2006144602/11, заявл. 15.12.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. – 19 с.

10. Стартовый комплекс для предстартовой подготовки и пуска ракеты-носителя с космической головной частью: пат. 2318707 Рос. Федерации: МПК В64G 5/00 / И.В. Бармин, В.Н. Климов, Ж.Р. Рахманов, В.А. Гнездилов, А.Н. Баранов, А.И. Милютин; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро общего машиностроения им. В.П. Бармина. – № 2006144603/11, заявл. 15.12.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. – 13 с.
11. Способ снижения акустического воздействия на ракету-носитель при старте: пат. 2320883 Рос. Федерации: МПК F02K 1/34, A62C 2/08, В64G 5/00 / А.Б. Бут, Т.Т. Соколова, Л.А. Шилов, В.М. Юрин; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро транспортного машиностроения. – № 2006112870/11, заявл. 17.04.2006; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9. – 7 с.
12. Устройство подачи воды для снижения акустического воздействия на ракету-носитель и охлаждения газовой струи ракетного двигателя: пат. 2320884 Рос. Федерации: МПК F02K 1/34, A62C 2/08, В64G 5/00 / А.Б. Бут, Т.Т. Соколова, Л.А. Шилов, В.М. Юрин; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро транспортного машиностроения. – № 2006112871/11, заявл. 17.04.2006; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9. – 8 с.
13. Стартовый комплекс для запуска ракет: пат. 2337041 Рос. Федерации: МПК В64G 5/00 / И.М. Большанин; заявители и патентообладатели И.М. Большанин, О.И. Воробьева. – № 2006143902/11, заявл. 11.12.2006; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 30. – 16 с.
14. Устройство для защиты наземного оборудования стартового комплекса от растекающегося потока высокотемпературного газа: пат. 2347726 Рос. Федерации: МПК В64G 5/00 / Т.Т. Соколова, Л.А. Шилов, В.А. Хотулев, В.М. Юрин; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро транспортного машиностроения. – № 2007117475/11, заявл. 11.05.2007; опубл. 27.02.2009, Бюл. № 6. – 5 с.
15. Пусковое устройство для ракеты с многоконтурным расположением двигателей: пат. 2423300 Рос. Федерации: МПК В64G 5/00, F41F 3/00 / Г.Н. Букин, В.Д. Гуськов, Б.И. Зайцев, С.Ю. Левиз, Е.А. Потапов; заявитель и патентообладатель Конструкторское бюро специального машиностроения. – № 2010116917/11, заявл. 28.04.2010; опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19. – 9 с.
16. Способ отвода высокотемпературных высокоскоростных струй продуктов сгорания при запуске со стартового комплекса многоблочной ракеты: пат. 2424165 Рос. Федерации: МПК В64G 5/00, F41F 3/00 / В.П. Пикалов, А.А. Нарижный, В.А. Орлов; заявитель и патентообладатель Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности. – № 2010136409/11, заявл. 30.08.2010; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20. – 8 с.
17. Способ снижения акустического воздействия на ракету-носитель при ее старте и устройство для снижения акустического воздействия на ракету-носитель при ее старте: пат. 2455195 Рос. Федерации: МПК В64C 5/00, F02K 1/34 / В.П. Пикалов, А.А. Нарижный, В.А. Орлов; заявитель и патентообладатель Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности. – № 2011106999/11, заявл. 24.02.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 8 с.
18. *Таймаров М.А., Лавирко Ю.В., Беляева Е.Э.* Интенсивность лучистого теплообмена в топке котла при изменении паровой нагрузки // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2015. – № 7–8. – С. 69–72.
19. *Рашиян И.И.* Физико-химические основы развития и тушения пожара: учеб. пособие. – Тольятти: ТГУ, 2013. – 107 с.
20. Газодинамические процессы в газоходе стартового комплекса малого заглубления для ракет космического назначения легкого класса / В.П. Зюзиков, Б.Е. Синельщиков, В.Б. Синельщиков, М.В. Ракитская // Исследования наукограда. – 2017. – Т. 1, № 4 (22). – С. 166–174.
21. Проект 31-го Государственного проектного института специального строительства «Реконструкция стартового комплекса 17П32-3 и универсального технического комплекса 14П83 на 1-м ГИК Минобороны России с целью обеспечения подготовки и запуска РН “Союз-2”, этапов 1а, 1б с РБ “Фрегат”». Пл. 3, соор. 1. Рабочая документация. Отопление. 2015.
22. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – Т. 1: Объекты космической инфраструктуры. – 400 с.

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

ОЦЕНИВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВНЕШНЕТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматривается задача прогнозирования области возможных траекторий движения объекта наблюдения по результатам внешнетраекторных измерений. Отличительной особенностью решаемой задачи является возможность расчета не только пассивного (баллистического) участка траектории, но и активного. В расчетах не используются априорные данные об аэродинамических и энергетических характеристиках объекта контроля. Применение предлагаемого аппарата возможно при оценивании и контроле летно-технических характеристик объектов, доступ к результатам телеизмерений которых отсутствует по объективным причинам. Приводятся показательные результаты практической апробации, оценивается погрешность расчетов.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, летно-технические характеристики, обработка измерительной информации.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап контроля над вооружениями мировых стран характеризуется снижением документально обязывающих мероприятий в части, касающейся предоставления результатов телеизмерений испытаний ракетно-космической техники [1]. Однако требования к качеству контроля характеристик и определения направлений модернизации техники не снижаются. Следствием данных фактов является насущная необходимость применения новых источников информации об объектах контроля. Одним из таких источников являются результаты внешнетраекторных измерений (ВТИ) испытаний, получаемые национальными техническими средствами контроля [2].

Одной из важных энергомассовых характеристик ракетно-космической техники является максимально достижимая дальность полета [3]. Оценивание данной характеристики при наличии телеметрической информации (ТМИ) – процесс отлаженный, и проводится уже на протяжении двух десятков лет. Использование только ВТИ требует разработки специального методического инструмента. Этому посвящен предлагаемый материал.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Результаты ВТИ могут быть получены в различных системах координат. Примем для определенности, что исходные данные представлены в неподвижной гринвичской системе координат (НГрСК). Исходными данными является временной ряд значений проекций скорости и координат объекта наблюдения на оси указанной системы координат [2]. Требуется с использованием имеющихся данных рассчитать возможный вариант траектории объекта наблюдения, обеспечивающий максимальную дальность полета.

Дано:

- $v = \{v_{X_i}, v_{Y_i}, v_{Z_i}\}, i = \overline{0, n-1}$ – результаты ВТИ скорости объекта наблюдения;
- $r = \{x_i, y_i, z_i\}, i = \overline{0, n-1}$ – результаты ВТИ координат объекта наблюдения;
- $T = \{t_i\}, i = \overline{0, n-1}$ – моменты времени результатов ВТИ.

Найти:

- $v_{\text{акт}} = \{v_{\text{акт } X_i}, v_{\text{акт } Y_i}, v_{\text{акт } Z_i}\}, r_{\text{акт}} = \{x_{\text{акт } i}, y_{\text{акт } i}, z_{\text{акт } i}\}, i = \overline{0, n-1}$ – прогнозируемые значения проекций скорости и координат объекта наблюдения на активном участке траектории;
- $v_{\text{пас}} = \{v_{\text{пас } X_i}, v_{\text{пас } Y_i}, v_{\text{пас } Z_i}\}, r_{\text{пас}} = \{x_{\text{пас } i}, y_{\text{пас } i}, z_{\text{пас } i}\}, i = \overline{0, k-1}$ – прогнозируемые значения проекций скорости и координат объекта наблюдения на пассивном участке траектории;
- $T = \{t_i\}, i = \overline{0, n+k-2}$ – моменты времени результатов прогноза траектории.

Допущения:

1. Двигательная установка объекта наблюдения работает без отсечки тяги, т. е. она использует весь запас топлива независимо от реализуемой траектории полета.
2. Результаты ВТИ включают момент окончания активного участка траектории полета объекта наблюдения.
3. Программа изменения угла тангажа на активном участке полета описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \alpha = 0,046\alpha_f t, t \in [0, 10); \\ \alpha = 0,026\alpha_f t + 0,2\alpha_f, t \in [10, 20); \\ \alpha = 0,017\alpha_f t + 0,38\alpha_f, t \in [20, 30); \\ \alpha = 0,008\alpha_f t + 0,65\alpha_f, t \in [30, 40); \\ \alpha = 0,002\alpha_f t + 0,89\alpha_f, t \in [40, 50); \\ \alpha = 0,001\alpha_f t + 0,94\alpha_f, t \in [50, 60], \end{cases} \quad (1)$$

где α – текущий угол между нормалью в данной точке к поверхности Земли и направлением реализации вектора скорости (при $t = 0$ с согласно первого уравнения системы (1) $\alpha = 0^\circ$);

α_f – «финальный» угол α , достигаемый на момент времени $t = 60$ с.

Момент времени $t = 60$ с принят за момент окончания интервала управления по тангажу, затем до начала пассивного участка полета объект измерений движется с достигнутым углом тангажа. Система уравнений (1) позволит сформировать закон управления движением объекта наблюдения, представленный на рис. 1.

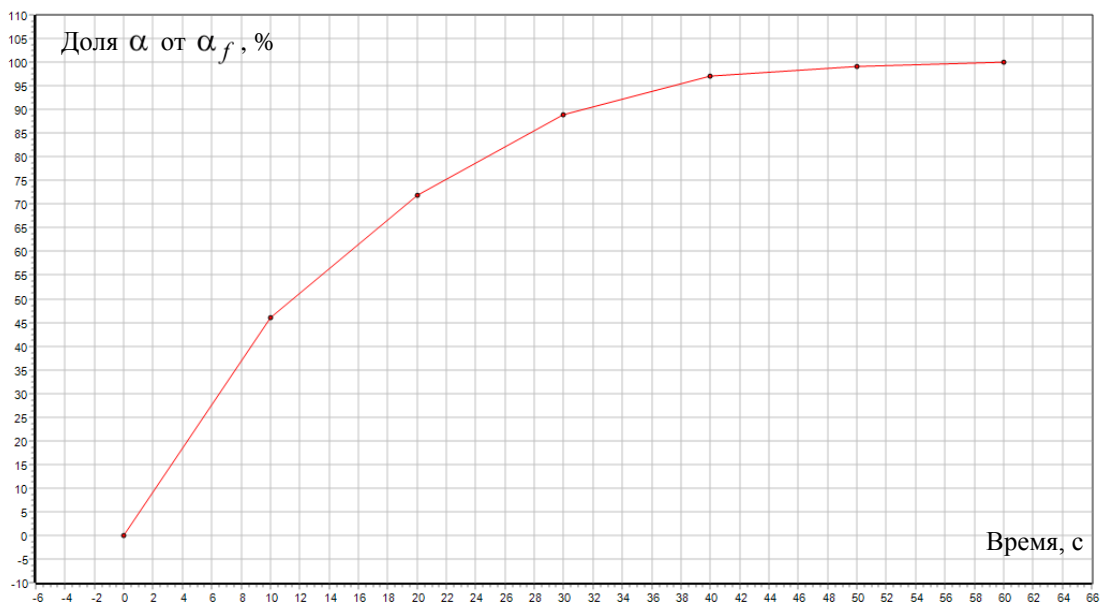


Рис. 1. Схема достижения α_f – «финального» угла α

На рис. 2 представлена схематически траектория полета объекта наблюдения.

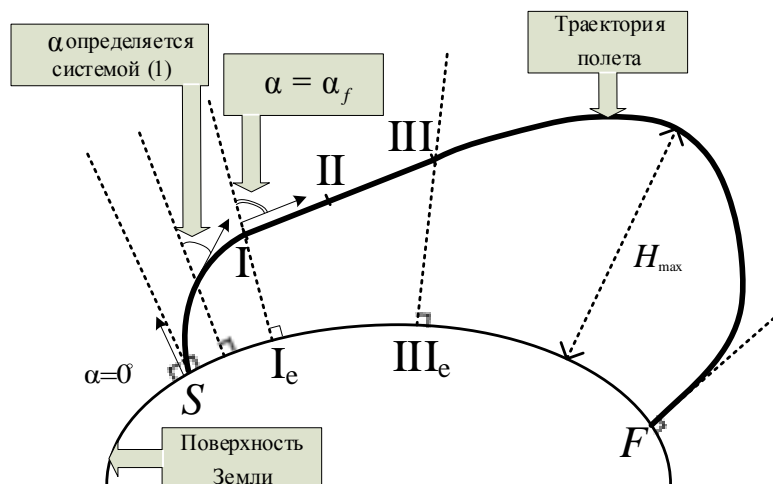


Рис. 2. Графическая интерпретация процесса моделирования полета объекта наблюдения

На рис. 2 введены следующие обозначения:

- S – точка начала траектории;
- точки I, II и III – границы окончания интервалов работы двигательных установок, соответственно, первой, второй и третьей ступеней;
- точка F – точка окончания прогноза, место «встречи» полезной нагрузки и поверхности Земли;
- участок $SIII$ – активный участок траектории, на котором объект наблюдения движется под действием сил тяги двигательных установок и притяжения Земли;
- участок $III F$ – пассивный участок траектории, на котором полезная нагрузка движется только под действием силы притяжения Земли;
- H_{\max} – максимальная высота траектории над поверхностью Земли.

На участке SI , участке работы двигательной установки первой ступени, закон изменения значения угла α в интервале от 0° до α_f определяется системой (1). На участке I–III, участке работы двигательных установок второй и третьей ступеней, угол α неизменен и равен α_f .

4. Объект наблюдения является трехступенчатой баллистической ракетой. После окончания работы третьей ступени полезная нагрузка осуществляет полет по баллистической траектории только под действием силы притяжения Земли. Влияние атмосферы на характеристики конечного участка полета не учитывается.

Корректность введенных допущений обосновывается установленными Договором о СНВ [7] исходными данными для расчета контролируемых характеристик объектов ракетно-космической техники. Каждая сторона оценивает энергетические характеристики с использованием своих собственных методик расчета, но с учетом следующих условий:

- расстояние, на которое доставляется забрасываемый вес, измеряется по проекции траектории полета ракеты на поверхность Земли от точки старта до точки предполагаемого падения на Землю полезной нагрузки, отделяющейся сразу после отсечки тяги главного двигателя последней ступени;
- используется сферическая не вращающаяся модель Земли;
- баллистическая траектория полета рассчитывается в условиях вакуума;
- каждая ступень полностью загружается топливом;
- остаток топлива в каждой ступени не превышает одного процента.

РЕШЕНИЕ

Дифференциальные уравнения, описывающие движение объекта наблюдения на активном участке траектории, примут следующий вид [4]:

$$\begin{cases} \frac{dv_X}{dt} = g_x + a_x; \\ \frac{dx}{dt} = v_X; \\ \frac{dv_Y}{dt} = g_y + a_y; \\ \frac{dy}{dt} = v_Y; \\ \frac{dv_Z}{dt} = g_z + a_z; \\ \frac{dz}{dt} = v_Z, \end{cases} \quad (2)$$

где a_x, a_y, a_z – обусловленные работой двигательных установок составляющие ускорения объекта наблюдения по оси OX, OY и OZ НГрСк соответственно;

g_x – составляющая ускорения силы тяжести по оси OX НГрСк, $g_x = -g_r(x/R)$;

g_y – составляющая ускорения силы тяжести по оси OY НГрСк, $g_y = -g_r(y/R)$;

g_z – составляющая ускорения силы тяжести по оси OZ НГрСк, $g_z = -g_r(z/R)$;

R – расстояние от носителя до центра системы координат, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$;

g_r – радиальная составляющая ускорения силы тяжести, $g_r = k/R^2$;

k – геоцентрическая гравитационная постоянная, $k = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$.

При наличии результатов ВТИ в соответствии с исходными данными решаемой задачи из системы (2) возможно получить составляющие a_x, a_y и a_z численным методом. С учетом

представления производных как конечных разностей (например, $\frac{dv_X}{dt} \approx \frac{v_{X_{i+1}} - v_{X_i}}{t_{i+1} - t_i}$) получим

на каждый момент времени проведения ВТИ $t_i, i = \overline{0, n-2}$:

$$\begin{cases} a_{x_i} = \frac{v_{X_{i+1}} - v_{X_i}}{t_{i+1} - t_i} + \frac{k x_i}{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{3/2}}; \\ a_{y_i} = \frac{v_{Y_{i+1}} - v_{Y_i}}{t_{i+1} - t_i} + \frac{k y_i}{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{3/2}}; \\ a_{z_i} = \frac{v_{Z_{i+1}} - v_{Z_i}}{t_{i+1} - t_i} + \frac{k z_i}{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{3/2}}. \end{cases} \quad (3)$$

По полученным значениям составляющих можно рассчитать модуль a :

$$a_i = \sqrt{a_{x_i}^2 + a_{y_i}^2 + a_{z_i}^2}, i = \overline{0, n-1}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет приблизительно оценить модуль ускорения, придаваемого объекту наблюдения двигательной установкой в каждый момент времени на интервале наблюдения. Данные величины следует использовать для формирования прогнозной траектории на активном участке траектории.

Следует отдельно отметить требования к моменту окончания результатов ВТИ. При наличии в результатах ВТИ дополнительно к активному участку пассивного участка траектории рассчитанные по формулам (3) значения модуля a следует ограничивать моментом окончания активного участка. Для достоверного разделения активного и пассивного участков можно использовать подход, заключающийся в пошаговом сравнительном анализе вариации между реализовавшейся траекторией объекта наблюдения и прогнозной траекторией объекта в предположении о ее пассивном характере. Таким образом, примем, что результаты ВТИ позволили сформировать множество значений модуля a , охватывающего активный участок траектории полета объекта наблюдения, т. е. формула (4) формирует значения модуля ускорения a на моменты времени $t_i | i = \overline{0, n-1}$.

Очевидно, что в значениях a учитывается влияние атмосферы только для реализовавшейся траектории. Данное влияние заключается в воздействии силы лобового сопротивления

$$F_{\text{лоб}} = c_x q s_m$$

и изменении тяги двигателя в зависимости от высоты полета

$$F_{\text{дв}} = F_0 \left(1 + 0,05 \frac{P_0 - P(h)}{P_0} \right),$$

где c_x – коэффициент лобового сопротивления при заданном угле атаки;

q – скоростной напор;

s_m – площадь миделя;

F_0 – тяга двигателя вблизи поверхности Земли;

P_0 – атмосферное давление вблизи поверхности Земли;

$P(h)$ – атмосферное давление на высоте h .

При полном отсутствии априорных летно-технических характеристик объекта наблюдения следует учитывать влияние атмосферы при формировании прогнозной величины только с точностью до полученного модуля a .

Следует разделить моделирование на два варианта.

Первый вариант заключается в том, что осуществляется моделирование полного участка полета объекта наблюдения от момента старта до момента окончания активного участка траектории. Данный вариант следует использовать при наличии результатов ВТИ соответствующего интервала полета объекта наблюдения. В данном случае моделирование участка полета первой ступени необходимо проводить с учетом реализации некоторой программы тангажа. Предлагается использовать систему (1), в соответствии с которой к требуемому значению программный угол тангажа объекта моделирования приблизится за 60 с. После этого до момента окончания активного участка траектории программный угол тангажа не изменяется. Данный вариант необходим для соблюдения практической реализуемости прогнозируемой траектории. Альтернативами при оптимизации по дальности будут являться достигаемые на момент времени $t = 60$ с прогнозного полета значения α_f – «финальные» углы α между нормалью к поверхности Земли в точке старта и направлением вектора скорости.

Второй вариант моделирования является упрощением первого варианта. В данном случае не проводится управление программой полета с помощью системы (1). Изначально с первого момента времени моделирования реализуется значение α_f . Такой вариант приемлем в случае получения результатов ВТИ безатмосферного участка полета объекта наблюдения.

Рассмотрим уравнения прогнозного движения для первого варианта. Для упрощения расчетов примем допущение, что движение реализуется только в плоскости XOY НГрСК, таким образом составляющие по оси OZ координат и скорости равны 0. Для активного участка траектории получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\text{акт } X_{i+1}} = v_{\text{акт } X_i} + (t_{i+1} - t_i) \left(-\frac{k x_{\text{акт } i}}{(x_{\text{акт } i}^2 + y_{\text{акт } i}^2)^{3/2}} + a_i \sin \alpha_i \right); \\ x_{\text{акт } i+1} = x_{\text{акт } i} + (t_{i+1} - t_i) v_{\text{акт } X_i}; \\ v_{\text{акт } Y_{i+1}} = v_{\text{акт } Y_i} + (t_{i+1} - t_i) \left(-\frac{k y_{\text{акт } i}}{(x_{\text{акт } i}^2 + y_{\text{акт } i}^2)^{3/2}} + a_i \cos \alpha_i \right); \\ y_{\text{акт } i+1} = y_{\text{акт } i} + (t_{i+1} - t_i) v_{\text{акт } Y_i}; \\ \alpha_i = 0,046\alpha_f t, t_i \in [0,10); \\ \alpha_i = 0,026\alpha_f t_i + 0,2\alpha_f, t_i \in [10,20); \\ \alpha_i = 0,017\alpha_f t_i + 0,38\alpha_f, t_i \in [20,30); \\ \alpha_i = 0,008\alpha_f t_i + 0,65\alpha_f, t_i \in [30,40); \\ \alpha_i = 0,002\alpha_f t_i + 0,89\alpha_f, t_i \in [40,50); \\ \alpha_i = 0,001\alpha_f t_i + 0,94\alpha_f, t_i \in [50,60]; \\ \alpha_i = \alpha_f, t_i \in (60, t_{n-2}]. \end{array} \right. \quad (5)$$

Начальные условия решения системы (5):

$$x_{\text{акт } 0} = 0 \text{ м}; y_{\text{акт } 0} = 6\,371\,000 \text{ м}; v_{\text{акт } X_0} = 0 \text{ м/с}; v_{\text{акт } Y_0} = 0 \text{ м/с}.$$

В результате расчетов будут сформированы исходные данные (начальные условия) для прогноза пассивного участка траектории:

$$r_{0\text{пас}} = \begin{bmatrix} x_{\text{пас } 0} \\ y_{\text{пас } 0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\text{акт } n-1} \\ y_{\text{акт } n-1} \end{bmatrix}, v_{0\text{пас}} = \begin{bmatrix} v_{\text{пас } 0} \\ v_{\text{пас } 0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\text{акт } X_{n-1}} \\ v_{\text{акт } Y_{n-1}} \end{bmatrix}.$$

С использованием указанных начальных условий для пассивного участка траектории получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\text{пас } X_{i+1}} = v_{\text{пас } X_i} + (t_{i+1} - t_i) \left(-\frac{k x_{\text{пас } i}}{(x_{\text{пас } i}^2 + y_{\text{пас } i}^2)^{3/2}} \right); \\ x_{\text{пас } i+1} = x_{\text{пас } i} + (t_{i+1} - t_i) v_{\text{пас } X_i}; \\ v_{\text{пас } Y_{i+1}} = v_{\text{пас } Y_i} + (t_{i+1} - t_i) \left(-\frac{k y_{\text{пас } i}}{(x_{\text{пас } i}^2 + y_{\text{пас } i}^2)^{3/2}} \right); \\ y_{\text{пас } i+1} = y_{\text{пас } i} + (t_{i+1} - t_i) v_{\text{пас } Y_i}; \\ i = \overline{0, k-2} : \left| \sqrt{x_{\text{пас } k-1}^2 + y_{\text{пас } k-1}^2} - R_3 \right| < \beta. \end{array} \right. \quad (6)$$

В формуле (6) $R_3 = 6371000$ м – радиус Земли, β – некоторая малая величина приближения объекта наблюдения к поверхности Земли, с точностью до которой прогнозируется траектория.

Таким образом, при расчетах по первому варианту с использованием варьируемых значений α_f в пределах $[0, 180]^\circ$ и вычисленных по формулам (3) значений $a_i | i = \overline{0, n-1}$ формируется множество траекторий. Траектории состоят из двух элементов: активного участка, формируемого по формулам (5), и пассивного участка, формируемого по формулам (6).

При расчетах по второму варианту система уравнений, описывающая активный участок траектории, примет следующий вид:

$$\begin{cases} v_{\text{акт } X_{i+1}} = v_{\text{акт } X_i} + (t_{i+1} - t_i) \left(-\frac{k x_{\text{акт } i}}{(x_{\text{акт } i}^2 + y_{\text{акт } i}^2)^{3/2}} + a_i \sin \alpha_f \right); \\ x_{\text{акт } i+1} = x_{\text{акт } i} + (t_{i+1} - t_i) v_{\text{акт } X_i}; \\ v_{\text{акт } Y_{i+1}} = v_{\text{акт } Y_i} + (t_{i+1} - t_i) \left(-\frac{k y_{\text{акт } i}}{(x_{\text{акт } i}^2 + y_{\text{акт } i}^2)^{3/2}} + a_i \cos \alpha_f \right); \\ y_{\text{акт } i+1} = y_{\text{акт } i} + (t_{i+1} - t_i) v_{\text{акт } Y_i}. \end{cases} \quad (7)$$

Для пассивного участка траектории система будет аналогичной системе (6).

В результате решения систем уравнений (5) и (6) – для первого варианта, (7) и (6) – для второго варианта за счет варьирования значением α_f формируется набор траекторий, обеспечивающих различную сферическую дальность $L_{\text{сф}}$. Среди траекторий в качестве искомой выбирается та, которая обеспечивает максимальную сферическую дальность $L_{\text{сф}}$ от точки

старта $r_{\text{акт } 0} = \begin{bmatrix} x_{\text{акт } 0} \\ y_{\text{акт } 0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6371000 \end{bmatrix}$ до точки $r_{\text{пас } k-1} = \begin{bmatrix} x_{\text{пас } k-1} \\ y_{\text{пас } k-1} \end{bmatrix}$. Значение $L_{\text{сф}}$ вычисляется по следующей формуле:

$$L_{\text{сф}} = R_3 \arccos \left(\frac{1 - L_{\text{лин}}}{2 R_3^2} \right),$$

где $L_{\text{лин}}$ – линейное расстояние от точки старта $r_{\text{акт } 0} = \begin{bmatrix} x_{\text{акт } 0} \\ y_{\text{акт } 0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6371000 \end{bmatrix}$ до точки

$$r_{\text{пас } k-1} = \begin{bmatrix} x_{\text{пас } k-1} \\ y_{\text{пас } k-1} \end{bmatrix}.$$

Для $L_{\text{лин}}$ имеем:

$$L_{\text{лин}} = \sqrt{(x_{\text{пас } k-1} - x_{\text{акт } 0})^2 + (y_{\text{пас } k-1} - y_{\text{акт } 0})^2};$$

$$x_{\text{акт } 0} = \frac{R_3}{\sqrt{1 + \left(\frac{y_{\text{акт } 0}}{x_{\text{акт } 0}} \right)^2}};$$

$$y_{\text{акт } 0 \text{ з}} = \frac{y_{\text{акт } 0}}{x_{\text{акт } 0}} x_{\text{акт } 0 \text{ з}}.$$

Здесь $x_{\text{акт } 0 \text{ з}}$ и $y_{\text{акт } 0 \text{ з}}$ – координаты проекции точки начала прогноза активного участка на поверхность Земли.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

Практическая проверка методики проводилась на основе сформированного в результате моделирования модуля ускорения объекта наблюдения. Использовался только первый вариант прогноза, при котором управление полетом объекта наблюдения на участке работы первой ступени осуществлялось согласно системе (1). График используемой зависимости представлен на рис. 3. Временные интервалы работы трехступенчатой ракеты, а также максимальные значения на интервале работы двигательных установок выбраны равными среднестатистическим значениям указанных характеристик для объектов ракетно-космической техники РФ и США. При этом вес полезной нагрузки, т. е. масса отделяемой от третьей ступени носителя конструкции, составляет порядка 2000 кг.

Представленная на рис. 3 зависимость предполагается результатом решения системы (3) и уравнения (4) по итогам обработки ВТИ.

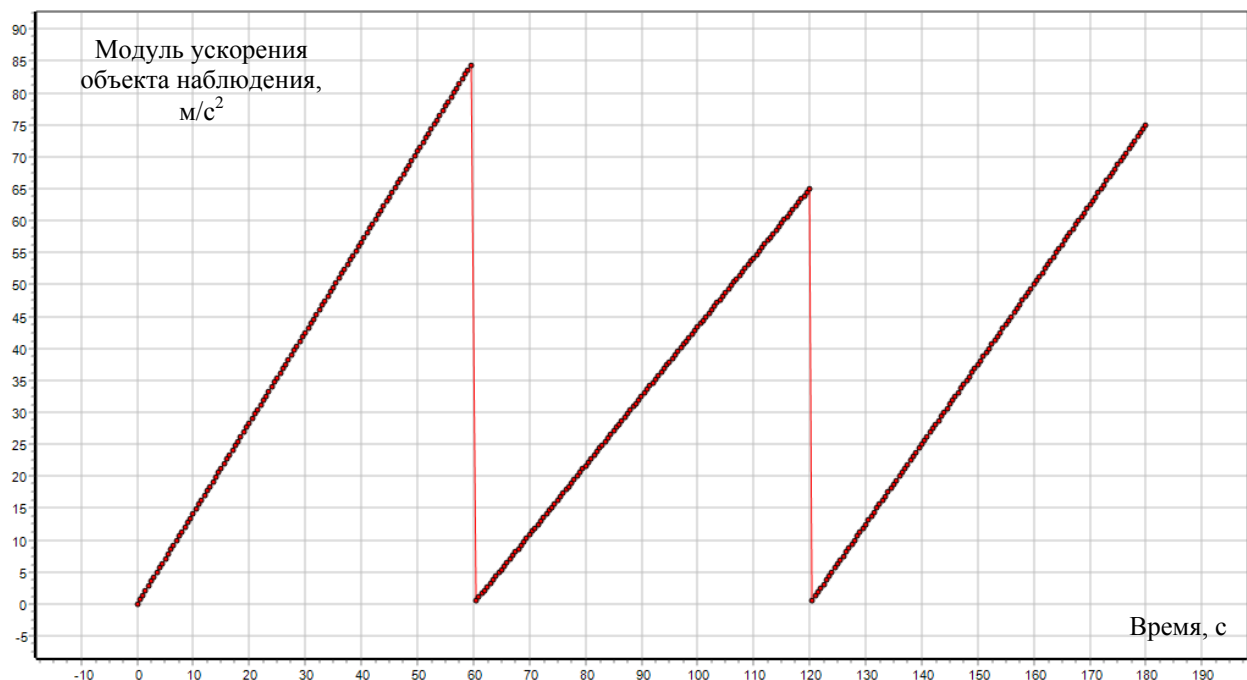


Рис. 3. Экспериментальный модуль ускорения объекта наблюдения на активном участке траектории

Полученный модуль ускорения объекта наблюдения использовался для определения энергетических характеристик: на активном участке траектории – по системе (5), на пассивном участке траектории – по системе (6). Результаты расчетов представлены в графическом виде на рис. 4.

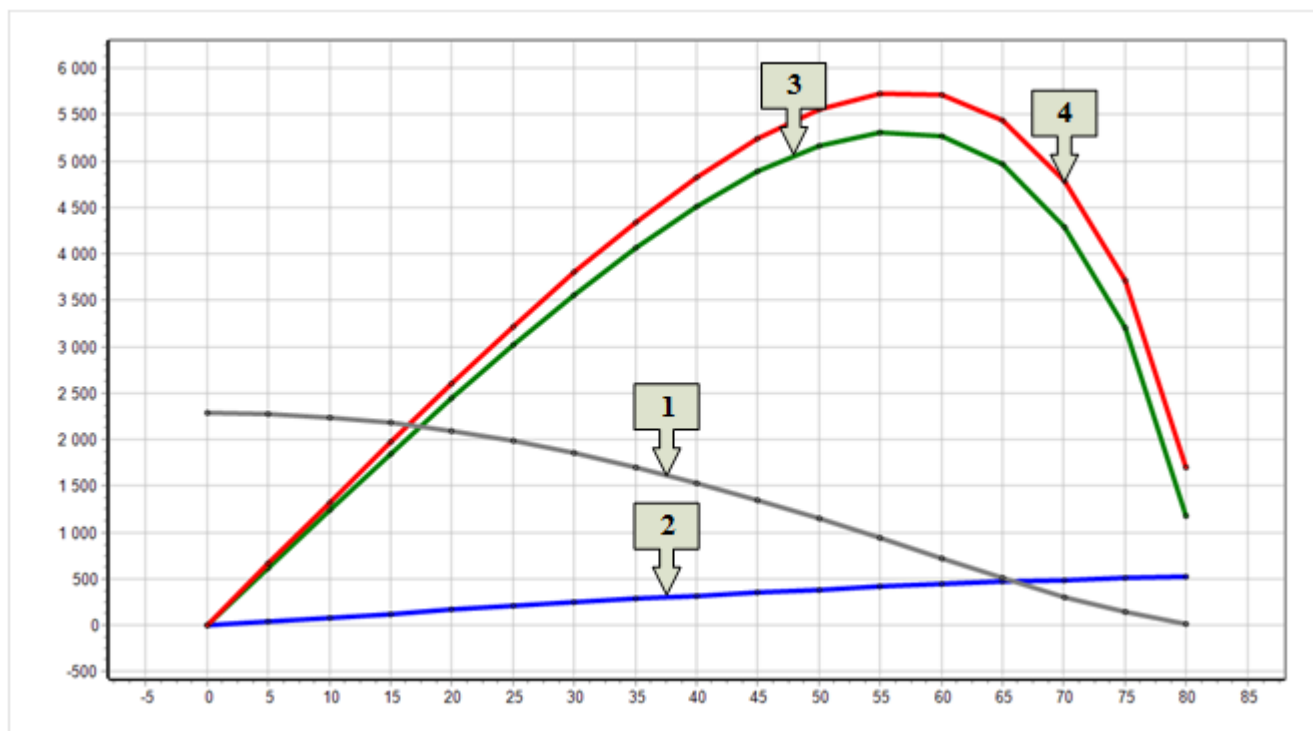


Рис. 4. Характеристики прогнозной траектории объекта наблюдения при варьировании значением «финального» угла α_f программы тангажа

На рис. 4 представлены следующие зависимости:

- 1 – максимальная высота траектории объекта наблюдения (см. рис. 2 – величина H_{\max}), км;
- 2 – сферическая дальность активного участка траектории объекта наблюдения (см. рис. 2 – длина участка $S_{\text{П}}$ траектории), км;
- 3 – сферическая дальность пассивного участка траектории объекта наблюдения (см. рис. 2 – длина участка $S_{\text{ПФ}}$ траектории), км;
- 4 – сферическая дальность полной траектории объекта наблюдения (см. рис. 2 – длина участка $S_{\text{Ф}}$ траектории), км.

Анализ данных рис. 4 позволяет сделать вывод о том, что максимальная дальность стрельбы (зависимость 4) будет обеспечена при реализации программы тангажа с достижением к 60-й секунде полета угла между нормалью к поверхности Земли и направлением реализации вектора скорости, равного 55° . При этом сферическая дальность стрельбы будет равна примерно 5700 км с максимальной высотой траектории в 1000 км.

ОЦЕНИВАНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Задача оценивания энергетических характеристик ракетно-космической техники решается и в рамках контроля международных договоренностей, и в рамках анализа летно-технических характеристик объектов наблюдения зарубежных государств вне данных договоренностей. В обоих случаях важность указанной задачи очень высока. Поэтому предложения по решению отдельных элементов данной задачи должны сопровождаться количественными требованиями к качеству исходной информации. Для рассматриваемой задачи необходимо рассмотреть зависимость погрешности оценивания максимальной дальности от погрешности оценивания результатов ВТИ. В качестве числовой характеристики погрешности используем среднеквадратическое отклонение погрешности в предположении о ее нормальном распределении.

Имитационное моделирование проводилось для следующих исходных данных: высота окончания активного и начала пассивного участка траектории – 100 км, модуль начальной скорости в момент окончания работы двигательной установки третьей ступени носителя – 6000 м/с. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

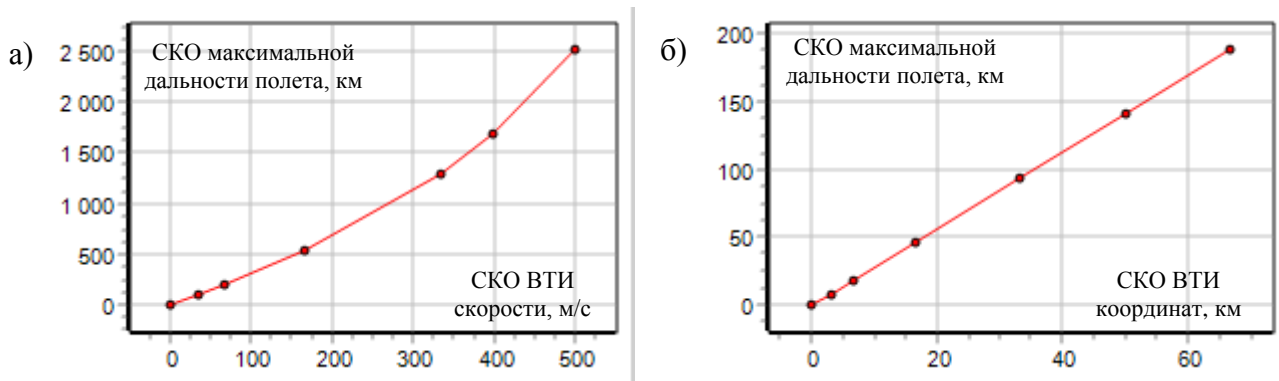


Рис. 5. Зависимость SKO погрешности оценивания максимальной дальности полета: а – от SKO погрешности ВТИ скорости движения объекта наблюдения; б – от SKO погрешности ВТИ координат движения объекта наблюдения

Анализ рис. 5, а позволяет сделать вывод о том, что для получения приемлемой точности в прогнозировании максимальной дальности полета не более 200 км необходимо обеспечить точность измерения скорости носителя не хуже 100 м/с. При этом требования к точности определения координат объекта наблюдения значительно более слабые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В материале представлена методика оценивание области возможных траекторий объекта наблюдения по результатам ВТИ в условиях объективной недоступности априорных данных о характеристиках бортовых систем и агрегатов, а также телеметрической информации. Важность получаемых данных заключается в предоставлении возможности оценивания энергетических характеристик объекта наблюдения, а именно максимальной дальности полета. При наличии базы оценок энергетических характеристик объекта наблюдения возможно проводить контроль модернизации или доработок систем и агрегатов ракетно-космической техники.

Особенностью методики является отсутствие необходимости привлечения априорных значений летно-технических характеристик объекта наблюдения для оценивания силы лобового сопротивления и тяги двигателей. В расчетах принимается, что указанные величины учтены в модуле кажущегося ускорения объекта наблюдения, который получен, в свою очередь, после обработки ВТИ реализовавшейся траектории.

Практическая апробация разработанной методики показала принципиальную возможность использования только результатов ВТИ для оценивания энергетических характеристик объекта наблюдения. Была проведена обработка модельных значений модуля ускорения со среднестатистическими величинами в реперных точках. Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что в целом полученные значения максимальной дальности соответствуют ожидаемым величинам в единицы тысяч километров. Например, для баллистической ракеты подводных лодок «Трайдент-2» указанная характеристика составляет величину до 7000 км [6]. Таким образом, сделанные допущения, как показала практическая апробация, не вносят существенный вклад в снижение точности расчетов.

Приведенные расчеты по требуемой точности исходных данных для применения методики обосновывают максимальные значения погрешностей результатов ВТИ в единицы сотен метров в секунду.

Направлениями дальнейшего совершенствования методики являются следующие:

– требуется рассмотреть вопрос определения оптимальной программы тангажа на участке работы первой ступени объекта наблюдения, в предложенном материале программа задавалась жестко;

– требуется к проработке задача «обратного» прогнозирования траектории полета объекта наблюдения при расчетах по второму варианту с целью учета в получаемой величине дальности полета расстояния от точки старта до точки начала прогнозирования.

Применение разработанная методика может получить при оценивании, контроле и анализе характеристик ракетно-космической техники, доступ к телеизмерениям которой объективно ограничен.

Список используемых источников

1. Договор СНВ-3 и дальнейшие переговорные перспективы // Национальная оборона. – 2018. – № 2. – URL: <https://oborona.ru/includes/periodics/armedforces/2018/0130/115023314/detail.shtml> (дата обращения: 04.08.2020).

2. Додонов А.Г., Путятин В.Г. Наземные оптические, оптико-электронные и лазерно-телевизионные средства траекторных измерений // Математичні машини і системи. – 2017. – № 4. – С. 23–34.

3. Летные испытания ракет и космических аппаратов: учебное пособие для технических вузов / Е.И. Кринецкий, Л.Н. Александровская, А.В. Шаронов, А.С. Голубков; под ред. Е.И. Кринецкого. – М.: Машиностроение, 1979. – 464 с.

4. Пантелеев А.В. Применение эволюционных методов глобальной оптимизации в задачах оптимального управления детерминированными системами. – М.: МАИ, 2013. – 160 с.

5. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Советское радио, 1978. – 384 с.

6. Trident II D-5 Fleet Ballistic Missile. – URL: <https://fas.org/nuke/guide/usa/slbm/d-5.htm> (дата обращения: 04.08.2020).

7. Протокол о забрасываемом весе МБР и БРПЛ в связи с Договором между Союзом Советских Социалистических Республик и Соединенными Штатами Америки о сокращении и ограничении стратегических наступательных вооружений. – URL: <https://www.armscontrol.ru/start/rus/docs/start1/throughweight.txt> (дата обращения: 04.08.2020).

А.А. Сасункевич*,

кандидат техн. наук;

Д.С. Силантьев,

кандидат техн. наук,

Военно-научный комитет ВС РФ;

С.Б. Силантьев*,

кандидат техн. наук, доцент

* ВКА имени А.Ф. Можайского

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ВНЕАТМОСФЕРНОМ УЧАСТКЕ ПОЛЕТА БЕЗ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

На основе анализа особенностей реализации на внеатмосферном участке полета ракеты-носителя методов итерационного терминального наведения без расчета параметров ее движения показано, что при формировании параметров управления необходимо повышать точность определения оставшегося времени полета. Представлен разработанный алгоритм, позволяющий решить эту задачу. Приведены результаты математического моделирования, которые подтверждают правильность теоретических положений данного алгоритма.

Ключевые слова: алгоритм, метод, наведение, оставшееся время полета, ракета-носитель, система, параметры, точность, управление, эксплуатационно-технические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Запуск космического аппарата (КА) различного целевого назначения на орбиту является ответственной задачей. Важнейшими эксплуатационно-техническими характеристиками (ЭТХ) этого процесса являются точность, оперативность и надежность, которые во многом определяются характеристиками системы управления (СУ) средства выведения КА. В настоящее время основными средствами выведения КА являются ракеты-носители (РН) и разгонные блоки (РБ). Высокие показатели указанных ЭТХ во многом определяются используемыми в СУ РН и РБ алгоритмами наведения, которые базируются на различных методах. В настоящее время вне плотных слоев атмосферы используются методы текущего программирования движения, которые относятся к методам терминального управления [1, 2]. Используемые на современных РН принципы управления предусматривают прогнозирование будущего движения объекта от текущего до терминального момента и формирование программы управления, приводящей объект в заданное конечное состояние [3, 4]. Проведение указанного прогнозирования обуславливает необходимость наличия на борту РН заранее рассчитанных программ управления, что требует проведения трудоемких предварительных расчетов и увеличивает объем полетного задания. В процессе полета на прогнозирование затрачивается довольно существенное время работы бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ). Известны методы терминального управления РН без прогнозирования будущего движения объекта [5]. Использование этих методов показывает их высокую эффективность при возникновении нештатных ситуаций, которые могут потребовать выведение КА на резервную орбиту [6]. Однако допущения, принимаемые в этом случае при расчете параметров управления, приводят к существенным скачкообразным изменениям программ управления, что негативно сказывается на работе системы стабилизации РН и приводит к дополнительным затратам топлива на управление.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ВНЕАТМОСФЕРНОМ УЧАСТКЕ ПОЛЕТА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ БЕЗ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЕЕ ДВИЖЕНИЯ

Принципы формирования программы управления на внеатмосферном участке полета без расчета параметров движения РН изложены в [5].

Системы итерационного терминального управления характеризуются тем, что в ходе движения РН периодически решается задача определения программы дальнейшего полета, обеспечивающей перевод объекта из известного начального (текущего) состояния $\mathbf{r}_0, \mathbf{V}_0$ в требуемое конечное состояние $\mathbf{r}_T, \mathbf{V}_T$, то есть задача наведения РН по свободным траекториям.

Полагаем, что атмосфера отсутствует, гравитационное ускорение постоянно и направлено вдоль осредненного на участке полета РН вектора гравитационного ускорения, боковое движение отсутствует, удельный импульс тяги двигательной установки (ДУ) и массовый расход топлива постоянны.

Необходимо определить время перелета РН из начального (текущего) состояния в требуемое конечное состояние T и программу изменения угла тангажа $\vartheta_{пр}(t)$.

Движение РН будем рассматривать в модифицированной начальной стартовой (инерциальной) системе координат (СК), фиксированной в момент старта ракеты. Для простоты будем называть ее базовой системой координат (БСК). Начало данной системы O находится в центре Земли, ось OX направлена параллельно азимуту пуска, ось OY – от центра Земли в точку старта, а ось OZ дополняет СК до правой.

Для рассматриваемого случая уравнения движения центра масс РН в БСК будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = V_x, \\ \dot{y} = V_y, \\ \dot{V}_x = a \cos \vartheta(t) - g_x, \\ \dot{V}_y = a \sin \vartheta(t) - g_y, \end{cases} \quad (1)$$

где a – ускорение РН от тяги ДУ;

$\vartheta(t)$ – угол тангажа;

g_x, g_y – проекции ускорения силы тяжести на соответствующие оси БСК.

Ускорение, создаваемое тягой ДУ, определяется как

$$a = \frac{P}{m} = \frac{P}{m_0 - \dot{m}t} = \frac{c}{\tau - t}, \quad (2)$$

где c – скорость истечения газов, $c = P/\dot{m} = P_{уд} \dot{G}/\dot{m} = P_{уд} g$;

τ – фиктивное время полета РН, $\tau = m_0/\dot{m}$;

P – реактивная сила тяги ДУ;

m_0 – начальная масса РН;

\dot{m} – массовый расход топлива ДУ;

$P_{уд}$ – удельный импульс тяги ДУ;

\dot{G} – весовой расход топлива ДУ;

g – модуль ускорения силы тяжести;

С учетом постоянства удельного импульса тяги ДУ и массового расхода топлива

$$c = \text{const}, \quad \tau = \text{const}.$$

Программа изменения угла тангажа для внеатмосферного участка полета РН является линейной функцией времени и может быть записана в следующем виде:

$$\vartheta_{\text{пр}}(t) = \vartheta_0 - (k_1 + k_2 t). \quad (3)$$

Тогда решение задачи наведения РН будет заключаться в определении четырех параметров управления: ϑ_0, k_1, k_2 и T (время работы ДУ). Параметры ϑ_0, T обеспечивают требуемую скорость в точке выведения, k_1, k_2 – требуемую высоту.

Краевые условия имеют вид:

$$\begin{aligned} x_k &= x_T; \\ y_k &= y_T; \\ V_{xk} &= V_{xT}; \\ V_{yk} &= V_{yT}. \end{aligned} \quad (4)$$

Считая $k_1 = k_2 = 0$, найдем параметры ϑ_0, T из условия удовлетворения составляющих вектора скорости требуемым значениям в точке выведения V_{xT}, V_{yT} . Интегрируя уравнения (1), получим

$$\begin{aligned} V_{xT} &= V_{x0} + \cos \vartheta_0 \int_0^T a(t) dt + g_{\text{ср}_x} T; \\ V_{yT} &= V_{y0} + \sin \vartheta_0 \int_0^T a(t) dt + g_{\text{ср}_y} T. \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая, что

$$\int_0^T a(t) dt = c \ln \frac{\tau}{\tau - T}, \quad (6)$$

из системы (5) получим уравнение для расчета времени полета РН до конца участка выведения (времени работы ДУ):

$$\sqrt{(V_{xT} - V_{x0} - g_{\text{ср}_x} T)^2 + (V_{yT} - V_{y0} - g_{\text{ср}_y} T)^2} = c \ln \frac{\tau}{\tau - T}. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой трансцендентное уравнение относительно T и может быть решено только численно. Для исключения итерационной процедуры решения трансцендентного уравнения в БЦВМ РН может быть использован алгоритм, основанный на вычислении поправки ΔT к первоначальной оценке времени работы ДУ T' [5]

$$T = T' + \Delta T. \quad (8)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\tau - T'}{2c} \left[\frac{(\Delta V')^2}{I'_a} - I'_a \right]; \\ (\Delta V')^2 &= (V_{xT} - V_{x0} - g_{\text{ср}_x} T')^2 + (V_{yT} - V_{y0} - g_{\text{ср}_y} T')^2; \\ I'_a &= \int_0^{T'} a(t) dt = c \ln \frac{\tau}{\tau - T'}. \end{aligned}$$

Определив время T , можно рассчитать ϑ_0

$$\vartheta_0 = \arctg \frac{V_{yT} - V_{y0} - g_{\text{ср}_y} T}{V_{xT} - V_{x0} - g_{\text{ср}_x} T}. \quad (9)$$

Считая параметры управления k_1, k_2 малыми ($k_1 \ll \vartheta_0, k_2 t \ll \vartheta_0$), можно записать

$$\begin{aligned}\sin(\vartheta_0 - (k_1 + k_2 t)) &\approx \sin \vartheta_0 - (k_1 + k_2 t) \cos \vartheta_0; \\ \cos(\vartheta_0 - (k_1 + k_2 t)) &\approx \cos \vartheta_0 + (k_1 + k_2 t) \sin \vartheta_0.\end{aligned}\quad (10)$$

Подставляя (3) в (1) при условии (10) и интегрируя систему (1), получим систему уравнений для расчета k_1, k_2

$$\begin{cases} k_1 I_a + k_2 I_{at} = 0, \\ k_1 I_{2a} + k_2 I_{2at} = \Delta \tilde{y}_T, \end{cases}\quad (11)$$

где

$$\begin{aligned}I_a &= \int_0^T a(t) dt = c \ln \frac{\tau}{\tau - T}; \\ I_{at} &= \int_0^T t a(t) dt = c \left(\tau \ln \frac{\tau}{\tau - T} - T \right) = \tau I_a - cT; \\ I_{2a} &= \int_0^T \int_0^t a(t') dt' dt = c \left[(T - \tau) \ln \frac{\tau}{\tau - T} + T \right] = T I_a - I_{at}; \\ I_{2at} &= \int_0^T \int_0^t t' a(t') dt' dt = c \left\{ -\frac{T^2}{2} - \tau \left[(\tau - T) \ln \frac{\tau}{\tau - T} \right] \right\} = \tau I_{2a} - \frac{cT^2}{2}; \\ \Delta \tilde{y}_T &= -\frac{1}{\cos \vartheta_0} \left(y_T - y_0 - V_{y0} T + \frac{g_{срy} T^2}{2} - I_{2a} \sin \vartheta_0 \right).\end{aligned}\quad (12)$$

Решение системы (11) можно получить по следующим формулам:

$$\begin{aligned}k_1 &= \frac{I_{at}}{I_{at} I_{2a} - I_a I_{2at}} \Delta \tilde{y}_T; \\ k_2 &= -\frac{I_a}{I_{at}} k_1.\end{aligned}\quad (13)$$

Для исследования особенностей реализации представленного метода расчета параметров управления было проведено моделирование полета РН тяжелого класса. В качестве начальных условий были взяты следующие параметры движения РН в БСК на 325 с (момент сброса головного обтекателя): $x_0 = 643\,377$ м, $y_0 = 6\,581\,400$ м, $z_0 = 73\,568$ м, $V_{x0} = 5129,3$ м, $V_{y0} = 659,5$ м, $V_{z0} = 215$ м. Требуемые краевые условия на 696 с: $x_T = 2\,887\,500$ м, $y_T = 6\,152\,500$ м, $z_0 = 144\,434$ м, $V_{xT} = 7088,6$ м, $V_{yT} = -3432,1$ м, $V_{zT} = 162,1$ м, соответствуют следующим элементам орбиты КА: $a = 7\,218\,914$ м, $e = 0,06$, $i = 88,7^\circ$, $\Omega = -1,1^\circ$, $\omega_n = 97,1^\circ$, $T = 6104$ с. Скорость истечения газов и фиктивное время полета РН составляют $c = 3383,3$ м/с, $\tau = 627,47$ с. График изменения программного угла тангажа представлен на рис. 1.

На 325-й секунде полета значение программного угла тангажа составляет $8,5^\circ$. Скорость изменения этого угла – $0,13^\circ/\text{с}$. Начальная оценка времени работы ДУ T' составляет 371 с.

В данном случае поправка ΔT в формуле (8) должна быть нулевой. Однако, как показывают расчеты, эта поправка составляет $\Delta T = -4,7$ с. Получается, что время T рассчитывается с ошибкой. Так как значение параметра управления T используется для расчета других параметров управления, то ошибка в расчете T повлечет за собой погрешности в расчете ϑ_0, k_1, k_2 .

В данном случае при коррекциях управления на 325, 400, 500, 550, 600, 625, 650 и 675 с полета изменение программного угла тангажа будет выглядеть так, как показано на рис. 2.

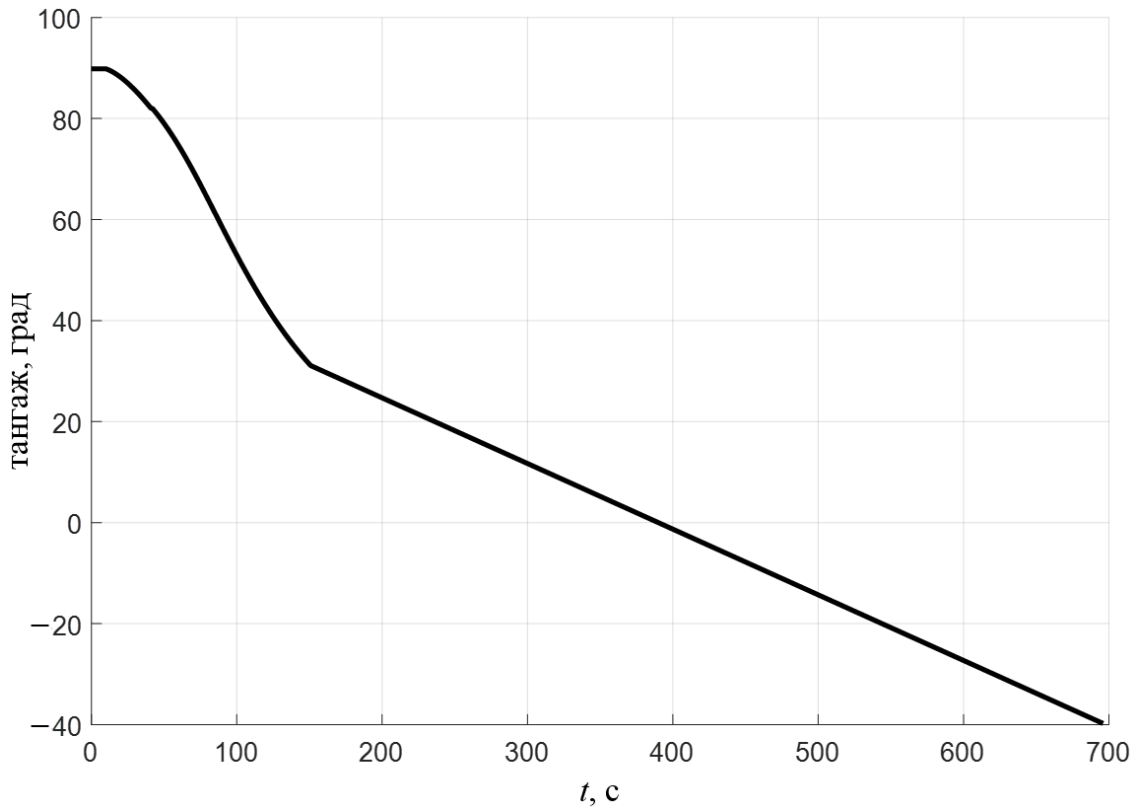


Рис. 1. График изменения программного угла тангажа при номинальных условиях

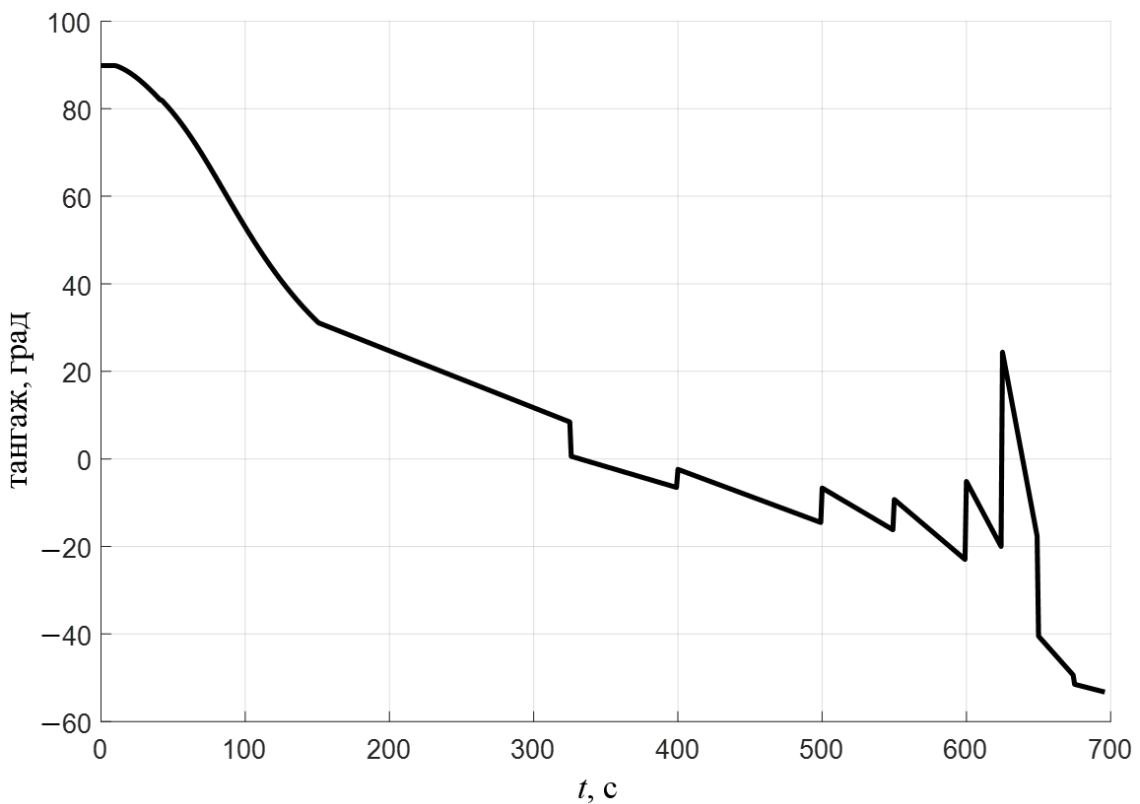


Рис. 2. График изменения программного угла тангажа при ошибке в расчете T

Значения координат, проекций вектора скорости и их отклонений от требуемых значений в точке выведения КА при ошибке в расчете T представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Значения координат, проекций вектора скорости и их отклонений
от требуемых значений в точке выведения КА при ошибке в расчете T**

| Условия расчета параметров управления | x , м | y , м | z , м | V_x , м/с | V_y , м/с | V_z , м/с |
|---------------------------------------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|-------------|
| Ошибка в расчете T | 2 893 900 | 616 070 | 144 418 | 7097,1 | -3259,7 | 162,0 |
| Номинальные | 2 887 500 | 6 152 500 | 144 434 | 7088,6 | -3432,1 | 162,1 |
| Отклонения | 6400 | 8200 | -16 | 8,5 | 172,4 | -0,1 |

Возникает задача уточнения расчетов поправки ΔT и, соответственно, самого времени T в формуле (8).

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОСТАВШЕГОСЯ ВРЕМЕНИ ПОЛЕТА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Для рассмотренного выше примера поправка ΔT в формуле (8) должна быть нулевой. Следовательно,

$$\frac{\tau - T'}{2c} \left[\frac{(\Delta V')^2}{I'_a} - I'_a \right] = 0. \quad (14)$$

Равенство (14) обеспечивается при выполнении условия

$$(\Delta V')^2 = (I'_a)^2$$

и, соответственно,

$$(V_{xT} - V_{x0} - g_{cp_x} T')^2 + (V_{yT} - V_{y0} - g_{cp_y} T')^2 = (I'_a)^2. \quad (15)$$

В выражении (15) значения параметров V_{xT} , V_{x0} , V_{yT} , V_{y0} , T' , I'_a известны. Необходимо определить значения проекций осредненного на участке полета РН вектора гравитационного ускорения g_{cp_x} и g_{cp_y} . Для вычисления значений этих проекций будем считать, что они связаны между собой коэффициентом пропорциональности k

$$k = \frac{g_{cp_y}}{g_{cp_x}}. \quad (16)$$

Для компактности дальнейших записей введем обозначения:

$$a = V_{xT} - V_{x0}; \quad b = V_{yT} - V_{y0}; \quad d = a^2 + b^2 - (I'_a)^2. \quad (17)$$

С учетом (16) и (17) выражение (15) можно записать в следующем виде:

$$(a - g_{cp_x} T')^2 + (b - k g_{cp_x} T')^2 = (I'_a)^2. \quad (18)$$

Раскрывая скобки в выражении (18) и проводя несложные преобразования, с учетом (17) получим:

$$[(T')^2(1+k^2)] g_{cp_x}^2 - [2T'(a+bk)] g_{cp_x} + d = 0. \quad (19)$$

Выражение (19) является квадратным уравнением. Для решения этого уравнения необходимо найти дискриминант

$$D = \{-[2T'(a+bk)]\}^2 - 4[(T')^2(1+k^2)] d. \quad (20)$$

Для того чтобы решение уравнения (19) было единственным, а именно

$$g_{cp_x} = \frac{a+bk}{T'(1+k^2)}, \quad (21)$$

необходимо, чтобы дискриминант (20) равнялся нулю, т. е.

$$\{-[2T'(a+bk)]\}^2 - 4[(T')^2(1+k^2)] d = 0. \quad (22)$$

Раскрывая скобки в выражении (22) и разрешая его относительно k , а также опуская промежуточные выкладки, получим:

$$4(T')^2(b^2 - d)k^2 + 8ab(T')^2k + 4(T')^2(a^2 - d) = 0. \quad (23)$$

Дискриминант для уравнения (23) запишется в следующем виде:

$$D_1 = 64a^2b^2(T')^4 - 4 \cdot 4(T')^2(b^2 - d) \cdot 4(T')^2(a^2 - d) = 64(T')^4[a^2b^2 - (b^2 - d)(a^2 - d)]. \quad (24)$$

Значение коэффициента k будет определяться в соответствии с выражением

$$k = \frac{-8ab(T')^2 \pm \sqrt{D_1}}{8(T')^2(b^2 - d)}. \quad (25)$$

Алгоритм расчета оставшегося времени полета РН предусматривает выполнение следующей последовательности операций:

1. Зная первоначальную оценку времени работы ДУ T' , скорость истечения газов c и фиктивное время полета РН τ , по первой формуле (12) вычислить значение интеграла I'_a ;
2. Рассчитать значения вспомогательных параметров в соответствии с выражением (17);
3. Определить значение дискриминанта D_1 по формуле (24);
4. В соответствии с выражением (25) рассчитать значение коэффициента k ;
5. Определить значение $g_{ср,x}$ по формуле (21);
6. Используя выражение (16), рассчитать значение $g_{ср,y}$;
7. Определить по формуле (15) значение $(I'_a)^2$ и соответственно $(\Delta V')^2$;
8. Рассчитать поправку ΔT и оставшееся время полета РН T в соответствии с выражением (8).

При расчете оставшегося времени полета РН на основе представленного алгоритма в процессе коррекции управления на 325, 400, 500, 550, 600, 625, 650 и 675 с изменение программного угла тангажа будет выглядеть так, как показано на рис. 3. Значения координат, проекций вектора скорости и их отклонений от требуемых значений в точке выведения КА при уточненном времени T представлены в табл. 2.

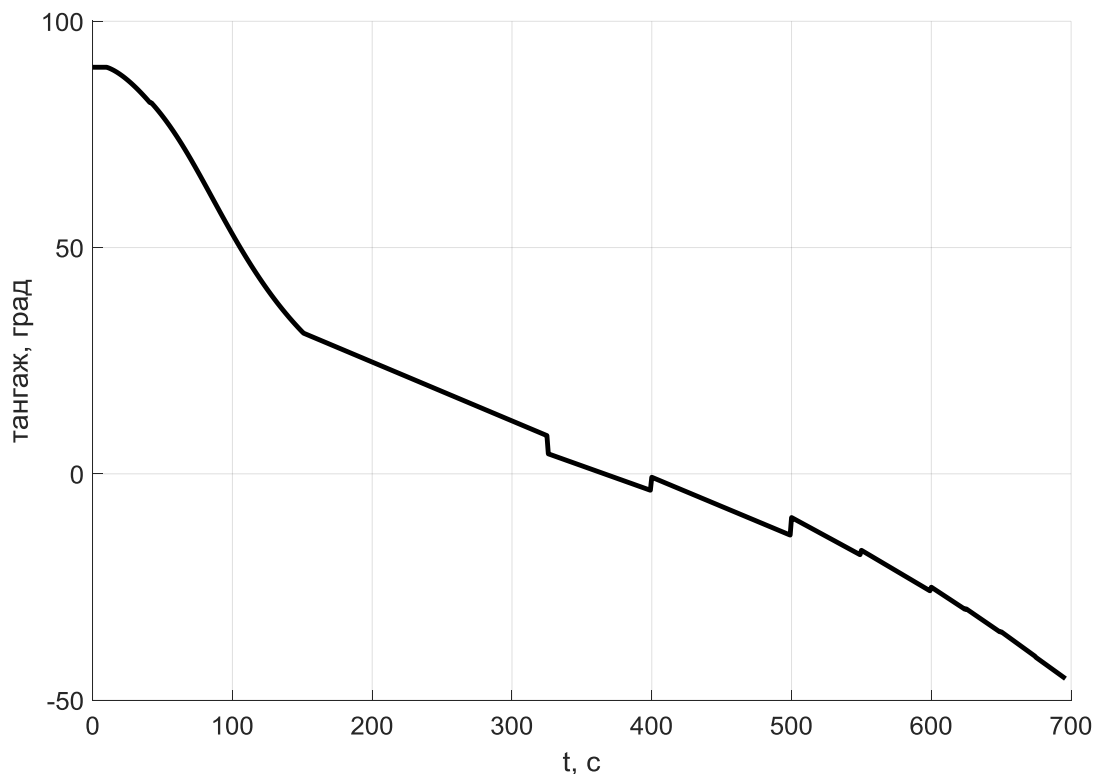


Рис. 3. График изменения программного угла тангажа при уточнении времени T

Таблица 2

**Значения координат, проекций вектора скорости и их отклонений
от требуемых значений в точке выведения КА при уточнении времени T**

| Условия расчета параметров управления | x , м | y , м | z , м | V_x , м/с | V_y , м/с | V_z , м/с |
|---------------------------------------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|-------------|
| Уточнение времени T | 2 889 900 | 6 152 500 | 144 428 | 7085,2 | -3428,2 | 162,1 |
| Номинальные | 2 887 500 | 6 152 500 | 144 434 | 7088,6 | -3432,1 | 162,1 |
| Отклонения | 2400 | 0 | -6 | -3,4 | 3,9 | 0 |

Сравнение графиков на рис. 2 и 3 свидетельствует о более плавном изменении программного угла тангажа при уточнении времени T в соответствии с разработанным алгоритмом. Данные, представленные в табл. 1 и 2, показывают, что при уточнении времени T точность выведения КА значительно повышается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе реализации на внеатмосферном участке полета РН методов итерационного терминального наведения без расчета параметров ее движения при формировании параметров управления разработанный алгоритм позволяет повысить точность определения оставшегося времени полета и, как следствие, точность выведения КА на орбиту. Исключение значительных скачков в программе изменения угла тангажа положительно сказывается на работе системы стабилизации.

Список используемых источников

1. Бортовые терминальные системы управления: принципы построения и элементы теории / Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
2. Системы управления средствами выведения: учебник / А.А. Ардашов, Ю.А. Кузьмичев, С.Б. Силантьев, И.В. Фоминов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – 293 с.
3. Разоренов Г.Н., Бахрамов Э.А., Титов Ю.Ф. Системы управления летательными аппаратами (баллистическими ракетами и их головными частями): учебник для вузов / под ред. Г.Н. Разоренова. – М.: Машиностроение, 2003. – 584 с.
4. Новиков А.В., Тихонов В.Л., Литвинов В.С. Методы анализа точности выведения ракет-носителей: монография. – Днепропетровск: ЛИРА, 2017. – 276 с.
5. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 352 с.
6. Аверкиев Н.Ф. Резервные орбиты космических аппаратов: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 116 с.

М.И. Яцечко,
ВУНЦ ВВС ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-АВИАЦИОННОЙ СЛУЖБОЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ПОЛЕТАМ ГРУППЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО КОЛИЧЕСТВА ЛИЧНОГО СОСТАВА

В статье представлен алгоритм управления инженерно-авиационной службой, позволяющий оптимально распределить личный состав для выполнения работ по подготовке группы воздушных судов к одновременному вылету с целью минимизации общего времени подготовки в условиях ограниченного количества специалистов. При этом в алгоритме учитываются вероятности отказов всех воздушных судов по всем специальностям и время их восстановления.

Ключевые слова: алгоритм, авиационная техника, автоматизированная система управления, воздушное судно, оптимизация, инженерно-авиационная служба.

АКТУАЛЬНОСТЬ

С учетом нарастающей интенсивности полетов авиации Воздушно-космических сил Российской Федерации роль инженерно-авиационной службы (ИАС) в процессе подготовки группы воздушных судов (ВС) к полетам возрастает, особенно в условиях ограниченного количества личного состава. Анализ работ в области применения автоматизированных систем управления технической эксплуатацией авиационной техники показал, что существующие алгоритмы не учитывают вероятности отказов по специальностям инженерно-авиационной службы [самолет и двигатель (СД), авиационное вооружение (АВ), авиационное оборудование (АО), радиоэлектронное оборудование (РЭО)] конкретного воздушного судна при распределении личного состава в условиях ограниченного их количества для выполнения работ на авиационной технике. Для решения вышеизложенного противоречия разработан алгоритм оптимального (по критерию минимума времени подготовки группы воздушных судов) управления инженерно-авиационной службой в режиме подготовки к полету группы ВС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При планировании работ на воздушных судах личным составом инженерно-авиационной службы применяются метод систем массового обслуживания (СМО) и метод сетевого планирования. Если аналитически описывать процесс управления ИАС в условиях ограниченного количества личного состава методом СМО, то данный подход не позволяет учитывать время восстановления авиационной техники.

Сетевой метод планирования – это метод, при котором используется моделирование планируемого комплекса выполняемых работ, отражающее их логическую последовательность, существующую взаимосвязь, а затем оптимизация модели по двум критериям:

- минимизации времени выполнения комплекса планируемых работ при заданной стоимости;
- минимизации трудозатрат при выполнении комплекса работ при заданном времени его выполнения.

Для оптимизации сетевого графика используются следующие методы:

- метод критического пути, который позволяет рассчитать возможные сетевые графики выполнения комплекса работ на основе описанной логической структуры сети и оценок про-

должительности выполнения каждой работы, а также определить критический путь (под критическим путем понимается наименьшее время выполнения работы);

– PERT (Program Evaluation and Review Technique) – способ анализа задач, необходимых для выполнения работ, в особенности анализа времени, которое требуется для выполнения всего перечня работ.

В современных системах управления сетевые графики могут быть реализованы на высоком профессионально-техническом уровне в процессе применения программного обеспечения пакета Microsoft Office Project, обеспечивающего широкий спектр функциональных возможностей решения и анализа задач организации, планирования и управления самыми разнообразными процессами.

Методы СМО и сетевого планирования не учитывают вероятность отказов авиационной техники и время ее восстановления при планировании работ на ВС в авиационных частях и подразделениях для распределения личного состава ИАС и не позволяют решить эту задачу автоматически без оператора.

Методы выявляют причинно-следственные связи, позволяют пересмотреть или изменить исходные данные, но не учитывают случайные факторы и не позволяют их проанализировать. Возможность увидеть динамику процесса планирования и достижения результата за определенное время подготовок воздушных судов отсутствует, а также отсутствует математический аппарат при принятии решения руководителем ИАС, на сегодняшний день он руководствуется своим опытом [1–3].

Адаптация информационно-управляющей системы «Эрлан-2С» под Астра Линукс SE – «Смоленск» и системы управления базами данных – PostgreSQL, допущенными для использования в составе программного обеспечения (ПО) Вооруженных Сил Российской Федерации завершена и внесена в Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных (Приказ Минкомсвязи России от 28.03.2017 №146, Прил. 1, пп. №120, реестровый номер ПО: 3278). Данное ПО предназначено: для учета, контроля и анализа технического состояния авиационной техники; для перспективного планирования и диспетчеризации полетов; для планирования и непосредственного управления процессами технического обслуживания воздушными судами, но оно не решает задачу распределения специалистов по ВС при групповом их обслуживании в условиях ограниченного количества личного состава и не учитывает вероятности отказов конкретных ВС и по конкретным специальностям.

Пути решения данных проблем детерминированные, а не стохастические (не учитывают случайные процессы при планировании и распределении личного состава ИАС для выполнения работ группы воздушных судов) [4–6].

Для автоматизации и оптимизации управления инженерно-авиационной службой при подготовке к полету группы ВС в условиях ограниченного количества личного состава с учетом вероятностей отказов ВС, а также времени восстановления разработан алгоритм, который предписывает порядок действий и очередность работ с целью достижения минимума времени подготовки группы ВС имеющимся количеством специалистов. Разработанный алгоритм в условиях ограниченного количества личного состава ИАС позволяет оптимально распределить по ВС специалистов, которые еще не выполняли работы на конкретном ВС, а также учесть вероятности их отказов по всем специальностям и времени восстановления при определении очередности [7–10].

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-АВИАЦИОННОЙ СЛУЖБОЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ПОЛЕТАМ ГРУППЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Рассматривается задача подготовки к одновременному вылету четырех однотипных ВС, при этом количество специалистов ИАС по каждой из специальностей меньше четырех (такая ситуация может сложиться при боевых потерях). Необходимо распределить личный со-

став по ВС оптимально (по критерию минимума времени подготовки группы ВС). Очередность выполнения работ специалистами на ВС зависит от двух основных факторов: времени подготовки ВС по специальности и количества личного состава ИАС. Очевидно, что при количестве специалистов по каждой специальности меньше, чем количество ВС, в первую очередь должны выполнять работу те специалисты, у которых максимальное время подготовки по специальности, так как их простой увеличивает общую продолжительность подготовки группы ВС. С другой стороны, приоритет в очередности работ имеют специалисты тех специальностей, которых меньше по численности. Таким образом, введем понятие приоритета каждой специальности, которое дает численное значение, позволяющее ранжировать специальности по очередности выполнения работ, и представим выражение для его определения:

$$R_i = \frac{T_{\Pi_i}}{K_i}, \quad (1)$$

где T_{Π_i} – время подготовки ВС по i -й специальности ($i = \{\text{СД, АВ, АО, РЭО}\}$);

K_i – количество личного состава по i -й специальности.

При распределении личного состава ИАС для выполнения работ на ВС нужно учитывать, что парк ВС состоит из однотипной авиационной техники, находящейся в различном техническом состоянии и имеющей различную наработку и ресурс. Поэтому необходимо определять очередность выполнения работ на ВС не только исходя из приоритета специалистов, но и с учетом статистических показателей надежности по всем ВС. Возникает задача формирования очередности выполнения работ специалистами ИАС на основе приоритетов специальностей и вероятностей отказов всех ВС по всем специальностям [11].

В перспективе предлагается переход на эксплуатацию авиационной техники по состоянию, для чего необходимо создать эффективную систему диагностики ВС и прогнозирования его технического состояния с глубиной контроля до блока (субблока). Подсистема прогнозирования предполагает непрерывное накопление статистических данных по отказам ВС, что в свою очередь целесообразно использовать при оптимальном распределении специалистов ИАС при подготовке группы ВС к полету. Это обусловлено тем, что значение вероятностей отказов элементов ВС с учетом времени их восстановления позволяет скорректировать очередность выполнения работ конкретными специалистами на определенных ВС в зависимости от вероятностей их отказов и времени восстановления. Таким образом, введем соответствующий параметр – гипотетическое время подготовки k -го ВС по i -й специальности $T_{\Pi_i}^k$. Данный показатель индивидуален для каждого ВС и включает стандартное время подготовки по i -й специальности и сумму произведений вероятностей j -х отказов на время их восстановления, причем если вероятности отказов отличаются для различных ВС, то время их восстановления считается стандартным для любого ВС. В итоге запишем следующее выражение:

$$T_{\Pi_i}^k = T_{\Pi_i} + \sum_{j=1}^{n_i} (t_{\text{В}j}^i \cdot q_j^{ik}), \quad (2)$$

где $t_{\text{В}j}^i$ – время восстановления j -го отказа по i -й специальности;

q_j^{ik} – вероятность j -го отказа по i -й специальности на k -м ВС;

n_i – количество отказов по i -й специальности.

Так как гипотетическое время подготовки различных ВС по всем специальностям будет отличаться, то очередность выполнения работ будет определяться не только приоритетом специальности, но и эксплуатационными характеристиками воздушных судов:

$$R_i^k = \frac{T_{\Pi_i}^k}{K_i}, \quad (3)$$

где R_i^k – приоритет i -й специальности для k -го ВС.

В качестве критерия оптимизации распределения личного состава ИАС по ВС рассматривается минимум времени подготовки группы ВС. С учетом выбранного критерия и приведенного обоснования формирования приоритета выполнения работ специалистами на ВС целевая функция оптимального распределения имеет вид:

$$t_{\Pi}(T_{\Pi i}^k, K_i) \rightarrow \min,$$

где t_{Π} – время подготовки группы ВС.

Таким образом, с целью автоматизации процесса оптимального по критерию минимума времени подготовки группы ВС распределения личного состава ИАС в условиях недостаточного количества специалистов для организации параллельной подготовки группы ВС к полету и с учетом технического состояния подготавливаемой авиационной техники, необходимо разработать соответствующий алгоритм.

На основе вышеизложенного разработан оптимальный алгоритм для распределения личного состава ИАС по конкретным ВС с целью выполнения работ в условиях ограниченного количества специалистов и с учетом вероятностей отказов всех ВС по всем специальностям.

На основе введенных данных необходимо осуществить расчет времени подготовки k -х ВС по i -м специальностям $T_{\Pi i}^k$ и для k -х ВС R_i^k (3). Таким образом, алгоритм будет иметь вид, представленный на рис. 1.

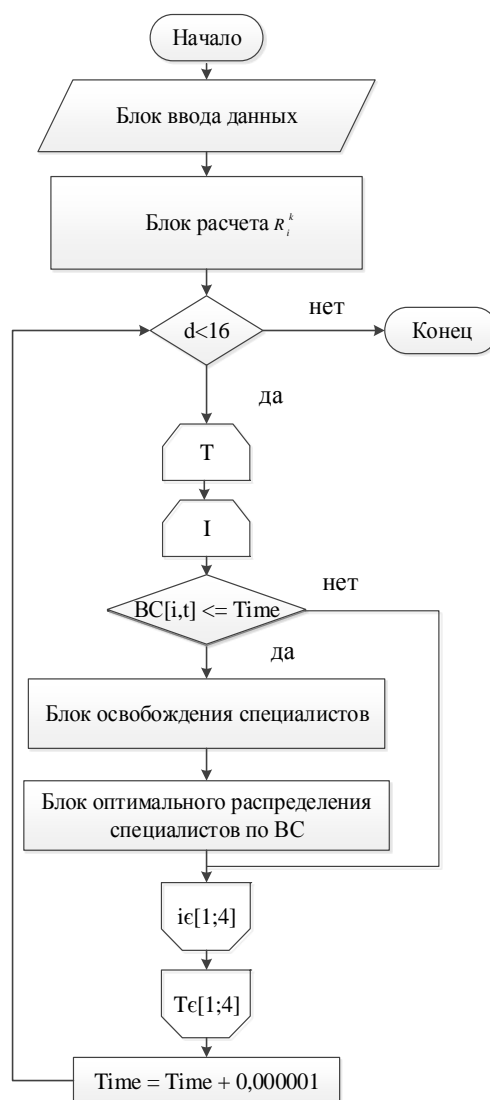


Рис. 1. Алгоритм управления инженерно-авиационной службой при подготовке к полетам группы воздушных судов в условиях ограниченного количества личного состава

В представленном алгоритме используются следующие переменные: Tis – время выполнения работ в виде даты и времени; K – количество специалистов (1 – СД, 2 – АВ, 3 – АО, 4 – РЭО); Rs – рейтинг специалистов в виде двухмерной матрицы, где строки – номера ВС, а столбцы – специалисты (1 – СД, 2 – АВ, 3 – АО, 4 – РЭО); Fs – запоминание номера специалиста по ВС (представлено в виде двухмерной матрицы); $vr [n, i, j]$ – трехмерная матрица, запоминая произведение n -й вероятности отказа на n -е время восстановления на i -м ВС, j -й специальности; $BC [i, j]$ – переменная, запоминая время занятости (реальной работы) на i -м ВС j -й специальности; $BS [i, j]$ – двуматричная переменная размером 4×4 для запоминания выполненной работы i -го ВС j -й специальности (устраняет накладки работ специалистов друг на друга); $const sec = 1/(24 \cdot 3600)$ – представление секунды в вещественном виде; zam – вещественная переменная, используемая для сортировки специалистов.

На рис. 2 в блоке ввода данных задаются одномерные массивы на четыре элемента, такие как количество специалистов каждой специальности, количество ВС, на которых требуется произвести работы, время работы специалистов каждой специальности, одномерный массив на четыре элемента типа дата – время, для установки даты.

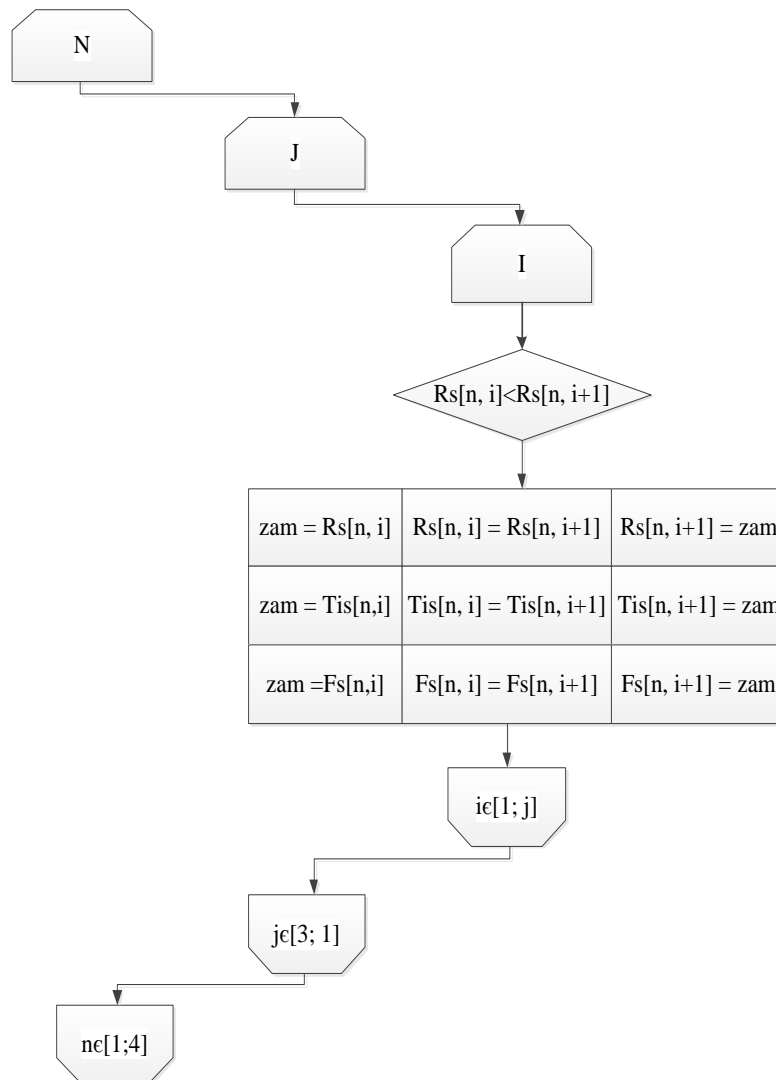


Рис. 2. Блок ввода данных

На рис. 3. представлен блок расчета приоритета R_i^k i -й специальности для k -го ВС, в котором на основе исходных данных происходит распределение специалистов для выполнения работ с учетом приоритета (по критерию минимума времени подготовки группы ВС).

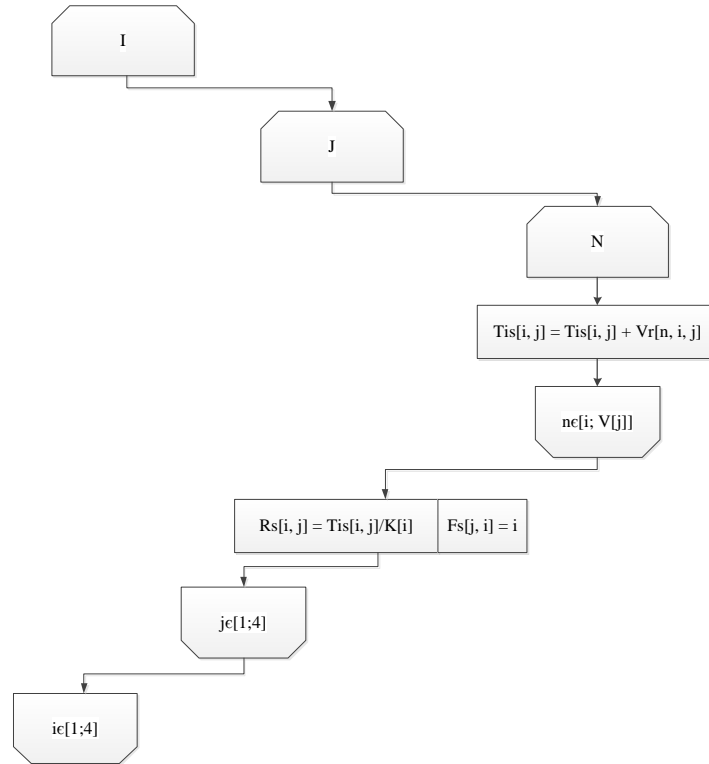


Рис. 3. Блок расчета приоритета

На рис. 4 представлен блок освобождения специалистов, в котором *spec* – переменная, определяющая занят специалист или нет (всего 16 каналов, так как учитывается параллельная работа; 1, 5, 9, 13 – основной канал, остальные каналы параллельной работы, относящиеся к *i*-му ВС).

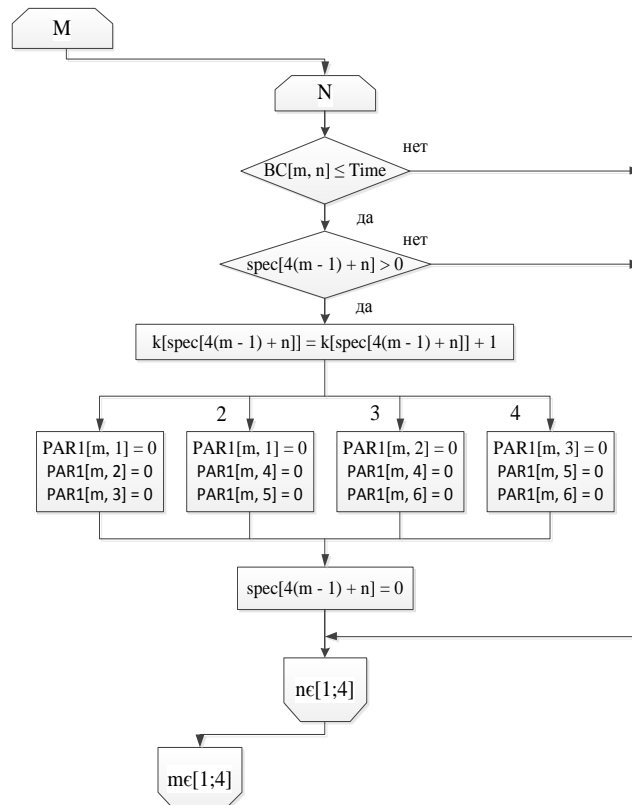


Рис. 4. Блок освобождения специалистов

На рис. 5. с учетом вышеизложенного представлен блок оптимального распределения специалистов по воздушным судам, который ограничен своими функциональными возможностями, так как изначально для примера разработан для выполнения работ на ВС и количества личного состава по специальностям не более четырех.

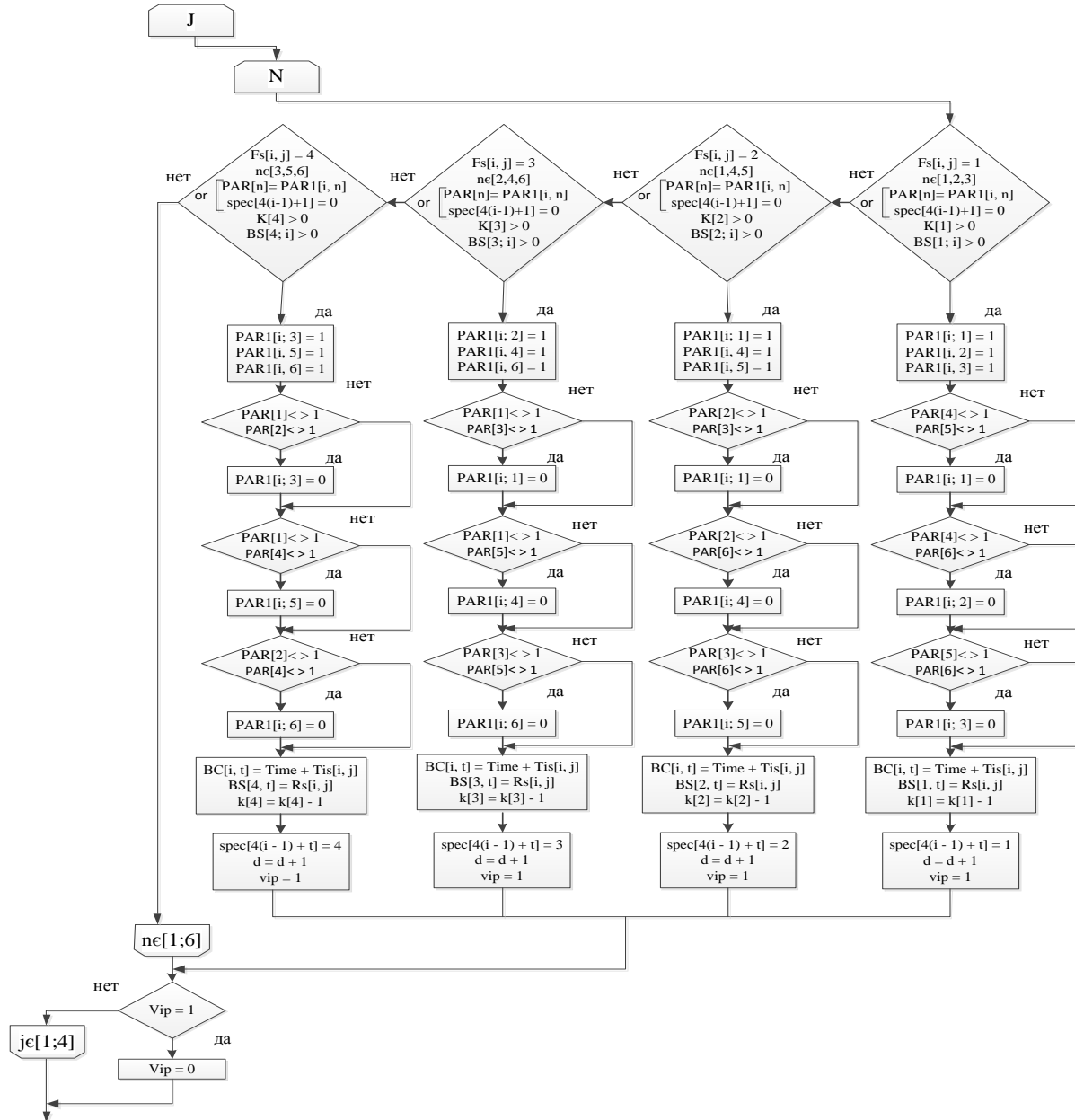


Рис. 5. Блок оптимального распределения специалистов по воздушным судам

На рис. 5. PAR – запоминает, какие специальности могут выполнять работу параллельно (всего возможно шесть вариантов: 1) СД-АВ, 2) СД-АО, 3) СД-РЭО, 4) АВ-АО, 5) АВ-РЭО, 6) АО-РЭО); $PAR1 [i, j]$ – запоминает, выполняется ли в данный момент параллельная работа на i -м ВС j -го из шести вариантов, указанных выше; Vip – определяет, выполняется ли работа специалистом на ВС для выхода из цикла переборки специальностей; d – количество выполненных работ на всех ВС; i, j, n, t – целочисленные значения, предназначенные для выполнения перебора (обычно i, t – номер ВС, j, n – номер специальности, t – канал параллельной работы, первый из четырех – основной, три других – дополнительные); $Time$ – переменная для набора времени от 0, где 0,000001 – одна секунда.

В качестве пользовательского интерфейса оператора предлагается использовать следующие формы таблиц. В табл. 1 вносятся данные о количестве личного состава по каждой специальности, а в табл. 2 – время выполнения подготовки к полету соответствующими специалистами. В рассматриваемом случае оператором является старший инженер полетов, который руководит инженерно-авиационной службой третьего уровня.

Таблица 1

Количество личного состава по специальностям (образец)

| Специальность | К (человек) |
|-------------------------------------|-------------|
| Самолеты и двигатель (СД) | – |
| Авиационное оборудование (АО) | – |
| Радиоэлектронное оборудование (РЭО) | – |
| Авиационное вооружение (АВ) | – |

Таблица 2

Время подготовки воздушных судов каждым специалистом по специальности (образец)

| Специальность | Время работы $T_{п}$ (минут) |
|---------------|------------------------------|
| СД | – |
| АО | – |
| РЭО | – |
| АВ | – |

Текущая вероятность отказов всех ВС по всем специальностям должна уточняться после каждого полета, что обеспечит ее актуальность в любой момент времени. Форма учета данных показателей надежности представлена в виде табл. 3.

Таблица 3

Вероятности отказов воздушных судов по каждой специальности (образец)

| Специальность | | | | | Отказы | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|-------------|-----|-------------|--------|---|---|-----|------|---|---|-----|------|---|---|-----|------|---|---|-----|---|
| | | | | | ВС 1 | | | | ВС 2 | | | | ВС 3 | | | | ВС 4 | | | | |
| $q_1^{СД}$ | $q_2^{СД}$ | $q_3^{СД}$ | ... | $q_j^{СД}$ | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – |
| $q_1^{АВ}$ | $q_2^{АВ}$ | $q_3^{АВ}$ | ... | $q_j^{АВ}$ | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – |
| $q_1^{АО}$ | $q_2^{АО}$ | $q_3^{АО}$ | ... | $q_j^{АО}$ | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – |
| $q_1^{РЭО}$ | $q_2^{РЭО}$ | $q_3^{РЭО}$ | ... | $q_j^{РЭО}$ | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – | – | – | ... | – |

Предполагается, что статистика отказов самолетных систем заранее известна, и ее значения приводятся в виде табл. 4.

Таблица 4

Время восстановления отказов по специальностям (образец)

| Время восстановления \ Специальность | СД | АВ | АО | РЭО |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| t_{B1}^i | $t_{B1}^{СД}$ | $t_{B1}^{АВ}$ | $t_{B1}^{АО}$ | $t_{B1}^{РЭО}$ |
| t_{B2}^i | $t_{B2}^{СД}$ | $t_{B2}^{АВ}$ | $t_{B2}^{АО}$ | $t_{B2}^{РЭО}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| t_{Bj}^i | $t_{Bj}^{СД}$ | $t_{Bj}^{АВ}$ | $t_{Bj}^{АО}$ | $t_{Bj}^{РЭО}$ |

Предложенный алгоритм для ввода исходных данных можно изменить под особенности конкретного авиационного подразделения или воинской части.

В результате применения разработанного алгоритма формируется очередность выполнения работ всеми специальностями на конкретных ВС, которая представляется в форме табл. 5.

Таблица 5

Приоритет специалистов при обслуживании группы воздушных судов с учетом вероятностей отказов и времени их восстановления по каждой специальности

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Приоритет специалистов | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Номер ВС | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Специальность | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПРИМЕР

Пусть для подготовки четырех однотипных ВС привлекается три специалиста по СД, два – по АО, один – по РЭО и два – по АВ (табл. 6).

Таблица 6

Количество личного состава по специальностям

| Специальность | К (человек) |
|---------------|-------------|
| СД | 3 |
| АО | 2 |
| РЭО | 1 |
| АВ | 2 |

Время подготовки по каждой из специальностей приведено в табл. 7.

Таблица 7

Время подготовки воздушных судов каждым специалистом по специальности

| Специальность | Время работы T_{Π} (минут) |
|---------------|--------------------------------|
| СД | 30 |
| АО | 15 |
| РЭО | 10 |
| АВ | 5 |

Таким образом, введенный параметр – гипотетическое время подготовки k -го ВС по i -й специальности T_{Π}^k – находится из выражения (2). Время восстановления – t_{Bj}^i j -го отказа по i -й специальности не зависит от номера воздушного судна (табл. 8).

Таблица 8

Время восстановления отказов по специальностям

| Время восстановления \ Специальность | СД | АВ | АО | РЭО |
|--------------------------------------|----|----|----|-----|
| t_{B1}^i | 10 | 5 | 10 | 10 |
| t_{B2}^i | 20 | 10 | 15 | 10 |

Примем в расчет два наиболее вероятных отказа по каждой специальности (табл. 9).

Таблица 9

Вероятности отказов двух основных систем и время восстановления на k-го ВС

| Специальность | | Отказы | | | | | | | |
|---------------|-------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | ВС 1 | | ВС 2 | | ВС 3 | | ВС 4 | |
| q_1^{CD} | q_2^{CD} | 0,07 | 0,03 | 0,06 | 0,04 | 0,15 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| q_1^{AB} | q_2^{AB} | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,05 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| q_1^{AO} | q_2^{AO} | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,05 |
| q_1^{PEO} | q_2^{PEO} | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |

На основе исходных данных в первую очередь определяем время восстановления рассматриваемых отказов всех воздушных судов (2), а затем из выражения (3) – рейтинги специалистов для каждого воздушного судна.

В результате применения разработанного алгоритма на основе заданных исходных данных сформирована очередность выполнения работ специалистами на конкретных ВС, представленная в форме табл. 10.

Таблица 10

Приоритет специалистов с учетом вероятностей отказов всех ВС по каждой специальности

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Приоритет специалистов | 13 | 12 | 11 | 11 | 10,83 | 10,5 | 10,47 | 10,43 | 9,25 | 8,75 | 8,75 | 8,125 | 2,875 | 2,675 | 2,625 | 2,575 |
| Номер ВС | ВС 1 | ВС 3 | ВС 2 | ВС 4 | ВС 3 | ВС 4 | ВС 2 | ВС 1 | ВС 3 | ВС 1 | ВС 4 | ВС 2 | ВС 2 | ВС 1 | ВС 3 | ВС 4 |
| Специальность | РЭО | РЭО | РЭО | РЭО | СД | СД | СД | СД | АО | АО | АО | АО | АВ | АВ | АВ | АВ |

С учетом количества личного состава ИАС, вероятностей отказов всех ВС по каждой специальности и времени их восстановления строится очередность выполнения работ в порядке убывания приоритета.

На основе результатов алгоритма оптимального распределения специалистов инженерно-авиационной службы по критерию минимума времени подготовки группы воздушных судов с учетом текущих вероятностей их отказов по каждой специальности формируется график подготовки четырех ВС имеющимися силами ИАС с учетом времени подготовки по каждой специальности и вероятностями отказов ВС (рис. 6).

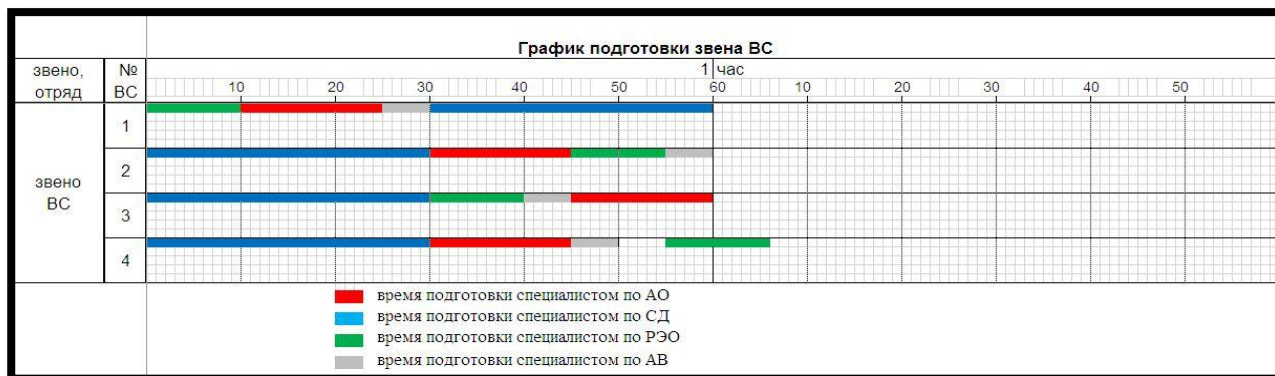


Рис. 6. График подготовки группы ВС (звена) в условиях ограниченных сил инженерно-авиационной службы

Полученный график подготовки позволяет формировать личные планы для всех задействованных специалистов, что обеспечивает минимизацию времени подготовки группы.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Шесть экспертов с опытом выполнения обязанностей старшего инженера полетов располагаются на расстоянии друг от друга, обеспечивающем исключение их общения.

Каждому эксперту выдаются анкеты по форме, представленной на рис. 7, в которых отражены исходные данные для трех вариантов, отличающихся количественным составом специалистов инженерно-авиационной службы, при следующих событиях в процессе подготовки для каждого варианта:

- без отказов авиационной техники (Б);
- с условным отказом № 1 по СД (замок выпуска тормозного парашюта ЗТП-Д-3) самолета № 2 (б/н 05) на 20-й минуте подготовки по данной специальности (1);
- с условным отказом № 2 по АО (блок вычислительных устройств БВУ-10) самолета № 3 (б/н 07) на 25-й минуте подготовки по данной специальности (2).

| Результаты эксперимента по оценке времени подготовки к боевому применению звена самолетов Су-34 без применения алгоритма | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----------|--|--|-----|-----------|-----|----|----|-----------|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Б - без отказов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 - отказ №1 по СД самолет № 2 на 20 мин | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 - отказ №2 по АО самолет № 3 на 25 мин | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Вариант №1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| СД | АВ | АО | РЭО | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 3 | 3 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Эксперт 1 | | | | Эксперт 2 | | | | Эксперт 3 | | | | Эксперт 4 | | | | Эксперт 5 | | | | Эксперт 6 | | | | | | | | | | |
| Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | | | |
| $t_{пл}$, МИН. | 5 | | | | | | 11 | | | | | | 5 | | | | 7 | | | | | | 6 | | | | 8 | | | |
| t_n , МИН. | 60 | 60 | 75 | | | | 60 | 65 | 75 | 60 | 65 | 65 | 60 | 65 | 60 | 60 | 65 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 75 | |
| $t_{оп}$, МИН. | | 2 | 3 | | | | | 2 | 3 | | | | 2 | 3 | | | | 2 | 2 | | | | 2 | 3 | | | 2 | 3 | | |
| Вариант №2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| СД | АВ | АО | РЭО | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2 | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | | | |
| $t_{пл}$, МИН. | 5 | | | | | | 7 | | | | | | 5 | | | | 5 | | | | | | 6 | | | | 6 | | | |
| t_n , МИН. | 75 | 75 | 90 | | | | 70 | 70 | 95 | 65 | 65 | 85 | 65 | 65 | 85 | 65 | 65 | 85 | 65 | 70 | 95 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 85 | | |
| $t_{оп}$, МИН. | | 3 | 5 | | | | | 3 | 4 | | | | 3 | 5 | | | 3 | 4 | | | | 4 | 5 | | | 4 | 5 | 3 | 4 | |
| Вариант №3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| СД | АВ | АО | РЭО | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | Б | 1 | 2 | | | | | | | |
| $t_{пл}$, МИН. | 7 | | | | | | 7 | | | | | | 6 | | | | 6 | | | | | | 7 | | | | 7 | | | |
| t_n , МИН. | 100 | 100 | 100 | | | | 100 | 100 | 100 | 90 | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 80 | 80 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | |
| $t_{оп}$, МИН. | | 4 | 4 | | | | | 3 | 3 | | | | 3 | 3 | | | 3 | 3 | | | | 4 | 4 | | | 3 | 3 | | | |

Рис. 7. Протокол эксперимента по оценке времени подготовки к боевому применению звена самолетов Су-34 без применения алгоритма

Варианты количества личного состава ИАС по специальностям представлены в табл. 11.

Таблица 11

Варианты количественного состава специалистов инженерно-авиационной службы при проведении эксперимента

| Специальность | СД | АВ | АО | РЭО |
|---------------|----|----|----|-----|
| Вариант 1 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Вариант 2 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| Вариант 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |

В качестве исходных данных также представляются значения времени подготовки самолета Су-34 в соответствии с технологическими картами и времени восстановления двух наиболее вероятных отказов по всем специальностям.

Экспертам предлагается распределить личный состав специалистов инженерно-авиационной службы по воздушным судам исходя из их располагаемого количества в соответствии с вариантом и представить результат решения данной задачи в виде технологического графика. При этом считаем, что в процессе подготовки к боевому применению звена самолетов Су-34 отказов не выявлено (событие Б).

Протоколируются следующие результаты измерений (для всех трех вариантов):

– время планирования ($t_{пл}$) – от команды «старт» модератора до момента завершения формирования оптимального технологического графика;

– время подготовки звена самолетов Су-34 в соответствии с технологическими картами ($t_{п} + t_{оп}$) по сформированному оптимальному технологическому графику от начала работы специалистов на авиационной технике до ее окончания.

Диаграммы зависимостей времени подготовки воздушных судов от вариантов и событий с использованием разработанного алгоритма и без него представлены на рис. 8.

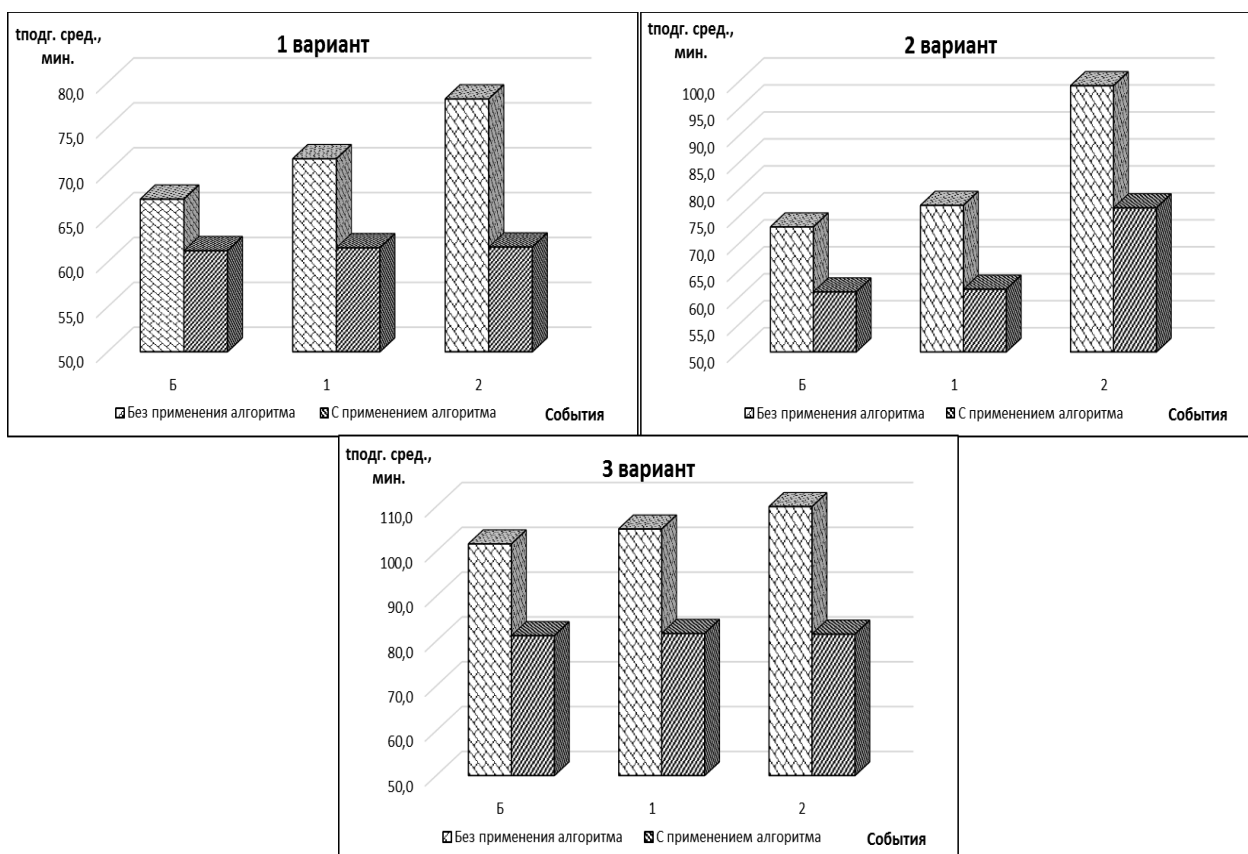


Рис. 8. Диаграммы зависимостей времени подготовки воздушных судов от вариантов и событий

При анализе рис. 8 сокращение времени подготовок составляет от 6 до 28 минут в зависимости от вариантов и событий, это дает от 9 до 26% относительного выигрыша.

На рис. 9 представлена диаграмма сокращения времени подготовки при использовании относительного прироста с использованием разработанного алгоритма оптимального управления инженерно-авиационной службой при подготовке к полетам группы воздушных судов в условиях ограниченного количества личного состава.

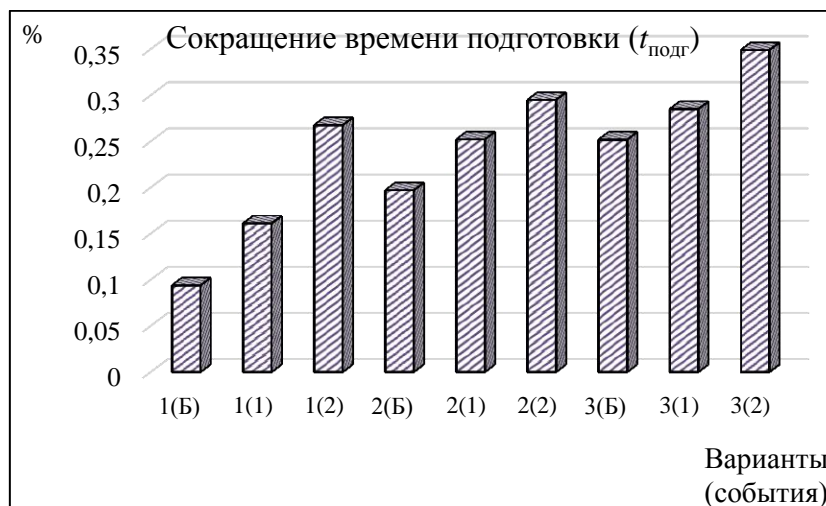


Рис. 9. Сокращение времени подготовки при использовании алгоритма

Соответствующая диаграмма (рис. 9) демонстрирует сокращение времени подготовки за счет применения разработанного алгоритма оптимального управления инженерно-авиационной службой в процессе подготовки к полетам группы воздушных судов в условиях ограниченного количества личного состава от 10 до 36%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм оптимального управления инженерно-авиационной службой при подготовке к полетам группы воздушных судов в условиях ограниченного количества личного состава, обеспечивающей минимизацию общего времени подготовки в условиях ограниченного количества личного состава. Приоритет специалистов определяется на основе информации об их количестве и регламентированного времени подготовки ВС по каждой специальности. С целью определения приоритета ВС алгоритм учитывает вероятности отказов каждого из них по всем специальностям и время их восстановления. В итоге формируется очередь выполнения работ всеми специалистами на всех ВС в порядке убывания приоритета « i -я специальность – k -е ВС».

В результате проведенных численных исследований разработанного алгоритма установлено, что его применение позволяет минимизировать время подготовки группы ВС в заданных условиях. Для практической реализации данного алгоритма необходимо владеть информацией о текущих вероятностях отказов всех ВС по всем специальностям, что не составляет проблемы, так как данные показатели надежности рассчитываются по статистическим данным.

Список используемых источников

1. Бочаров П.П., Печеникин А.В. Теория массового обслуживания: учебник. – М.: РУДН, 1995. – 529 с.
2. Новицкий Н.И. Сетевое планирование и управление производством: учеб.-практ. пособие. – М.: Новое значение, 2004. – 159 с.
3. Эксплуатация и ремонт авиационной техники: научно-метод. материалы / под ред. В.И. Богданова. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1990. – 354 с.
4. Коновалов О.А., Малыков К.А., Зырянов Ю.Т. Распределение ресурсов в организационно-технических системах: монография. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – 129 с.

5. *Головина В.Я.* Информационное и математическое обеспечение задач управления организационно-техническими системами: учеб. пособие. – Воронеж: ВАГУ, 2002. – 231 с.
6. *Богомолов Д.В.* Моделирование систем и процессов: учеб. пособие. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – 312 с.
7. Алгоритм формирования приоритета выполнения работ специалистами инженерно-авиационной службы в процессе подготовки группы воздушных судов. Актуальные проблемы и перспективные направления развития комплексов авиационного оборудования / М.И. Яцечко, С.В. Ипполитов, А.Ю. Савченко, Н.Г. Лубянецкий // Сб. науч. статей по материалам VII Международной науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения» (20–21 ноября 2019 года). – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. – С 250–253.
8. Федеральные авиационные правила инженерно-авиационного обеспечения государственной авиации. – М.: МО РФ, 2004. – Кн. 1. – 252 с.
9. Федеральные авиационные правила инженерно-авиационного обеспечения государственной авиации. – М.: МО РФ, 2007. – Кн. 3. – 369 с.
10. *Румянцев Е.А., Осовский В.П., Протопопов В.А.* Инженерно-авиационное обеспечение боевых действий частей авиации Вооруженных Сил и эксплуатации авиационного оборудования. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1989. – 397 с.
11. *Кудрявцев Е.М.* Microsoft Project. Методы сетевого планирования и управления проектом. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 240 с.

В.Е. Ванягин,
кандидат воен. наук,
Михайловская военная артиллерийская академия МО РФ;
М.Р. Ванягина,
кандидат пед. наук, доцент,
Санкт-Петербургский военный институт ВНГ РФ;
С.М. Молдованова,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

ОЦЕНИВАНИЕ УРОВНЯ ДОВЕРИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ОБУЧЕННОСТИ ИСПЫТУЕМЫХ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОКТОРИНГА

Технология прокторинга обеспечивает контроль за учебными испытаниями, проводимыми онлайн. Предложенная методика оценивания уровня доверия к результатам экзаменуемого при осуществлении прокторинга позволяет объективно оценить проведенные испытания на основе разработанных метрик и показателей и вынести решение о возможности засчитать результаты экзаменуемого.

Ключевые слова: прокторинг, проктор, дистанционное обучение, учебное онлайн-испытание, высшая военная школа, методика оценивания уровня доверия.

В условиях информатизации и цифровизации всех сфер общества возникает потребность решения проблем организации эффективной образовательной деятельности с применением дистанционных технологий. В июле 2020 года Указом Президента Российской Федерации определены национальные цели развития нашей страны на период до 2030 года, одна из которых – цифровая трансформация общества [1].

В связи с распространением коронавирусной инфекции многие учебные заведения в 2020 году вынуждены были перейти на дистанционную форму обучения и адаптироваться к новым условиям реализации учебного процесса. Так, например, в Санкт-Петербургском военном ордена Жукова институте войск национальной гвардии РФ во время ограничительных карантинных мер проводились все запланированные учебным планом занятия как в традиционной, так и в дистанционной форме. Руководство института в кратчайшие сроки организовало деятельность всех отделов и служб для эффективного проектирования и обеспечения дистанционной образовательной деятельности. Удаленно проводились занятия разных видов: лекции, семинары, практические занятия по иностранным языкам, а также зачеты и экзамены, с учащимися всех категорий – курсантами, слушателями, адъюнктами. Отдельно необходимо отметить, что впервые в институте дистанционно были проведены вступительные экзамены в адъюнктуру. По количеству учебных групп были подготовлены оснащенные специальным оборудованием, видеокамерами и защищенным выходом в интернет учебные аудитории. Учебным отделом военного института проведена работа по планированию и организации образовательной деятельности в этих условиях. За каждой аудиторией были закреплены ответственные лица из числа офицеров учебного отдела и представителей отделов и кафедр института, которые проводили обслуживание учебного информационного оборудования и осуществляли мониторинг и контроль проведения образовательного процесса, то есть по сути занимались прокторингом дистанционного обучения.

Такой бесценный опыт применения дистанционных технологий указал на необходимость решения новых образовательных задач и задал перспективные направления развития высшей военной школы. Он, несомненно, требует критического осмысления, анализа и научного обоснования для дальнейшего эффективного функционирования образовательной системы, готовой своевременно и адекватно реагировать на любые вызовы времени.

Налицо все признаки перехода военного образования на новую стадию в эпоху цифровых технологий. Как отмечают А.П. Шарухин и Т.Г. Шарухина, «развитие образования детерминировано потребностями общества, государства, ... ключевым педагогическим признаком (критерием) периодизации образования может и должен выступить научный подход» [2, с. 229]. Развитие системы образования выходит на новый цифровой уровень, соответственно, переход должен быть на научной основе. «В современных условиях объективные закономерности развития военного дела требуют научного подхода к решению всех практических задач и, соответственно, расширения военно-научных исследований, повышения их результативности» [3, с. 66]. В образовательный процесс активно вводятся дистанционные формы обучения, и возникает вопрос о качестве такой подготовки, на первый план выходят проблемы организации, наблюдения и объективного контроля за проведением дистанционных занятий и испытаний.

Контроль проведения дистанционных учебных испытаний обеспечивается прокторингом. Прокторинг – это процедура контроля за обучающимися на испытательном мероприятии, проходящем онлайн: тестировании, контрольной работе, зачете, экзамене. Как правило, контроль за процессом осуществляет специально назначенный для выполнения этой функции проктор либо автоматизированная программа прокторинга.

Основываясь на общедидактических и частнометодических принципах, можно выстроить эффективную систему прокторинга, обеспечивающую достоверность результатов дистанционного обучения и испытаний. Система прокторинга отвечает определенным требованиям и включает в себя прохождение последовательных процедур и действий.

Требования при прокторинге предъявляются к экзаменуемым, экзаменаторам, помещениям, в которых проводится обучение или испытание, и к оборудованию. Помещения должны иметь эргономичную архитектуру и технические возможности для подключения устойчивого защищенного канала связи с использованием персонального компьютера, оборудованного веб-камерой высокого разрешения. Оборудование должно иметь установленное программное обеспечение с набором необходимых функций: запись экрана, фиксация параллельных входов, открытия дополнительных браузеров и т. п.

Для запуска испытания экзаменуемый регистрируется в системе, получив необходимые пароли и коды доступа, а затем в указанное время проходит указанные этапы процедуры прокторинга. Требования к экзаменуемому прописаны в условиях, с которыми обучающийся знакомится перед выполнением испытания и дает свое согласие на их соблюдение. Основные требования к экзаменуемому во время прохождения онлайн-испытаний представлены на рис. 1.

Нарушения требований фиксируются прокторами-администраторами или специальной программой. Проктор отслеживает процесс прохождения испытания с использованием системы фиксации возможных нарушений правил. При каждом нарушении он выносит замечание и следит за реакцией испытуемого. В случае многочисленных и грубых нарушений, отсутствии реакции обучающегося на неоднократные предупреждения проктор может остановить экзамен и/или не засчитать его результаты. Если возникают спорные моменты при прохождении экзамена, то их можно разрешить после просмотра записи испытания.

Сейчас активно разрабатываются различные программные продукты, которые помогают осуществлять автоматизированный прокторинг. Разработчики программного обеспечения и представители организаций-провайдеров предлагают установить готовые эффективные программы прокторинга: ProctorU, ProctorEdu, ProctorExam, Examity и др. Программное обеспечение автоматически распознает нарушения правил экзамена, посылает предупреждающие сигналы экзаменуемому и, если последний игнорирует требования прекратить нарушения, аннулирует результаты экзамена. Кроме того, программа выполняет функции верификации личности, записи прохождения испытаний, технического сопровождения испытуемого на протяжении выполнения заданий, просчитывать уровень доверия к результатам экзамена.

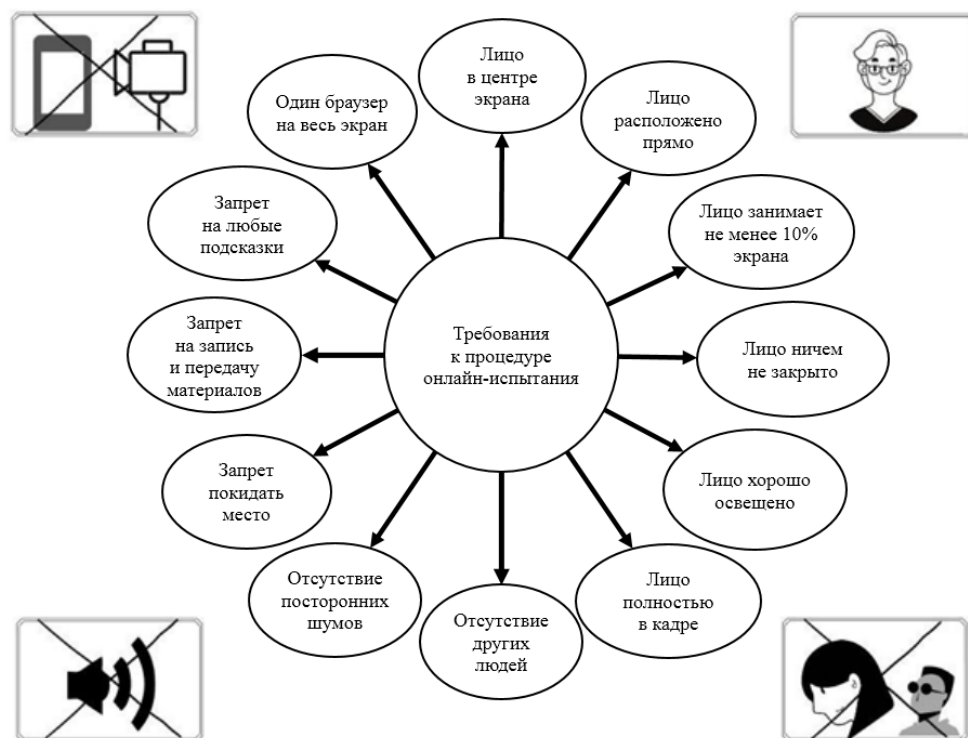


Рис. 1. Требования к экзаменуемым во время прохождения онлайн-испытаний

Основная функция прокторинга – обеспечение достоверности результатов обучения и проводимых испытаний. Прокторинг может быть трех видов: живой, автоматизированный и полуавтоматизированный. *Живой* прокторинг — приглашенный администратор отслеживает все происходящее либо вживую в аудитории, либо через веб-камеру и фиксирует все необходимые метрики процесса и нарушения. *Автоматизированный* прокторинг – использование специализированного программного обеспечения прокторинга. *Полуавтоматизированный* прокторинг – сочетание работы администратора и автоматизированной программы.

Для оценивания достоверности результатов испытуемого необходимо применение определенных методик, позволяющих на основании обоснованных и утвержденных показателей, фиксируемых определенным образом во время испытания, определить уровень доверия к полученным результатам и решить, возможно ли считать их удовлетворительными, а испытание пройденным. Живой проктор при необходимости взаимодействует с участниками. Он сам выносит решение и делает заключение. Как поступить, когда не хватает людских ресурсов и невозможно обеспечить все экзамены «живыми» прокторами? С внедрением в будущем в учебные заведения технологии прокторинга и обеспечением высокотехнологическим оборудованием, разрабатываются различные методики оценивания уровня освоения компетенций обучающимися, качества их подготовки [4] и уровня доверия к результатам обучения на основе применения математических методов или автоматизированного программного обеспечения [5]. Однако не все они позволяют определять не только наличие показателей, снижающих уровень доверия, но и учитывать критическую значимость каждого показателя для вынесения итогового решения о возможности засчитать результаты испытуемого. Представляем методику оценивания уровня доверия к результатам дистанционного контроля обученности испытуемых с применением технологии автоматизированного (полуавтоматизированного) прокторинга.

На протяжении всего сеанса собираются данные по установленным показателям (метрикам). Данные собираются либо автоматизированной системой с применением специального программного обеспечения, либо проктором с фиксацией вида нарушений и их времени и количества. У каждого показателя (метрики) есть своя значимость или «вес», в совокупности

веса всех метрик равны 1. Веса метрик определяются на основании метода экспертной оценки, например, решением экспертной комиссии, в состав которой могут назначаться педагоги, имеющие большой опыт приема экзаменов, психологи и специалисты по информационным технологиям и др. Эти веса используются при формировании оценивания доверия. На них умножаются зафиксированные показатели в сеансе и проводится формирование оценивания уровня доверия. При соблюдении всех требований показатели равны 1, при нарушении требований значение показателя уменьшается, например, пропорционально времени нарушения.

Приняв за основу четырехбалльную систему оценивания, принятую в российском образовании [6], предлагаем использовать следующие уровни доверия к результатам дистанционного контроля:

- *высокий уровень (отличный)*;
- *средний уровень (хороший)*;
- *низкий уровень (удовлетворительный)*;
- *критический уровень (неудовлетворительный)*.

Критерии оценивания доверия к результатам дистанционного контроля обученности испытуемых целесообразно привести к принятым в практике войск значениям подготовки военнослужащих, установленным наставлениями, курсами подготовки, сборниками нормативов для соответствующих специалистов. Например, в «Курсе подготовки артиллерии» [7], показатели уровня подготовки подразделений (доверия) находятся в пределах, указанных в табл. 1. Поэтому предлагаем использовать данные требования и к процедуре прокторинга.

Таблица 1

Уровни доверия к результатам дистанционного контроля обученности испытуемых при прокторинге

| Среднее значение критерия (метрики) прокторинга | Уровень доверия к результатам дистанционного контроля обученности испытуемых при прокторинге | Результат контроля |
|---|--|--------------------|
| 0,9 и выше (90% ÷ 100%) | высокий (отличный) | засчитывается |
| от 0,8 до 0,9 (80% ÷ 90%) | средний (хороший) | |
| от 0,7 до 0,8 (70% ÷ 80%) | низкий (удовлетворительный) | |
| ниже 0,7 (70%) | критический (неудовлетворительный) | не засчитывается |

Представим схематическое и наглядное применение методики определения уровня доверия к результатам дистанционного контроля обученности испытуемых при применении прокторинга в виде развернутого поэтапного плана.

1. *Определение показателей M_x (метрики), применяемых при проведении прокторинга (x от 1 до m) (табл. 2).* Метрики выбираются исходя из вида прокторинга, состава наличествующих аппаратных средств, вида программного обеспечения, используемых технологий и др.

2. *Определение доли, значимости («веса») p_{M_x} показателей (метрик) M в оценке качества прокторинга:* p_{M_x} определяется экспертами (экспертной группой) и/или администратором и

находится в пределах от 0 до 1, при условии, что сумма всех весов $\sum_{i=1}^m p_{M_x} = 1$.

3. *Определение усредненного значения качества $q_{M_{\text{ср}}}$ применяемых показателей (метрик) $M \in \{B_1, B_2, C_1, C_2, \dots\}$ за совокупное время сеанса T дистанционного контроля (t – количество проверок за время контроля, дискретное значение, задается администратором или программным продуктом, измеряется в пределах от 0 до 1,0) [метрика не выполняется – $q_t = 0$; метрика выполняется – $q_t = 1$]*

$$q_{M_{\text{ср}}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n q_t, \quad (1)$$

Таблица 2

Показатели, применяемые в автоматизируемом прокторинге

| № п/п | Показатели (метрики) | |
|-------|---|---|
| 1 | браузера ($B_1, B_2, \dots B_n$) | – браузер не поддерживается; – переключен фокус на стороннее приложение; – окно браузера не развернуто на весь экран и (или) др. |
| 2 | камеры ($C_1, C_2, \dots C_n$) | – камера не работает; – плохо видно лицо перед камерой; – замечен посторонний человек; – лицо перед камерой не соответствует профилю; – обнаружено сходство лица с другим профилем и (или) др. |
| 3 | клавиатуры ($K_1, K_2, \dots K_n$) | – зафиксирован нетипичный клавиатурный почерк и др. |
| 4 | микрофона ($M_1, M_2, \dots M_n$) | – микрофон не работает или приглушен; – слышен разговор или шум на фоне и (или) др. |
| 5 | сети ($N_1, N_2, \dots N_n$) | – проблема с сетевым подключением; – проблема с подключением мобильной камеры и (или) др. |
| 6 | монитора ($S_1, S_2, \dots S_n$) | – нет видео с экрана; – используется дополнительный монитор и (или) др. |

4. Определение уровня доверия Q к результатам контроля, подвергающегося проверке обучающегося, в процессе прокторинга использованием выбранных показателей (метрик), находится в интервале от 0 до 1,0 или от 0 до 100%,

$$Q = P_{M1} \cdot q_{M1cp} + P_{M2} \cdot q_{M2cp} + \dots + P_{Mm} \cdot q_{Mmcp}, \quad (2)$$

или

$$Q = \sum_{M=1}^x (P_{Mx} \cdot q_{Mxcp}) = Q_{M1} + Q_{M2} + \dots + Q_{Mm}, \quad (3)$$

Приведем пример определения уровня доверия к результатам дистанционного контроля обученности испытуемых при проведении прокторинга. Пошаговая методика определения значений показателей и критериев результата сдачи обучающимся испытания представлена в табл. 3.

С помощью пошаговой процедуры определяется уровень достоверности результатов испытания и выносится окончательное решение относительно возможности засчитать эти результаты. Подобные методики помогают воспрепятствовать возросшему в последнее время в связи с массовым переходом в онлайн-обучение «неправомерному академическому поведению» (academic misconduct, academic dishonesty, cheating) [8], когда студенты/курсанты пользуются запрещенными в учебном процессе приемами (списывание, подсказки, шпаргалки, плагиат и др.) в целях введения в заблуждение относительно их истинного уровня знаний и компетенций.

Таким образом, прокторинг позволяет осуществлять контроль при проведении дистанционного обучения в высшей военной школе. Контроль может выполнять и обучающую функцию, если экзаменуемый получает возможность узнать, где сделаны ошибки, проанализировать их [9].

В данной работе в развитие представленных в предыдущих исследованиях модели прокторинга, понятий, принципов, способов, области применения и этапов процедуры прокторинга предложены требования к процедуре прокторинга, методика оценивания уровня доверия к результатам при проведении процедуры прокторинга, показатели и критерии такого оценивания.

Таблица 3

**Этапы применения методики оценивания уровня доверия
к результатам дистанционного контроля обученности испытуемых
при проведении процедуры автоматизированного прокторинга**

| № п/п | Действие | Характеристики и их показатели | | | | | |
|-------|--|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | | браузера | камеры | клавиатуры | микрофона | сети | монитора |
| 1. | 1.1. Определение показателей (метрики) M_x | | | | | | |
| | 1.2. Присвоение аббревиатур индикаторам | B_1 B_2 ... B_n | C_1 , C_2 , ... C_n | K_1 , K_2 , ... K_n | M_1 , M_2 , ... M_n | N_1 , N_2 , ... N_n | S_1 , S_2 , ... S_n |
| 2. | Определение экспертами значимости («веса») метрики P_{M_x} | 0,10 | 0,40 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,20 |
| 3. | Расчет качества метрики $q_{M_{cp}}$ при проведении контроля (1) (больше нарушений, ниже качество) | 0,95 | 0,55 | 0,80 | 0,75 | 0,95 | 0,90 |
| 4. | 4.1. Расчет качества метрики с учетом ее значимости Q_{M_n} | 0,095 | 0,22 | 0,08 | 0,075 | 0,095 | 0,18 |
| | 4.2. Определение значения критерия показателя уровня доверия к результатам прокторинга Q (2, 3) | 0,095+0,22+0,08+0,075+0,095+0,18=0,745 или 74,5% | | | | | |
| 5. | 5.1. Определение уровня доверия к результатам (по табл. 1) | «низкий» | | | | | |
| | 5.2. Результаты сдачи обучающимся испытания (засчитываются / не засчитываются) | засчитываются | | | | | |

Данное направление достаточно перспективно для исследований и внедрения в образовательную деятельность. Дальнейшее изучение вопросов диагностики, контроля и мониторинга различных показателей дистанционного образования и определения уровня доверия результатов онлайн-обучения позволит эффективно организовать образовательный процесс и тем самым повысить качество подготовки военных специалистов.

Список используемых источников

1. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 года № 474. – URL: <https://rg.ru/2020/07/22/ukaz-dok.html> (дата обращения: 21.07.2020).
2. Шарухин А.П., Шарухина Т.Г. История образования: периодизация и тенденции развития // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2018. – № 2 (78). – С. 229–233.
3. Современные проблемы подготовки научных кадров высшей квалификации по специальностям военной науки и направления ее совершенствования / А.А. Рахманов, Ю.В. Кулешов, А.Г. Ломако, Г.Н. Мальцев // Вооружение и экономика. – 2019. – № 2 (48). – С. 59–82.
4. Ванягин В.Е. Методика оценивания качества подготовки специалистов в военных образовательных организациях высшего образования на основе определения уровня сформированности их компетенций // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. – 2019. – № 1 (29). – С. 197–209. – URL: http://vestospu.ru/archive/2019/articles/17_29_2019.pdf (дата обращения: 21.07.2020). – DOI: 10.32516/2303-9922.2019.29.17.

5. Добровинский Д.С., Ловецкий И.В., Попов М.А. Прокторинг как инструмент развития дистанционного образования // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2018. – С. 27–32.

6. Об образовании в Российской Федерации: Федеральный закон от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174 (дата обращения: 12.08.2020).

7. Курс подготовки артиллерии (КПА-2017). – М.: Воениздат, 2017. – 150 с.

8. Etter S., Cramer J., Finn S. Origins of academic dishonesty: Ethical orientations and personality factors associated with attitudes about cheating with information technology // Journal of Research on Technology in Education. – 2006. – № 39 (2). – P. 133–155. – DOI: 10.1080/15391523.2006.10782477.

9. The Basic Requirements for the Development of Efficient Applications for E-Learning / N.B. Kunturova, A.L. Prokofieva, N.V. Vasilieva, N.S. Jasnova, I.N. Evgrafova, N.S. Yakushkina // Proceedings of the 2019 International Conference on Pedagogy, Communication and Sociology (ICPCS 2019). – Ningbo, China, 2019. – Vol. 315. – P. 1–8.

М.А. Голубев,
кандидат воен. наук, доцент;
Л.В. Розанова

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ СО СЛУЖЕБНЫМИ ОТЗЫВАМИ НА ВЫПУСКНИКОВ ВОЕННО-КОСМИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ ИМЕНИ А.Ф. МОЖАЙСКОГО

Исследованы последовательность и специфика организации обработки, анализа служебных отзывов на выпускников и принятия решения по внесению изменений в основные профессиональные образовательные программы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

Ключевые слова: служебный отзыв, функциональная модель.

Оценка качества подготовки выпускников Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (ВКА), даваемая по месту их службы, является одним из важнейших и общепризнанных критериев оценки эффективности работы факультетов и кафедр, элементом совершенствования образовательной деятельности по реализации основных профессиональных образовательных программ (ОПОП). Такая оценка дается в служебных отзывах, которые составляются на каждого выпускника через год после окончания обучения и высылаются в адрес начальника ВКА до 1 октября года их представления. Работа по организации составления и отправки в ВКА служебных отзывов на выпускников возлагается на командиров воинских частей и начальников организаций Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ).

Служебные отзывы составляются на бланке утвержденной типовой формы, который содержит комплексную характеристику подготовки и служебной деятельности выпускника по 34-м показателям, распределенным по следующим разделам:

- социально-психологические качества;
- военно-профессиональная подготовленность;
- общевойсковая подготовка;
- общеинженерная и общенаучная подготовленность;
- особенности поведения в коллективе;
- время становления в должности;
- соответствие занимаемой должности.

В результате проведенных исследований разработана и апробирована функциональная модель работы со служебными отзывами на выпускников ВКА [1–3], представленная на рис. 1. В ней работа должностных лиц со служебными отзывами распределена на следующие три этапа:

- обработка и первичный анализ служебных отзывов;
- разработка предложений по совершенствованию образовательного процесса в ВКА;
- внесение изменений в основные профессиональные образовательные программы.

Служебные отзывы на выпускников поступают в академию из воинских частей и организаций МО РФ почтовыми отправлениями, регистрируются в строевом отделе и передаются в 61-й отдел военного института (научно-исследовательского) [ВИ (НИ)], для обработки и первичного анализа служебных отзывов.

Обработка служебных отзывов на выпускников включает в себя:

- сортировку служебных отзывов;
- проверку оформления и содержания служебных отзывов;
- внесение оценок в автоматизированную базу показателей и их обработку с составлением табличных и графических отчетов.

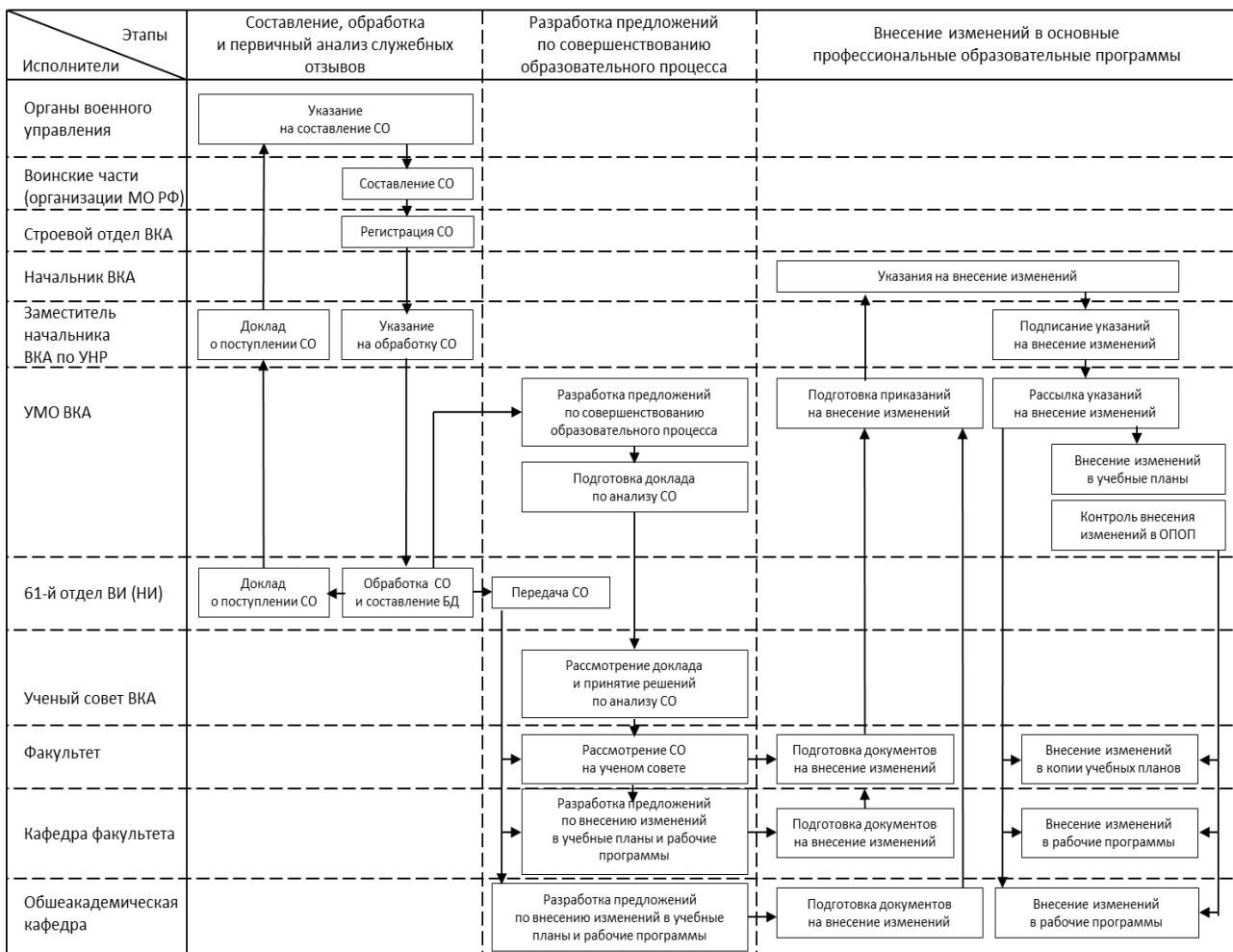


Рис. 1. Функциональная модель системы работы со служебными отзывами на выпускников

Сокращения, используемые на рисунке:

- БД – база данных;
- ВКА – Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского;
- СО – служебный отзыв;
- УМО – учебно-методический отдел;
- УНР – учебная и научная работа.

Сортировка служебных отзывов осуществляется по военным специальностям подготовки выпускников ВКА (выпускающим кафедрам). При этом ведется статистика поступления служебных отзывов по количеству и срокам. Доклады о поступлении служебных отзывов представляются в органы военного управления в установленные ими сроки.

Проверка оформления и содержания служебных отзывов направлена на оценку правильности их составления и взаимосвязи оценок показателей по каждому разделу с итоговыми выводами служебного отзыва.

Проверка оформления служебного отзыва включает проверку:

- заполнения всех разделов служебного отзыва и выставления оценок по всем показателям;
- наличия общих выводов, предложений и рекомендаций командиров по совершенствованию подготовки офицеров;
- наличия пожеланий и предложений выпускника командованию академии;
- наличия подписей должностных лиц, скрепленных отпечатками гербовой печати воинских частей (организаций) МО РФ.

Проверка содержания служебных отзывов заключается в рассмотрении взаимосвязи оценок по показателям с итоговым выводом о соответствии выпускника занимаемой должности. Например, в отдельных служебных отзывах ранее встречались случаи, когда большинство показателей оценено на «удовлетворительно», а в итоговом выводе выпускник достоин выдвижения на вышестоящую должность. Каждый служебный отзыв анализируется также по содержанию предложений и рекомендаций командиров по совершенствованию подготовки офицеров.

Служебные отзывы со значительными нарушениями, не позволяющими оценить деятельность выпускника, фиксируются и в проведении дальнейшего анализа не используются.

Обработка служебных отзывов на выпускников завершается внесением оценок в автоматизированную базу показателей для последующей обработки и составления табличных и графических отчетов. Подготовленные отчеты по оценкам показателей с анализом выводов, предложений и рекомендаций командиров передаются для дальнейшей обработки в учебно-методический отдел (УМО) ВКА.

На основе структурирования и обобщения результатов анализа служебных отзывов УМО осуществляет разработку предложений по совершенствованию образовательного процесса в ВКА.

На этом этапе осуществляется:

– проверка реализации мероприятий, запланированных по совершенствованию организации образовательного процесса и повышению качества подготовки выпускников, принятых ранее решениями ученых советов академии и факультетов, а также заседаний кафедр и предметно-методических комиссий;

– проведение итогового анализа выполнения показателей, оцененных в служебных отзывах, а также обобщение выводов, предложений и рекомендаций командиров по совершенствованию подготовки офицеров;

– разработка предложений по совершенствованию организации образовательного процесса и повышению качества подготовки выпускников.

УМО осуществляет подготовку доклада на ученый совет ВКА, в котором излагаются итоговые материалы по результатам анализа служебных отзывов, а также вносит предложения по совершенствованию организации образовательного процесса, повышению качества подготовки выпускников ВКА и внесению необходимых изменений в ОПОП.

После проведения заседания ученого совета ВКА для выполнения его решений 61-й отдел ВИ (НИ) передает служебные отзывы на факультеты.

На основании рассмотрения служебных отзывов на факультетах разрабатываются предложения по внесению изменений в ОПОП и совершенствованию работы кафедр, которые выносятся на рассмотрение ученых советов факультетов. При этом решения, принятые на их заседаниях, являются обязательными для рассмотрения на заседаниях кафедр. Решения ученого совета ВКА, касающиеся вопросов, решаемых общеакадемическими кафедрами (ОАК), рассматриваются на их заседаниях. При необходимости проводятся заседания предметно-методических комиссий (ПМК). На заседаниях кафедр и ПМК рассматриваются и обсуждаются обоснованные предложения для внесения изменений в учебные планы и рабочие программы учебных дисциплин. При подготовке изменений в рабочие программы кафедр необходимо установить взаимосвязь показателей служебных отзывов с формируемыми компетенциями ОПОП и индикаторами их достижения. Изменения в учебные планы и рабочие программы учебных дисциплин ВКА вносятся в установленном порядке [4, 5].

Начальники кафедр (заведующие кафедрами) о внесении изменений докладывают рапортом в УМО. Изменения в оригиналах учебных планов фиксируются в УМО, в копиях – учебными частями факультетов. Изменения в рабочих программах учебных дисциплин и тематических планах их изучения вносятся и фиксируются кафедрами. Начальник УМО с целью контроля выполнения решений ученых советов ВКА и факультетов (заседаний ОАК) организует контроль:

– внесения изменений в учебные планы, рабочие программы и тематические планы учебных дисциплин;

– преподавания учебных дисциплин по измененным ОПОП.

Проведенный анализ, представленной функциональной модели организации работы со служебными отзывами на выпускников ВКА, выявил следующее.

Служебные отзывы на выпускников являются важной составляющей в итоговой оценке качества военно-профессиональной подготовки выпускников, и результаты анализа их службы в войсках в настоящее время включены в перечень форм табеля срочных донесений (ТСД). Функции контроля и анализа текущего контроля успеваемости, промежуточной и государственной итоговой аттестации, подготовку отчетов соответствующим формам ТСД осуществляет УМО. В то же время обработкой и первичным анализом служебных отзывов занимаются сотрудники 61-го отдела ВИ (НИ), которые подчиняется начальнику ВИ (НИ) и по роду деятельности не могут выдавать какие-либо указания факультетам и кафедрам ВКА. Вследствие этого, последовательность работы со служебными отзывами, как это представлено в функциональной модели (рис. 1), несколько удлиняет путь и сроки их прохождения от поступления в ВКА до исполнения в конкретных подразделениях.

Таким образом, по результатам проведенного исследования функциональной модели организации работы со служебными отзывами на выпускников ВКА можно сделать следующие выводы:

– апробация разработанной функциональной модели подтвердила ее актуальность и эффективность в совершенствовании образовательной и методической деятельности ВКА;

– результаты исследования могут быть использованы в деятельности военно-учебных заведений МО РФ с учетом особенностей их оргштатной структуры и организации подготовки выпускников.

Список используемых источников

1. *Заболотский В.П., Оводенко А.А., Степанов А.Г.* Математические модели в управлении: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУАП, 2001. – 196 с.

2. Рекомендации по стандартизации Р50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200028629> (дата обращения: 30.04.2020).

3. *Марка Д.А., МакГоуэн К.* Методология структурного анализа и проектирования SADT (Structured Analysis & Design Technique) – URL: <http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/case/sadt0.htm&anchor=pred#pred> (дата обращения: 30.04.2020).

4. О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»: приказ Министра обороны Российской Федерации № 670 от 15.09.2014 года. – URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/70791866/paragraph/1:0> (дата обращения: 30.04.2020).

5. Методические указания по разработке, утверждению и обновлению элементов основной профессиональной образовательной программы высшего образования (специалитет, магистратура) и среднего профессионального образования в соответствии с модернизированными федеральными государственными образовательными стандартами в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского: утверждены приказом начальника Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского № 315. – МО РФ, 2020.

А.Н. Дегтярев*,
кандидат воен. наук;
А.П. Спирин*
* ВА МТО

ФОРМИРОВАНИЕ У КУРСАНТОВ ОТНОШЕНИЯ К НАЦИОНАЛЬНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ КАК ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ЦЕННОСТИ В ХОДЕ ИЗУЧЕНИЯ ГУМАНИТАРНЫХ ДИСЦИПЛИН

В статье рассматривается важность принятия курсантами своей национальной идентичности, понимание ее роли и значения в профессиональной деятельности. Раскрываются возможности гуманитарных дисциплин, преподаваемых в военных вузах, для формирования ценностного отношения курсантов к национальной идентичности.

Ключевые слова: гуманитарные дисциплины, национальная идентичность, профессиональные ценности, курсанты.

В современной научной литературе все чаще встречается тезис о том, что национальная идентичность граждан представляет собой неотъемлемую составляющую стабильности и устойчивости развития государства. Особое значение национальная идентичность имеет и для Вооруженных Сил Российской Федерации, так как лежит в основе профессиональной деятельности военных специалистов, являясь смыслообразующим элементом миссии военного, гарантом ценностного единства военнослужащих. Более того, учитывая специфику информационно-войны, мишенью в которой оказывается система национальных представлений и ценностей, укрепление национальной идентичности можно рассматривать как эффективное средство обеспечения национальной безопасности. Вопросы национальной идентичности важны и потому, поскольку именно она в значительной степени определяет чувство патриотизма.

Несмотря на значительные усилия, предпринятые на государственном уровне (например, программа патриотического воспитания граждан РФ, развитие военно-патриотического общественного движения «Юнармия»), а также на уровне военных образовательных организаций в рамках воспитательной и военно-политической работы, задача формирования у курсантов идеологии патриота своего Отечества не теряет своей остроты. Так, например, по данным исследования Т.А. Верняевой, курсантами военной академии патриотические ценности были определены по их жизненному значению на 8 позиции из 9 возможных [1, с. 44–45], что свидетельствует о необходимости серьезной реконструкции воспитательной и военно-политической работы с обучающимися военных образовательных организаций.

Другими словами, особое внимание к процессу национальной идентификации курсантов является одной из первостепенных задач для военных педагогов. Решение ее имеет отклик на уровне личности обучающегося в аспекте профессионального развития, и непосредственно отражается на состоянии армии, государства и общества. [2, с. 302].

В контексте темы исследования национальную идентичность мы рассматриваем как российскую национальную идентичность, которая является результатом осознания и принятия индивидом (коллективом) своей принадлежности к российской нации, ее историческому прошлому, системе ценностей, норм и идеалов, готовность определять ее будущее. Подчеркнем ее надэтнический характер, гражданскую и государственно-правовую природу.

Ален Турен, французский социолог, отмечает, что идентичность приобретает новое значение в гуманитарном знании, поскольку профессиональные группы имеют «общую чувствительность» к этой теме [3, с. 151]. На наш взгляд, у военнослужащих указанная тема

приобретает особую значимость. В связи с этим предметом нашего изучения является потенциал гуманитарных дисциплин, преподаваемых в военных образовательных организациях, для генерирования курсантами ценностного осознания места и роли национальной идентичности в их жизни.

Становление курсанта как военного человека – это процесс интериоризации молодыми людьми нормативно-ценностный образ военной профессии, на основе которого формируется личная концептуальная модель профессиональной деятельности. И в этой модели должно особое место отводиться национальной идентичности, то есть осознанию себя как представителя своего народа и его защитника.

Гуманитарные дисциплины, преподаваемые в военном вузе, решают в процессе профессионального самоопределения обучающихся две задачи: во-первых, дают курсантам знания о российской нации, ее историческом прошлом, роли и месте в судьбе человека и человечества, во-вторых, позволяют осознать важность национальной идентичности для военнослужащего, конституировать (интериоризировать) свою национальную принадлежность, принять ее как базовую ценность в профессии и, как следствие, воспитывать подрастающее поколение на основе традиционных национальных ценностей.

Несмотря на то, что сферой реализации гуманитарного знания выступает мир человеческой культуры в глобальном понимании, оно призвано выявить и осознать уникальность каждого человека, каждой социальной группы. Перед гуманитарными дисциплинами стоит задача не просто примирить или объединить людей различных культур, национальностей, а, прежде всего, выявить и объяснить причины такого разнообразия, помочь в осознании и эмоциональном восприятии всего диапазона уникальности человеческих проявлений. Гуманитарное знание призвано показать человеку многообразие мира и возможность различной интерпретации этого многообразия. Это позволяет лучше понимать культурные и национальные особенности человека как представителя такой большой социальной группы как нация.

Гуманитарное знание является пространством для артикуляции различий между народами, выражения их в слове и передаче другим своих смыслов, состояний и отношений, прежде всего, для взаимопонимания. Курсант в процессе изучения дисциплин гуманитарного цикла не просто осваивает материал, он формирует свое отношение к изученному, определяет свою личностную позицию, учится ее заявлять и выражать, готовится к межкультурному общению.

Преподавателю военного вуза необходимо использовать названные возможности гуманитарных дисциплин, подойти к организации учебного процесса так, чтобы гуманитарное знание для курсантов приобретало статус личностно значимого [4, с. 72], ведь в процессе обучения курсанты посредством общения с педагогом неизбежно включаются в конкретно-историческую систему общественных отношений, в результате которых происходит становление личности определенного социального типа, в частности профессионального [5, с. 23]. Поэтому в качестве необходимого условия профессионально-ценностного становления курсантов является включение в содержание преподаваемых в военных вузах социально-гуманитарных дисциплин личностных, эмоционально-оценочных и рефлексивно-деятельностных элементов.

Гуманитарные дисциплины, в отличие от естественнонаучных, не могут быть усвоены только на уровне значений: системы полученных знаний курсантам недостаточно. Критерием усвоения информации в гуманитарном цикле дисциплин выступает формирование смысла. В процессе обучения гуманитарным дисциплинам особую важность приобретает интерпретация и принятие учебной информации на индивидуально-личностном уровне [6, с. 61]. Формируемая в рамках гуманитарных дисциплин система знаний может закрепляться в мировоззрении курсантов посредством таких категорий как «долг», «гордость», «преданность», «принятие», «принадлежность», «ответственность», «переживание», которые непосредственно связаны с понятием профессиональной ценности военнослужащего.

Поэтому важно процесс изучения курсантами гуманитарных дисциплин сопровождать созданием особых условий для эмоционального переживания получаемых знаний, их присвоения и реализации в рамках профессиональной деятельности. При таких условиях можно планировать формирование всех составляющих профессионально-ценностного отношения:

– когнитивной (например, система знаний о российской нации, ее истории и традиционных ценностях, система знаний о российской национальной идентичности и ее роли в профессиональной деятельности военнослужащего);

– эмоциональной (например, «мне нравится быть частью российской нации, это воодушевляет меня», «я переживаю особое чувство, когда речь идет о российской нации»);

– оценочной (например, «я горжусь своей принадлежностью к российской нации, народу»);

– поведенческой («я готов защищать свое государство и свой народ, со всей ответственностью выполнять свой профессиональный долг»).

Приступая к анализу специфических особенностей гуманитарных дисциплин в процессе профессионально-ценностного самоопределения курсантов как представителей своей нации и своей профессии одновременно, следует отметить ведущую роль в этом процессе следующих дисциплин: «Философия», «История», «Психология», «Политология», «Культурология» и «Социология».

Дисциплина «Философия» связана с прояснением сущности, содержания, функций, форм и проявлений национальной идентичности. Феномен идентичности рассматривается посредством понятий тождественности, совпадения с кем-либо, единства. В этом понимании национальная идентичность представляется важным элементом воинского коллектива, его сплоченности: понимание себя как части целого, единого, чувство органической принадлежности к другим, коллективному духу. Философская дисциплина способствует пониманию взаимосвязи таких терминов как «этническая идентичность», «национальная идентичность», «дух народа», «национальный характер», «менталитет», «национальное сознание», «национальная цель», «национальная идея», «национальная идентификация (процесс обретения идентичности)», «национальная самоидентификация (осознанное причисление себя к национальной общности)». Философия исследует системные характеристики и основные составляющие национальной идентичности, объясняет ее формирование на пересечении исторической, социально-психологической, культурной, политической сфер. В рамках философии курсанты имеют возможность осознать причины и факторы, способствующие кризису национальной идентичности в современном российском обществе, а также возрождение национальной идеи. В последние десятилетия эти вопросы нашли отражение в исследованиях В.А. Тишкова, А.К. Гаджиева, Л.В. Русских, А.В. Лубского, С.И. Данилова и др.

История выступает интегратором всех гуманитарных наук, транслирует многогранный опыт человечества, в том числе и опыт ценностного самоопределения. Историческая наука дает представление о едином для всей нации прошлом, об общности исторической судьбы народа, чем задает тенденцию социального единения.

История позволяет актуализировать ценностный смысл героического прошлого родной страны, формировать «культ предков». Поэтому ее преподавание в военном вузе предполагает реализацию принципа приоритетности героического прошлого. Героическое прошлое, подвиги народа, неисчерпаемая сила духа – все это включает в себя национальная идея русского народа.

Знание истории способствует осознанию курсантом принадлежности к своей нации, государству, национального единства, помогает ориентироваться во внутривнутриполитической жизни страны, видеть общество в его историческом развитии, приучает осмысливать действительность в историческом процессе, развивает критическое мышление, а также способствует построению своей целостной мировоззренческой системы. Более того, знание истории способствует осмыслению национальных идеалов в качестве императива своей профессиональной деятельности.

Историческая наука формирует у курсантов понимание всей противоречивости развития российского государства и вооруженных сил: наряду со знаниями о славных страницах истории, наполняющими нас чувством гордости за прошлое, формируются представления о сложных исторических периодах со своими ошибками и поражениями. Победы и поражения – это большой опыт для последующих поколений. И в условиях развернувшейся информационной борьбы видится важным ознакомить курсантов с героическим прошлым, с переломными событиями российской истории, показать наработанные способы выхода из кризисных политических состояний, сформировать умение принимать свои ошибки и извлекать из них уроки. Именно поэтому «историческое самосознание» рассматривается как часть национального самосознания народов (Л.М. Дробижева).

Принципиальным моментом также является то, что именно история, историческое прошлое выступает одним из основных способов формирования нации (национального самосознания). Так, например, механизм формирования нации описал Р.Э. Герман [7]. Автор отметил, что посредством работы над тем, что надо знать из прошлого, а что надо забыть, формируются мифы как часть национального самоопределения.

Таким образом, единое историческое прошлое представляет собой базисную составляющую национальной идентичности курсантов, включающую в себя подлинные национально-государственные ценности и ориентиры. Искреннее и эмоциональное воспроизведение исторического прошлого, ориентация на исконные национальные традиции и ценности – все это способствует духовно-нравственному воспитанию курсантов, воспитанию патриотизма, преданности государству, народу, готовности выполнять свой профессиональный долг и эффективно противостоять негативному информационному воздействию.

Психологическая дисциплина позволяет курсантам рассмотреть идентичность в соотношении с процессами идентификации, индивидуализации и социализации. Национальная идентичность изучается в рамках дисциплины как особый социально-психологический феномен. Психологические исследования дают возможность осознания национального характера и менталитета личности курсанта как представителя большой социальной группы, позволяют отвечать на смыслообразующие вопросы: «кто я?», «я часть какой группы?», «что нас объединяет?», «есть ли «мы»?», «кто мы такие?», тем самым обеспечивают удовлетворение потребности в принадлежности, позитивной самооценке и безопасности.

В рамках социальной психологии национальная идентичность рассматривается как часть национального менталитета, прослеживается ее связь с языком, исторической памятью и родовыми чувствами, эмоциями и настроениями, традиционными нормами и идеалами, способами мышления, восприятия и оценки действительности, образцами социального поведения. Изучение социальной психологии позволяет понимать структуру и механизм национального сознания, способы информационного влияния на него.

Политологическая дисциплина раскрывает курсантам закономерности функционирования политической сферы общественной жизни, властных отношений. Политология помогает курсанту ответить на вопросы «почему?» и «как?» национальная идентичность становится мишенью в информационной войне, направленной на искажение, замену и разрушение национальных идеалов, на размывание базовых традиционных национальных ценностей, на ослабление национальной безопасности государства. Национальная идентичность рассматривается в политологии как основа стабильного развития государства, оказывающая значительное влияние на формирование политического сознания граждан, а также на развитие правовой культуры общества.

Социологическая наука рассматривает проблему национальной идентичности как современную и ключевую для российского общества. Национальная идентичность определяется как ресурс согласия и консолидации внутри государства и на уровне межнациональных отношений. В рамках социологии изучаются социальные механизмы самоопределения индивидов в многообразных группах, образование референтных групп [8, с. 336].

Образовательная область, изучаемая курсантами в рамках дисциплины «Культурология», обеспечивает получение обучающимися представлений о многообразных взаимоотношениях человека и культуры, содействует пониманию механизмов и мировоззренческих оснований различных национальных культур, осознанию взаимосвязи этнических и национальных ценностей как части общечеловеческой культуры. Культурология рассматривает те основы, которые формируют нацию: этнические и культурные факторы (язык, традиции, обычаи), благодаря которым человек уже не отделяет себя от нации как группы, воспринимает происходящие события как имеющее отношение не только к нему лично, но и к «мы».

Таким образом, можно отметить, что гуманитарные дисциплины несут в себе значительный потенциал в процессе формирования у курсантов отношения к национальной идентичности как профессиональной ценности. Гуманитарные знания инициируют целенаправленный процесс формирования у курсантов представлений о значимости национальной идентичности в их профессиональной деятельности, об основах функционирования и развития национальной идентичности посредством когнитивного, эмоционального и поведенческого самоотождествления курсанта с российской нацией, интериоризации национальных идей.

Гуманитарные знания позволяют курсанту в период обучения в военном вузе обрести смыслы, цели и ресурсы своей профессиональной деятельности. Идентичность представляется одним из важнейших механизмов освоения социального пространства, лежащим в основе образования профессиональных смыслов и личностных выборов курсанта.

Изучение гуманитарных дисциплин в военном вузе позволяет курсанту сформировать целостную систему знаний:

- о глобализации, ее противоречивой природе и мультикультурализме;
- о нации и ее роли в международных процессах;
- о понятии «российская нация»;
- о кризисе национальной идентичности в современной России;
- о национальной идентичности как факторе стабилизации и развития российского государства;
- о духовных и моральных качествах, отличающих российских военнослужащих;
- об основах методологии исторических, культурологических, психологических исследований, в частности, методики изучения национальной идентичности;
- о способах формирования и развития национальной идентичности в процессе воспитательной и военно-политической работы.

Преподавание гуманитарных дисциплин в военном вузе способствует формированию у курсантов системы умений:

- развивать у личного состава культуру межнационального, межэтнического общения, что в свою очередь является условием предотвращения межнациональных и межэтнических конфликтов;
- планировать военно-политическую работу с личным составом в подразделении, заниматься его обучением и воспитанием;
- пользоваться учебной и мемуарной литературой, справочниками, статистическими данными, критически оценивать аналитические и научные материалы по определенной социально-политической проблематике.

Философский, исторический, психологический, политологический, социологический и культурологический материал несет в себе значительный потенциал для формирования ценностного отношения курсантов к своей профессии. Социальные и гуманитарные дисциплины оптимально дополняют друг друга, образуя целую систему для принятия курсантами национальной идентичности как важнейшей составляющей их профессии.

Профессионально-ценностный потенциал гуманитарных дисциплин в военном вузе реализуется в условиях согласования системы профессиональных ценностей военнослужащего с содержанием учебного материала и соответствующими условиями организации учебного

процесса. Нередко на практике учебный материал гуманитарных дисциплин носит преимущественно информационный характер (набор знаний), не затрагивается эмоциональная сфера личности курсанта, активно влияющая на восприятие профессиональных ценностей. Процесс реализации указанного потенциала гуманитарных дисциплин будет эффективным только при условии обновления содержания учебного материала в контексте духовно-нравственных ценностей Российской Федерации и ее национальных идеалов, пронизывающих всю систему воспитания курсантов, а также при условии внедрения новых методов и методик преподавания гуманитарных дисциплин в военных вузах.

Список используемых источников

1. *Верняева Т.А.* Сравнительный анализ системы жизненных смыслов курсантов РФ и курсантов из республики Афганистан // Гуманитарные науки в современном вузе как основа межкультурного взаимодействия: матер. междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, 10 декабря 2018 года / под ред. С. И. Бугашева, А. С. Минина. – СПб.: СПбГУПТД, 2018. – С. 44–48.
2. *Спирин А.П., Спирина Т.П., Чиханова Е.В.* Формирование ценностного отношения курсантов к национальной идентичности как актуальная педагогическая задача // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2019. – Т. 8, № 3 (28). – С. 302–304.
3. *Турен А.* Два лица идентичности // Социология власти. – 2007. – № 2. – С. 151–168.
4. *Поправко Е.А.* Особенности представления визуальной информации в учебной литературе по «Истории» и «Военной истории», используемой в вузе // Всеармейский этап V Международной олимпиады курсантов образовательных организаций высшего образования (по военной истории): матер. научно-практ. семинара руководителей команд / под ред. Ю.И. Ольховика. – Балашиха: ВА РВСН им. Петра Великого, 2019. – С. 72–79.
5. *Серба В.Я., Носков Г.Е.* Личностно-деятельностные факторы экономической подготовки в системе высшего образования: монография. – СПб.: ВАМТО, «Р-КОПИ», 2015. – 132 с.
6. *Разбегаева Л.П.* Ценностные основания гуманитарного образования. – Волгоград: Перемена, 2001. – 289 с.
7. *Герман Р.Э.* История как средство создания нации: анализ этноконструктивистских теорий // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. – Тамбов: Грамота, 2012. – № 7 (21), ч. 1. – С. 43–50.
8. *Дробижеева Л.М.* Социальные проблемы межнациональных отношений в постсоветской России. – Москва: ИС РАН, 2003. – 373 с.

В.И. Ерохин,
доктор физ.-мат. наук, профессор;
А.П. Кадочников,
кандидат техн. наук;
М.К. Маркина;
С.В. Сотников,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ НАУЧНЫХ РАБОТНИКОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

В статье рассматривается проблема оценки результативности труда научных сотрудников. На сегодняшний день нет единой базы показателей и методики, позволяющей оценить результаты труда сотрудников научно-исследовательской организации. В работе представлена разработанная в академии методика по оценке результативности научных работников. Методика включает в себя набор показателей результативности и их ценность (вес), перечень оцениваемых задач для каждой должностной категории научных сотрудников и минимально необходимый набор показателей для прохождения ими порогового уровня. Практическая ценность предлагаемой методики заключается в применимости ее для оценки (мониторинга) результатов труда научных сотрудников, а также при проведении их аттестации. Для практической реализации методики разработан «Алгоритм действий при проведении оценки результативности деятельности (аттестации) научных сотрудников научно-исследовательской организации».

Ключевые слова: оценка результативности, научно-исследовательская организация, показатели результативности, алгоритм оценки результативности.

В 2015 году Приказом Министра обороны Российской Федерации от 07 декабря 2015 года № 745дсп [1] был введен в действие Порядок организации научной работы в Вооруженных Силах Российской Федерации (ВС РФ), определивший цели, задачи, формы и организацию проведения научной работы в ВС РФ, актуальные для настоящего периода их развития. Очевидно, что введение в действие данного основополагающего документа требует разработки или пересмотра целого ряда других нормативных документов, регламентирующих различные стороны научной деятельности ВС РФ [2]. К числу таких документов относится «Методика оценки результативности научной деятельности научно-исследовательских организаций Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ)», утвержденная Приказом Министра обороны Российской Федерации от 30 июня 2015 года № 380 [3], которая устанавливает порядок проведения оценки и мониторинга результативности научной (научно-технической) деятельности научно-исследовательской организации (НИО) МО РФ. Указанная методика в полной мере не обеспечивает возможности оценивания эффективности научной (научно-технической) деятельности НИО МО РФ по всем составляющим (результативность, ресурсоемкость и оперативность научной работы), в том числе по причине неполного соответствия утвержденному порядку организации научной работы в ВС РФ, а также неопределенности на данный момент конкретных перечней показателей результативности научной деятельности НИО, критериев оценки и пороговых значений этих показателей, увязки показателей результативности научной деятельности НИО с показателями результативности трудовой деятельности ее работников, занимающих научные должности.

Оценка результативности деятельности научных сотрудников, проводимая с целью мониторинга, неразрывно связана с проведением *аттестации* научного сотрудника. Аттестация – это кадровая процедура оценки компетентности и профессионального уровня сотрудников. В связи с требованием нормативных документов, аттестацию необходимо проводить при проверке соответствия работника занимаемой должности, при переводе на вышестоящую должность, при увольнении. Аттестация также требует использования соответствующей ме-

тодики и системы показателей, поскольку проводится путем оценки количественных и качественных показателей результативности труда научного сотрудника. Очевидно, что методики и показатели мониторинга и аттестации должны быть согласованы между собой.

Указанные выше причины обусловили необходимость разработки «Методики оценивания результативности научных работников», направленной на повышение квалификации и развитие научного потенциала и пригодной для задач мониторинга и аттестации.

Содержание данной методики базируется на двух основных составных частях – наборе показателей результативности научных работников и алгоритме (последовательности действий) соответствующих структур и должностных лиц при осуществлении оценки результативности научных работников. Разработка указанных материалов и методики в целом является неформальной задачей в силу трудной формализуемости таких понятий, как «результативность» или «эффективность» научной работы, а также очевидных трудностей установления для них конкретных количественных характеристик. Поэтому определенный интерес представляет не только разработанная методика, но и методы и подходы, с помощью которых она была создана. Освещению указанных вопросов и посвящена настоящая статья.

В силу указанного выше неформального характера задачи построения методики оценивания результативности научных работников практически единственным возможным подходом к ее решению является метод экспертных оценок [4].

Под методом экспертных оценок обычно понимают комплекс логических и математических процедур, направленных на получение от специалистов информации, ее анализ и обобщение с целью подготовки и принятия рациональных решений [4–7]. Сущность метода экспертных оценок заключается в проведении экспертами интуитивно-логического анализа проблемы с количественной оценкой суждений и формальной обработкой результатов. Получаемое в результате обработки обобщенное мнение экспертов принимается как решение проблемы. Комплексное использование интуиции (неосознанного мышления), логического мышления и количественных оценок с их формальной обработкой позволяет получить эффективное решение проблемы.

Разработка «Методики оценивания результативности научных работников» методом экспертных оценок проводилась в несколько этапов:

Этап 1. Формирование группы экспертов. Существует специальная процедура формирования работоспособной сети экспертов [4]. В данном исследовании группа экспертов (10 человек) включала в себя: начальника военного института, заместителя начальника военного института по научной работе, начальников управлений, ведущего научного сотрудника, старших научных сотрудников с опытом работы не менее пяти лет.

Этап 2. Составление Перечня показателей результативности научных работников с использованием метода экспертных оценок.

В классическом варианте работа экспертов начинается с «чистого листа», т. е. каждый эксперт сам предлагает перечень показателей, по которым следует оценивать качество научной деятельности. Однако в данном случае, для облегчения работы на начальном этапе опроса экспертам предлагался заранее составленный перечень показателей.

Перечень показателей был составлен в соответствии с формами научной работы приказа Министра обороны Российской Федерации от 07 декабря 2015 года № 745дсп.

По результатам опроса первоначальный список показателей в дальнейшем перерабатывался с учетом мнений экспертов.

Перед экспертами стояли задачи:

- максимально полно определить базовые рейтинговые показатели, которые в полной мере характеризуют деятельность научного работника;
- для каждого отобранного показателя определить, какое событие следует считать фактом выполненной работы.

Принципы, лежащие в основе работы экспертов при выборе показателей результативности научных работников, были следующими:

- все рассматриваемые показатели должны быть представлены в интервальных или номинативных шкалах;
- предоставляемая информация должна быть проверяема, то есть представленные данные возможно легко проверить по находящимся в открытом доступе источникам. Последнее не может быть выполнено для всех возможных показателей, однако при проектировании интегрального показателя требуется максимально учитывать этот фактор;
- показатели должны быть однозначными, понятными и не должны дублировать друг друга.

Этап 3. Присвоение выбранным показателям весовых коэффициентов. Указанный этап является очень важным и, в то же время, наиболее трудно формализуемым. Фактически, с помощью того или иного выбора весовых коэффициентов разрабатываемая «Методика» устанавливает и фиксирует систему ценностей, составленную из соотношений весов и объемов различных работ.

Укажем некоторые типичные проблемы, сопутствующие рассматриваемому этапу.

Ориентируясь на установленные весовые коэффициенты показателей, научные работники будут направлять свои усилия на работу, оценка которой приведет к максимальному значению показателя, и соответственно уменьшат свои трудозатраты в других направлениях научной деятельности.

Решением указанной проблемы является балансировка отдельных показателей, выполненная таким образом, чтобы ни один из них не мог оказать доминирующего влияния на окончательный результат.

Примером другой проблемы может являться, например, тот факт, что публикация в журнале, представленном в системе Web of Science, может принести работнику значительно больше «рейтинговых баллов», чем подготовка (защитившегося) адъюнкта. Следует признать, что указанная проблема и ей подобные не имеют очевидного и универсального решения.

Потенциальным источником возможных проблем может служить попытка формальной унификации показателей деятельности разных категорий научных сотрудников, поэтому при выборе системы показателей эффективности и назначении соответствующих весов необходимо исходить из задач для каждой конкретной категории научных сотрудников. Так, задачи из компетенции старших научных сотрудников не должны решать младшие научные сотрудники, зачастую являющиеся молодыми и неопытными учеными, не обладающими достаточными знаниями и умениями.

Список возможных проблем может быть легко продолжен. В силу их неформального характера веса выбранным показателям эффективности были назначены экспертами на основе личного опыта и интуитивных представлениях об относительной важности того или иного показателя. Результаты выполнения этапа 3 представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Показатели результативности научных работников
Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского**

| № п/п | Показатели научных работников для определения рейтинга | Значение показателя в зависимости от числа участников (N) | | | Категории научных работников | | | | |
|-------|---|---|----------|----------------|------------------------------|-----|-----|----|-----|
| | | 1–2 чел. | 3–4 чел. | 5 чел. и более | ГНС | ВНС | СНС | НС | МНС |
| 1 | Участие в разработке проектов законодательных актов и актов Президента РФ, Правительства РФ: – предложения поданы (основание для выполнения вх. №, после исполнения документа – исх. № в адрес органа военного управления [ОВУ]); – предложения одобрены и включены в выпущенные законодательные акты | 4 | 2 | 1,5 | + | + | | | |
| | | 6 | 3,5 | 2,5 | | | | | |

Продолжение табл. 1

| № п/п | Показатели научных работников для определения рейтинга | Значение показателя в зависимости от числа участников (N) | | | Категории научных работников | | | | |
|-------|--|---|----------|----------------|------------------------------|-----|-----|----|-----|
| | | 1–2 чел. | 3–4 чел. | 5 чел. и более | ГНС | ВНС | СНС | НС | МНС |
| 2 | Участие в разработке проектов нормативно-технических документов. 2.1. Предложения поданы (основание для выполнения вх. №, после исполнения документа – исх. №) в адрес ОВУ: – МО РФ; – вида, рода войск ВС РФ. 2.2. Предложения одобрены и включены в утвержденную научно-техническую документацию (НТД): – МО РФ; – вида, рода войск ВС РФ | | | | + | + | | | |
| | | 3 | 2 | 1,2 | | | | | |
| | | 2 | 1,4 | 1,3 | | | | | |
| | | 5 | 2,5 | 2 | | | | | |
| 3 | Постановка научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в рамках государственного оборонного заказа (ГОЗ) и (или) государственной программы вооружения (ГПВ). 3.1. Участие в разработке ТТЗ (ТЗ): – утверждено ТТЗ на ОКР в ГОЗ; – утверждено ТТЗ на НИР в ГОЗ. 3.2. Постановка КНИР в ПНР ВС РФ, утверждено ТТЗ на КНИР (1-й категории) в ПНР ВС РФ | | | | + | + | + | | |
| | | 3 | 2,5 | | | | | | |
| | | 3 | 2,5 | | | | | | |
| | | 2 | 1,4 | | | | | | |
| | 3.3. Выполнение НИР по ПНР в качестве: – научного руководителя НИР 1-й категории, где ВИ(НИ) – головной исполнитель; – научного руководителя НИР 2-й и 3-й категорий; – ответственного исполнителя НИР 1-й категории; – ответственного исполнителя НИР 2-й и 3-й категорий | | 2 | | + | + | + | + | + |
| | | | 1,5 | | | | | | |
| | | | 1,3 | | | | | | |
| | | | 1,25 | | | | | | |
| 4 | Участие в проведении экспертизы проектов ГПВ и ГОЗ: – на секции НТС МО РФ; – КНТС видов и родов войск; – другие | | | | + | + | + | + | |
| | | | 1,5 | | | | | | |
| | | | 1,3 | | | | | | |
| | | | 1,1 | | | | | | |
| 5 | 5.1. Участие в работе комиссий по проведению GI образцов ВВСТ в качестве: – председателя (заместителя) комиссии; – руководителя рабочей группы; – эксперта 5.2. Работа в комиссии по проверке хода выполнения НИОКР, участие в МВИ, ПИ, автономных, аварийных испытаниях и др.: – одно мероприятие длительностью менее 5 сут.; – одно или более мероприятий продолжительностью 5–10 сут.; – одно или более мероприятий продолжительностью 10–30 сут.; – два или более мероприятий продолжительностью более 30 сут. | | | | + | + | + | + | |
| | | | 3 | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | |
| | | | 1,3 | | | | | | |
| | | | | + | | | | | |
| | | | | + | | | | | |
| | | + | | | | | | | |
| | | 1,01 | | | | | | | |
| | | 1,05 | | | | | | | |
| | | 1,15 | | | | | | | |
| | | 1,3 | | | | | | | |

Продолжение табл. 1

| № п/п | Показатели научных работников для определения рейтинга | Значение показателя в зависимости от числа участников (N) | | | Категории научных работников | | | | |
|---|---|---|----------|----------------|------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 1–2 чел. | 3–4 чел. | 5 чел. и более | ГНС | ВНС | СНС | НС | МНС |
| 6 | Участие в учениях и мероприятиях оперативной и боевой подготовки войск (сил), проводимыми: – под руководством МО РФ, начальника ГШ ВС РФ, командований объединений и соединений; – видами войск, округами; – под руководством начальника ВКА; – этапами ЛЭР | | 2 | | + | + | + | + | |
| 7 | Экспериментальная проверка теоретических положений. Обобщение результатов исследований: – экспериментальное исследование в соответствии с утвержденной методикой с предоставлением утвержденных заказчиком протокола и отчета по результатам эксперимента; | | 1,25 | | + | + | + | + | + |
| | – экспериментальные исследования на стендовой базе, утвержденной приказом начальника ВКА; | | 1,2 | | | | | | |
| | – этап ЛЭР с предоставлением протокола и отчета по этапу ЛЭР, утвержденных начальником ВКА и заказчиком | | 1,2 | | | | | | |
| 8 | Выполнение оперативных заданий (ОЗ): – по указанию МО РФ, начальника ГШ ВС РФ, начальника ГОУ ГШ ВС РФ; | 2 | 1,5 | 1,25 | + | + | + | + | + |
| | – по указанию руководителей департаментов МО РФ; | 1,5 | 1,25 | 1,1 | | | | | |
| | – по указанию ГК вида войск, командующего рода войск; | 1,25 | 1,2 | 1,05 | | | | | |
| | – по указанию других ОБУ | 1,2 | 1,1 | 1,05 | | | | | |
| 9 | 9.1. Публикации: – в изданиях МБД (единолично); | | 3 | | 1 в 2 года | 1 в 2 года | 1 в 4 года | 1 в 5 лет | – |
| | – в изданиях МБД (2–3 автора); | | 2,4 | | | | | | |
| | – в изданиях МБД (4–5 авторов); | | 1,95 | | | | | | |
| | – в изданиях МБД (6 и более авторов); | | 1,85 | | 1 в год | 1 в год | 1 в год | 1 в год | 1 в год |
| | – в изданиях Труды ВКА (единолично); | | 1,8 | | | | | | |
| | – в изданиях Труды ВКА (2–3 автора); | | 1,45 | | | | | | |
| | – в изданиях Труды ВКА (4–5 авторов); | | 1,25 | | 1 в год | 1 в год | 1 в год | 1 в 2 года | 1 в 2 года |
| | – в изданиях Труды ВКА (6 и более авторов); | | 1,1 | | | | | | |
| | – в изданиях ВАК (единолично); | | 1,5 | | | | | | |
| | – в изданиях ВАК (2–3 автора); | | 1,25 | | 1 в год | 1 в год | 1 в год | 1 в 2 года | 1 в 2 года |
| | – в изданиях ВАК (4–5 авторов); | | 1,15 | | | | | | |
| | – в изданиях ВАК (6 и более авторов); | | 1,05 | | | | | | |
| | – в закрытых изданиях; | | 1,1 | | 1 в год | 1 в год | 1 в год | 1 в 2 года | 1 в 2 года |
| – в изданиях РИНЦ. | | 1,1 | | | | 1 в год | 1 в год | 1 в год | |
| 9.2. Издание: – монографий, учебников; | | 1,5 | | + | + | + | | | |
| – учебных пособий. | | 1,1 | | | | | | | |
| 9.3. Письменный доклад (аналитическая записка, НВНР) с выступлением и принятием решения по результатам доклада: | | | | | + | + | + | | |

Продолжение табл. 1

| № п/п | Показатели научных работников для определения рейтинга | Значение показателя в зависимости от числа участников (N) | | | Категории научных работников | | | | |
|-------|---|---|----------|----------------|------------------------------|-----|-----|----|-----|
| | | 1–2 чел. | 3–4 чел. | 5 чел. и более | ГН С | ВНС | СНС | НС | МНС |
| | – на научно-техническом семинаре военно-промышленных комиссий, МО РФ, начальника ГШ ВС РФ или их заместителей; – командующему вида войск; – командующему рода войск, департаментов, руководителей ОВУ, Госкорпораций, ФОИВ. | 1,5 | | | | | | | |
| | 9.4. Диссертации: – проведена защита консультируемого докторанта; – проведена защита кандидатской диссертации руководимым соискателем. | 1,3 1,2 | | | | | | | |
| | 9.5. Научное руководство: – докторантом; – адъюнктом. | 1,25–3 1,1–2 | | | + | + | + | | |
| | 9.6. Отзыв: – на материалы ЭП, ТП; – на диссертацию (оппонент), автореферат. | 1,1 1,05 | | | + | + | + | | |
| | 9.7. Рецензирование статей (сборников трудов ВКА) | 1,25 1,15 1,05 | | | + | + | + | | |
| 10 | Моделирование с использованием компьютерных технологий. 10.1. Утверждение постановки задачи на разработку ИРЗ, модели. 10.2. Разработка модели, методики, алгоритма, программно-моделирующего комплекса: – апробированы, реализованы и утверждены начальником управления (помещены в архив БНИ управления); – апробированы, реализованы и утверждены начальником ВИ(НИ) (помещены в архив БНИ ВИ[НИ]); – апробированы, реализованы и утверждены начальником академии (помещены в архив БНИ ВИ[НИ]); – апробированы и реализованы в объединении, соединении или ОВУ. 10.3. Проведение численного эксперимента (по утвержденной методике, алгоритму) | 1,05 1,05 1,1 1,2 1,5 1,2 | | | + | + | + | + | + |
| 11 | Развитие и совершенствование ЛЭБ: – создание новой экспериментальной установки (стенда и т. п.) с включением в состав ЛЭБ академии (приказом начальника ВКА); – модернизация ЛЭБ (входящей в состав ЛЭБ академии); – метрологическая аттестация (поверка); – метрологическая аттестация методики проведения измерений | 2 1,3 1,2 1,2 | | | + | + | + | + | + |
| 12 | Проведение научных конференций, семинаров (организация и участие). 12.1. Организация конференций, работа в программном (организационном) комитете. 12.2. Доклады на конференции, доклад на пленарном заседании | 1,5 (1,25) 1,1 | | | + | + | + | + | + |

Окончание табл. 1

| № п/п | Показатели научных работников для определения рейтинга | Значение показателя в зависимости от числа участников (N) | | | Категории научных работников | | | | |
|--|--|---|--------------------------------------|----------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1–2 чел. | 3–4 чел. | 5 чел. и более | ГНС | ВНС | СНС | НС | МНС |
| 13 | Проведение изобретательской, рационализаторской и патентно-лицензионной работы: – получен патент на изобретение; – получен патент на полезную модель; – получено свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ; – получено свидетельство на рацпредложение | | 1,25 1,2 1,05 1,02 | | | | + | + | + |
| 14 | Военно-научная работа с курсантами и слушателями. Руководство военно-научным обществом курсантов: – курсанты-победители (призеры) конкурсов, выставок; – курсанты-участники конкурсов, выставок; – защита ВКР; – участие в НИР курсанта в качестве исполнителя | | 2 1,25 1,1 1,1 | | | + | + | + | + |
| 15 | Награды, премии за участие в выставках. Отмечены премиями, дипломами, медалями за достигнутые результаты: – федерального уровня; – уровня МО РФ; – регионального уровня; – уровня видов и родов ВС РФ; – уровня ОВУ | | 2 1,8 1,6 1,6 1,4 | | + | + | + | + | + |
| 16 | Приносящая внебюджетный доход деятельность. 16.1. Заключен договор до 20 млн. руб.: – научному руководителю; – исполнителю. 16.2. Заключен договор до 100 млн. руб.: – научному руководителю; – исполнителю. 16.3. Заключен договор более 100 млн. руб.: – научному руководителю; – исполнителю | | 1,5 1,1 2,1 2 2,5 2,2 | | + | + | + | + | + |
| Пороговый (критериальный) уровень результативности научного работника | | | | | 3,15 | 2,36 | 1,58 | 1,27 | 1,21 |

Минимально необходимый набор показателей результатов деятельности научных работников приведен в табл. 2.

Обязательными направлениями деятельности для научного сотрудника являются:

- выполнение НИР;
- издание публикаций;
- выполнение ОЗ;
- разработка модели, программы, алгоритмы, программно-моделирующего комплекса или ЛЭБ (методики).

При заполнении таблицы, каждый столбец имеет бинарное значение:

1 – при наличии соответствующего результата;

0 – при его отсутствии.

Таблица 2

**Минимально необходимые результаты деятельности научных работников,
достигаемые ими в течение календарного года**

| Формы научной работы | Выполнение НИР | Публикации | Модели, программы, алгоритмы, программно-моделирующие комплексы | ЛЭБ (модели, методики) | Выполнение ОЗ | Итоговое значение |
|----------------------|----------------|------------|---|------------------------|---------------|-------------------|
| Значение показателя | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 4 |
| | | | 0 | 1 | | |

Этап 4. Формирование интегрального показателя результативности. Ориентируясь на опыт и традиции, сложившиеся в академии при оценивании текущей деятельности научного сотрудника с помощью «дорожной карты», эксперты приняли решение об использовании мультипликативного представления для интегрального показателя результативности научного сотрудника (P_i):

$$P_i = \prod_j m_{ij},$$

где m_{ij} – значение j -го показателя научной работы сотрудника i -й категории;

i – номер категории сотрудника;

j – номер показателя научной работы;

Полученное значение сравнивается со значением порогового (критериального) уровня результативности научной работы для каждой категории научных сотрудников. Значения представлены в табл. 1 (правая сторона). В результате сравнения устанавливается *степень соответствия занимаемой должности*:

- «низкая», если полученный показатель ниже порогового уровня;
- «средняя», если полученный показатель равен пороговому уровню или до 30% выше него;
- «высокая», если полученный показатель выше порогового уровня более чем на 30%.

Этап 5. Экспертами были определен «Алгоритм действий при проведении оценки результативности деятельности (аттестации) научных сотрудников научно-исследовательской организации». Алгоритм представлен на рис. 1.

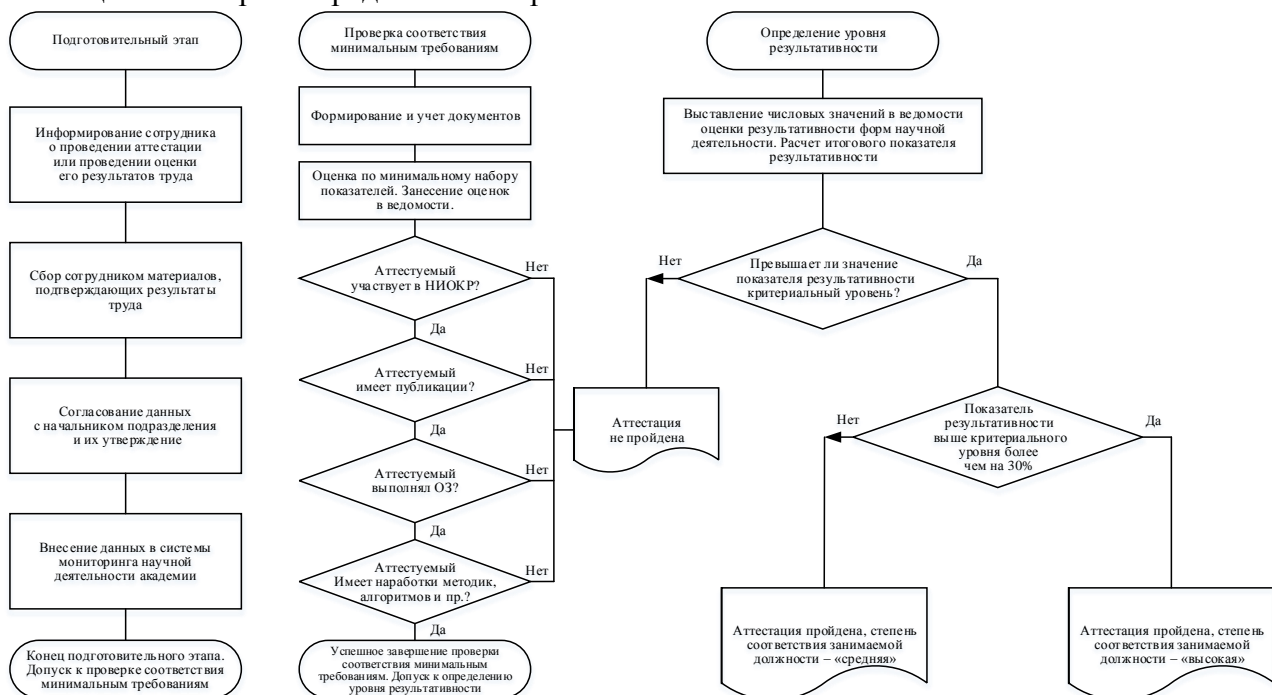


Рис. 1. Алгоритм действий при проведении оценки результативности деятельности (аттестации) научных сотрудников научно-исследовательской организации

При разработке «Методики оценивания результативности научных работников», были учтены и реализованы следующие особенности:

– оценка квалификации не сведена только к оценке публикационной активности за ограниченный период времени, непосредственно предшествующий расчету оценки (поскольку деятельность научного работника не сводится только к публикационной или исследовательской активности);

– квалификация носит кумулятивный характер – она накапливается в течение всей профессиональной карьеры работника, поэтому квалификационные показатели учитываются за весь указанный период;

– при установлении нормативов по уровню оценок факторов квалификации приняты во внимание занимаемая должность и возраст/длительность карьеры сотрудника.

По мнению экспертов, после разработки и утверждения «Методики оценивания результативности научных работников» (на срок до года) необходимо предусмотреть переходный период, когда в утвержденную методику будут вноситься оперативные изменения. Это может потребоваться, в частности, если окажется упущенным какой-нибудь важный показатель научной работы или действие методики как управляющего инструмента приведет к нарастающей дисгармонии в деятельности научных работников института. Кроме того, необходимо провести апробацию процедуры оценки результативности научной деятельности научных работников института на примере одного-двух отделов, и затем осуществить анализ результатов проведения аттестации с фиксацией выявленных недостатков и упущений методики.

Список используемых источников

1. Приказ Министра обороны Российской Федерации от 07 декабря 2015 года № 745дсп «О научной работе в Вооруженных Силах Российской Федерации». – М.: МО РФ, 2015. – 45 с.

2. Отчет о научно-исследовательской работе (Шифр «Гипотеза-16») «Анализ нормативно-правовой базы, определение показателей результативности научной деятельности и концептуальных подходов к организации системы мониторинга результативности научной деятельности научно-исследовательских организаций и результативности трудовой деятельности научных работников (промежуточный)». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 62 с.

3. Приказ Министра обороны Российской Федерации от 30 мая 2015 года № 380 «Об утверждении Методики оценки результативности научной деятельности научно-исследовательских организаций Министерства обороны Российской Федерации». – М.: МО РФ, 2015. – 10 с.

4. *Евланов Л.Г., Кутузов В.А.* Экспертные оценки в управлении. – М.: Экономика, 1978. – 133 с.

5. *Подиновский В.В., Бабинцев В.С., Шорин В.Г.* Выбор решений по многим критериям, упорядоченным по важности. – М.: ИУНХ, 1977. – 44 с.

6. *Кэндэл М.* Ранговые корреляции. – М.: Статистика, 1975. – 84 с.

7. *Арутюнов В.В.* Современные методы оценки результатов научной деятельности. – М.: ВИЭМС, 2012. – 36 с.

Л.А. Иноземцева;
Н.С. Кужекин,
кандидат филос. наук, профессор

ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ИМПЕРАТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ВОЕННО-УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

В публикации рассматриваются актуальные проблемы формирования профессиональной компетентности профессорско-преподавательского состава и психолого-педагогические требования к подготовке педагогических работников академии.

Ключевые слова: профессиональная компетентность, психолого-педагогические императивы, педагогические компетенции, психологические компетенции, профессиональная переподготовка, повышение квалификации, технологизация образовательного процесса.

В настоящее время существенно возросла степень развития Вооруженных Сил Российской Федерации – на вооружение воинских подразделений поступает разработанная на основе современных технологий новейшая военная техника, требующая наличия у специалистов соответствующих компетенций при ее освоении, эксплуатации и боевом применении.

В данных условиях эффективное обучение методам боевой подготовки и ведения боевых действий, управлению войсками и техническими средствами в установленный период должно осуществляться путем повышения качества военного образования на основе использования современных педагогических технологий, интегрирующих военную науку и практику военного дела.

Основной целью образования становится не только совокупность теоретических знаний, практических умений и навыков военного специалиста, но и способность осуществлять самостоятельный поиск, анализ и эффективную обработку информации, способность рационально и качественно функционировать в быстро изменяющемся мире.

Одним из способов разрешения данной проблемы становится повышение уровня профессиональной компетентности субъектов образовательного процесса и, прежде всего, профессорско-преподавательского состава военных вузов.

Квалификационные характеристики должностей профессорско-преподавательского состава высшего и дополнительного профессионального образования содержит комплекс профессиональных и личностных требований к уровню их профессиональной компетентности [5].

Однако далеко не всегда преподаватели военных вузов имеют необходимый уровень психолого-педагогической подготовки к профессиональной деятельности, отмечается отсутствие готовности преподавателей к использованию в учебном процессе современных образовательных технологий. В связи с этим формирование и совершенствование профессиональной компетентности профессорско-преподавательского состава является актуальной задачей военно-учебного заведения.

Проблема формирования профессиональной компетентности личности широко исследовалась в отечественной и зарубежной научной литературе. Значительный вклад в изучение этой проблемы внесли российские ученые-педагоги И.А. Зимняя, Н.В. Кузьмина, А.К. Маркова, В.А. Сластенин и их последователи [1, 4, 8].

Анализ изученной литературы и практического опыта в данной области позволил заключить, что множество аспектов профессиональной компетентности преподавателя глу-

боку не изучены, понятие «компетентность» не имеет единого определения и чаще всего употребляется для выражения достаточного уровня квалификации и профессионализма педагога.

Нами поддерживается подход, в отношении которого «профессиональная компетентность – это интегральная характеристика деловых и личностных качеств специалиста, отражающая не только уровень знаний, умений, опыта, достаточных для достижения целей профессиональной деятельности, но и социально-нравственную позицию личности» [4]. Профессиональная компетентность преподавателя отражает готовность и способность педагога решать профессиональные задачи, осуществлять профессиональные функции, а также находит свое выражение в стиле индивидуальной деятельности, в организации благоприятных условий для учебно-воспитательного процесса и сопровождения обучающихся по выбранной образовательной траектории.

Профессиональная компетентность преподавателя является важнейшим качеством специалиста, которое формируется и воплощается исключительно в процессе его профессиональной деятельности. Основы профессиональной компетентности закладываются в процессе обучения при освоении основных профессиональных образовательных программ и дополнительных профессиональных программ.

Педагогическая подготовка преподавателей академии представляет собой не стихийный, а целенаправленный процесс, ориентированный на усвоение офицерами знаний, развитие у них практических умений, навыков и профессионально важных качеств личности, необходимых для плодотворной педагогической деятельности в академии.

Профессиональная компетентность преподавателя содержит совокупность компетенций – набора качеств и свойств, требуемых для осуществления высокоэффективной педагогической деятельности. Такими компетенциями являются:

- знания и умения в области преподаваемой дисциплины (науки);
- управленческие (организационные) компетенции;
- психолого-педагогические компетенции;
- коммуникативные компетенции.

Что является ядром профессиональной компетентности преподавателя высшей военной школы? На наш взгляд, ядром профессиональной компетентности является психолого-педагогические императивы – военному преподавателю необходимо осмысление широкого диапазона социально-педагогических, психологических и других факторов, связанных с обучением и воспитанием личности обучающихся. Психолого-педагогические компетенции выражаются в интеграции таких содержательных компонентов профессиональной компетентности преподавателя как любовь к своей профессии, активизирующая потребность в саморазвитии и самосовершенствовании, качественная психолого-педагогическая и предметная подготовка, накопленный опыт и важные для педагога индивидуально-личностные качества.

Психологические и педагогические компетенции – это комплекс профессиональных и личностных качеств военного преподавателя, необходимых для получения значимых результатов в процессе обучения и воспитания, а требования к преподавателю – это императивная система профессиональных компетенций, обуславливающих успешность педагогической деятельности.

Учитывая тот фактор, что комплектование профессорско-преподавательского состава академии производится за счет офицеров, окончивших адъюнктуру в вузе или прибывших из войск и вновь назначенных на должности преподавателей кафедр – профессионально опытных, но не обладающих необходимым уровнем знаний психолого-педагогической науки и методики преподавания учебных дисциплин – кафедра определяет наиболее эффективную образовательную траекторию в отношении данных специалистов и устанавливает психолого-педагогические императивы, характеризующие направленность и

содержание требований к подготовке будущих преподавателей и формированию их профессиональной компетентности в процессе обучения.

Специфика деятельности преподавателя высшей военной школы определяет конкретное содержание психолого-педагогической компетенции. Под психологической компетенцией понимается «психическое состояние», характеризующееся аутопсихологическим, когнитивным и коммуникативным компонентами.

Аутопсихологический компонент предъявляет требование осознания преподавателем важности приобретения необходимых компетенций в педагогической деятельности прежде всего необходимости формирования значимой системы знаний в области педагогической психологии: психологии человека, психологии образовательной деятельности обучающихся, психологии личности курсанта и преподавателя, психологии познания, психологии педагогического общения. Дисциплина «Педагогическая психология» ставит перед собой задачу формирования знаний о закономерностях функционирования психики обучающихся и особенностях протекания их психических процессов, о методах психологического исследования личности и воинских коллективов, о сущности педагогических требований, предъявляемых к профессиональной деятельности преподавателя, об основах педагогической культуры преподавателя и др.

Аутопсихологический компонент также выражается в умении осознавать степень развития своих способностей, в знании форм и методов совершенствования собственной деятельности, способности транслировать свой опыт другим и, в то же время, учиться на примерах других людей (посредством посещения занятий более опытных педагогических работников, разработки и издания учебно-методических пособий, научных статей, участия в учебно-методических сборах и т. д.), уметь оценить причины недостатков в своей работе и наметить программу профессионального саморазвития.

Коммуникативный компонент проявляется в необходимости наличия у преподавателя личностных ресурсов для организации продуктивной коммуникации с коллегами и обучающимися, отвечающего требованию соблюдения принципа единоначалия в системе «начальник – подчиненный». Преподаватели военного вуза являются прямыми начальниками по отношению к слушателям и курсантам, и на время проведения занятий пользуются дисциплинарными правами в отношении обучающихся – исходя из комплексной оценки учебной обстановки, единолично принимают решения, отдают приказы в установленном порядке, а также обеспечивают их выполнение. Вместе с тем, наделенные всей полнотой распорядительной власти, преподаватель-офицер несет персональную ответственность за каждого обучающегося.

Преподаватель военного вуза должен владеть навыками академической речи, уметь управлять беседой и дискуссией с обучающимися, всесторонне и объективно оценивать качество взаимодействия в системе «начальник – подчиненный», предвидеть и ликвидировать конфликты.

Когнитивный компонент предъявляет требование к педагогическим умениям, направленным на решение педагогических задач, что составляет педагогическую компетенцию преподавателя – сочетание знаний, умений, навыков и соответствующих способностей, необходимых педагогу для осуществления учебно-воспитательных функций. К таким знаниям относятся знание цели и содержания высшего образования; государственный образовательный стандарт высшего образования; принципы построения содержания профессионального образования; сущность и закономерности процесса обучения; методы и организационные формы обучения и воспитания курсантов; современные педагогические технологии.

На наш взгляд, следует обратить внимание на то, что высоким профессионализмом обладает преподаватель, способный представлять место своей дисциплины в системе дисциплин базовой и вариативной части образовательной программы, которые развивают определенную компетенцию обучающихся, а также быть ознакомленным с основными

положениями обеспечивающих дисциплин и воплощать в учебном процессе значимые междисциплинарные связи. При этом необходимо сделать акцент на овладении преподавателем методических основ преподавания и использования в образовательном процессе инновационных обучающих технологий.

Наряду с комплексом педагогических средств, направленных на формирование профессиональной компетентности преподавателей, важная роль отводится технологизации образовательного процесса в высшей военной школе.

Технологичность образования имеет принципиальное отличие от традиционного образовательного процесса. Технологизация учебного процесса, с одной стороны, означает определенную стандартизацию обучения, с другой стороны – индивидуализацию, т. е. учет индивидуально-психологических и личностных особенностей обучающихся. Такое противоречие нивелируется сочетанием использования системы методически и научно обоснованных образовательных технологий, которые являются основным инструментарием в комплексе педагогических средств практической деятельности педагога.

Педагогические компетенции отражают способность военного преподавателя не только транслировать систематизированные знания, но и мотивировать курсантов к самостоятельному поиску знаний, использованию накопленных знаний для решения практических задач. Преподаватель должен быть способен эффективно использовать мультимедийные ресурсы и телекоммуникационные средства. Так, учебная дисциплина «Электронные образовательные и информационные ресурсы», реализуемая на кафедре, нацелена на овладение преподавателями знаниями психолого-педагогических принципов и методики использования технических средств обучения, электронных образовательных и информационных ресурсов. В процессе обучения слушатели учатся педагогически грамотно применять на занятиях информационно-коммуникационные технологии, современные технические средства обучения.

Подготовка военных преподавателей осуществляется комплексно, с учетом систематизации практических знаний и структуры педагогической деятельности преподавателя, в ходе реализации основных профессиональных образовательных программ и дополнительных профессиональных программ, а также в системе профессионально-должностной подготовки. При этом к подготовке преподавателя необходимо подходить индивидуально, учитывая содержание читаемой им дисциплины с выстраиванием образовательных траекторий с целью повышения квалификации педагогических работников, переподготовки для выполнения нового вида профессиональной деятельности преподавателя, а также подготовки научно-педагогических кадров в адъюнктуре.

Так, дисциплина «Технологии профессионально-ориентированного обучения», реализуемая на кафедре в группах слушателей и адъюнктов, формирует компетенции преподавателя в использовании основных технологических приемов и методов осуществления педагогической деятельности, а содержание дисциплины «Предметная область» направлено на повышение уровня профессиональной компетентности преподавателей в области применения современных технологий обучения в дисциплинах профильной кафедры. Отличительной ее особенностью является практическая направленность: военный преподаватель должен отлично знать преподаваемую дисциплину, поэтому слушатели и адъюнкты знакомятся с современными тенденциями развития преподаваемой дисциплины, инновационными методиками и технологиями обучения, обеспечивающими высокоэффективную организацию образовательного процесса в рамках конкретной дисциплины. Наряду с освоением профессиональной программы «Преподаватель-исследователь», адъюнкты защищают квалификационную научную работу, имеющую значимость для конкретной научной отрасли, что значительно повышает уровень профессиональной компетентности военного специалиста.

В ходе освоения дисциплин психолого-педагогического профиля («Педагогическая психология», «Психология и педагогика высшей военной школы») профессиональная

компетентность формируется путем внедрения в образовательный процесс активных и интерактивных форм проведения учебных занятий, элементов тренинга, деловых и ролевых игр.

Так, тренинговые программы обучения чаще всего включают упражнения на развитие навыков общения, лидерских и деловых качеств, личностного роста, навыков саморегуляции и стрессоустойчивости. В структуре тренинга выделяют поведенческий компонент, формирующий практические навыки в сфере преподавания; рефлексивный компонент, развивающий профессионально важное качество преподавателя – педагогическую рефлексивность; коммуникативный компонент, направленный на формирование навыков эффективной коммуникации; релаксационный компонент, развивающий навыки саморегуляции и релаксации).

Важной составляющей процесса повышения квалификации является индивидуализация обучения, предполагающая поисково-творческую самостоятельную деятельность обучающихся, реализуемую в ходе групповых дискуссий, проблемно-поисковых семинаров, междисциплинарных практикумов и разработку индивидуальных проектов, воплощение и оценку творческого результата. На кафедре накоплен положительный опыт индивидуализации обучения, которая позволяет обеспечить лично-ориентированное обучение и персонализацию подготовки педагогических работников. Так, учебный модуль «Индивидуальное задание» направлен на самостоятельную разработку слушателями актуальных образовательных задач, а на занятиях практической направленности слушатели выступают с обменом личного профессионального опыта решения образовательных задач в процессе преподавания учебных дисциплин.

Особая роль в плане профессиональной подготовки будущих преподавателей отводится кейс-методу, который формирует умение самостоятельно и творчески решать задачи профессиональной деятельности военнослужащих, гармонизации в системе отношений «преподаватель – обучающийся», совершенствованию и непрерывному самосовершенствованию обучающихся, развивает индивидуальный творческий стиль деятельности военного преподавателя.

Профессиональная компетентность преподавателей формируется также в ходе профессионально-должностной подготовки и самообразования профессорско-преподавательского состава. Психолого-педагогические императивы в сфере самообразования преподавателей предусматривают выстраивание индивидуальной образовательной траектории, самостоятельное совершенствование профессиональных компетенций. В процессе самосовершенствования, а также в рамках профессионально-должностной подготовки – на учебно-методических сборах, инструкторско-методических, показательных и других видах занятий – преподаватели изучают наиболее актуальные проблемы современного образования, в том числе изменения в законодательстве об образовании, знакомятся с инновационными образовательными и электронными ресурсами, приобретают знания в области организации образовательной деятельности обучающихся, основанные на современных достижениях военной науки, а также практики оперативной и боевой подготовки, повышая, таким образом, методическое мастерство и квалификацию.

Итак, подготовка военных преподавателей на нашей кафедре прежде всего направлена на формирование и развитие ключевых компетенций, обусловливаемых психолого-педагогическими императивами профессиональной деятельности преподавателя. Это позволяет офицерам успешно включаться в образовательный процесс военного вуза, обеспечивает результативность их деятельности. В современных условиях, характеризующихся инновационными преобразованиями, военный преподаватель для того, чтобы быть востребованным и успешным, должен быть готов к различным изменениям, уметь оперативно и эффективно адаптироваться к новым условиям, непрерывно пополнять багаж своих знаний, стремиться к педагогическому мастерству и саморазвитию, т. е. быть профессионально компетентным.

Список используемых источников

1. Военная педагогика / под ред. О.Ю. Ефремова. – СПб.: Питер, 2017. – 640 с.
2. Голубев М.А., Крантовский В.И. Формирование профессиональных компетенций у будущих преподавателей академии в области нормативных правовых основ системы образования: инф. бюл. № 140 / под ред. И.Ю. Воронкова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – С. 17–20.
3. Иноземцева Л.А. Психолого-педагогические факторы формирования устойчивой мотивации к педагогической деятельности преподавателей военного вуза: инф. бюл. № 140 / под ред. И.Ю. Воронкова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – С. 12–16.
4. Маркова А.К. Психология труда и профессионального развития учителя. – М.: Просвещение, 1994. – 192 с.
5. Об утверждении Единого квалификационного справочника должностей руководителей, специалистов и служащих [раздел «Квалификационные характеристики должностей руководителей и специалистов высшего профессионального и дополнительного профессионального образования»]: приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 11 января 2011 года № 1н. – М., 2011. – 28 с.
6. Примерная дополнительная профессиональная программа профессиональной переподготовки военных специалистов для выполнения нового вида профессиональной деятельности в сфере педагогики высшей школы [Утв. статс-секретарем-заместителем МО РФ 28 февраля 2017 года]. – М., 2017. – 23 с.
7. Репях Н.А., Кужекин Н.С. Опыт индивидуализации практической направленности программы повышения квалификации педагогических работников академии: инф. бюл. № 140 / под ред. И.Ю. Воронкова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – 84 с.
8. Сластенин В.А. Педагогика: учебник. – М.: Academia, 2019. – 400 с.

Н.А. Репях,
кандидат филос. наук, доцент;
А.Н. Хрустова

«НОВАЯ ПОЭТИЧЕСКАЯ ФИЛОСОФИЯ» ВЛАДИМИРА ФЁДОРОВИЧА ОДОЕВСКОГО КАК ПРЕДТЕЧА ФИЛОСОФИИ РУССКОГО КОСМИЗМА

В статье рассматриваются космофилософские взгляды русского писателя, ученого, философа XIX века В.Ф. Одоевского, оказавшие существенное влияние на формирование литературно-художественного направления в философии русского космизма.

Ключевые слова: космизм, цивилизация, человечество, наука, культура, научно-технический прогресс.

Есть в отечественной истории достаточно много деятелей, которым не поставлено памятников, в их честь не названы улицы и площади городов, да и представлены их имена чаще всего на периферии отечественной истории, культуры, науки, философии. Однако это не умаляет их величия. И порой только по прошествии десятилетий, а то и веков потомки способны понять и оценить творческое наследие, вклад в решение важных социальных проектов, оказавших существенное влияние на развитие общества. К такой плеяде видных деятелей русской культуры, оригинальных отечественных мыслителей XIX века относится Владимир Фёдорович Одоевский – одна из загадочных личностей русской философской мысли. По достоинству оценить его роль как предтечи философии русского космизма, показать оригинальность многих идей, опередивших время, призвана настоящая статья.

Надгробный камень на Донском кладбище, где похоронен Одоевский, содержит эпитафию – «блаженны чистии сердцем, яко тии Богом узрят». Таким и был, по свидетельству современников, Владимир Фёдорович – чистым душою и сердцем, искренним и правдивым, добрым и отзывчивым, настоящим патриотом своей Родины. И хотя он представлял род Рюриковичей, который берет начало от князя Михаила Черниговского, замученного в Орде и причисленного к лику святых, умер князь Одоевский в бедности и одиночестве. Было ему 66 лет. Так закончилась жизнь оригинального писателя и мыслителя, явившегося первопродцом уникального течения отечественной и мировой философской мысли.

Как известно, русский космизм представлен именами, принадлежащими разным духовным эпохам и поэтому разными по опыту осознания, темам мыслей и их устремленности в будущее. Однако в работах Одоевского сильнее, чем у других философов-космистов раннего периода, сформулированы идеи необходимости формирования «новой науки» или, по его собственному выражению, «цельного знания», способного управлять силами природы. Формами же выражения нового мышления у Одоевского выступают главным образом литературные произведения.

Исследователи вполне справедливо относят Владимира Фёдоровича Одоевского к литературно-художественному направлению в философии русского космизма. Именно в «новой поэтической философии», как образно называл свои идеи сам Одоевский, зарождается новый стиль мышления, новый взгляд на мир и место в нем человека, формируется оригинальное понимание целостности природы и человека, критические оценки современной ему эпохи и предвидение будущего человечества в целом [1].

Оценивая Одоевского как исключительно оригинального мыслителя России XIX века, выразителя взглядов, часто называемых сегодня «космическим мировоззрением», нельзя не отметить наиболее значимые результаты его деятельности в самых разных сферах жизни

общества. Талант и разносторонность интересов Одоевского нашли яркое воплощение как на поприще государственной службы, так и в духовной жизни общества.

Прежде всего, отметим, что Одоевский заслуженно считался одним из образованнейших людей своего времени. На золотой доске Московского университетского пансиона, где ранее учились П.А. Вяземский, П.Я. Чаадаев, Н.М. Муравьев, Н.И. Тургенев, его имя как выпускника пансиона увековечено рядом с именами В.А. Жуковского, Д.И. Писарева.

Еще в бытность свою воспитанником пансиона Одоевский увлекся идеями Ф. Шеллинга, которые навсегда стали для него «душевным делом». В 1823 году вместе с В.К. Кюхельбекером, И.В. Киреевским и Д.В. Веневитиновым он создает кружок – «общество любомудров», оставаясь бессменным руководителем которого в течение двух десятилетий. В «обществе» царил дух немецкой философии (особенно почитались идеи Ф. Шеллинга, И. Канта, Л. Океана, Й. Герреса).

Философия Одоевского убедительно опровергает упреки русской философии в ученичестве, отсутствии самостоятельности и оригинальности. В философском творчестве Одоевского исследователи выделяют несколько этапов. Основными из них можно назвать, кроме уже упоминавшегося увлечения философской системой Ф. Шеллинга и натурфилософскими идеями, обращение к мистицизму, продолжение «линии гуманизма и эстетизма», глубокое проникновение в антропологию и историософию. В многосторонности интересов Одоевского проявилась не только широта его духа, но и постоянное стремление к философскому синтезу, систематизации своих взглядов на различные стороны бытия [2].

Несомненно, что история русской мысли XIX века – это, в первую очередь, история русской литературы. Одоевский был близок со многими выдающимися писателями и поэтами своего времени. Известно, что он долгие годы дружил с А.С. Грибоедовым, часто общался с М.Ю. Лермонтовым, его творчество высоко оценивал А.С. Пушкин. Могущественным и «энергетическим» писательский талант Одоевского характеризовал В.Г. Белинский. Совместно с В.К. Кюхельбекером в 1824–1825 годах Одоевский издавал альманах «Мнемозина». «Положить предел нашему пристрастию к французским теоретикам» и обратить внимание на распространение отечественного литературного творчества – такой задачу альманаха видел сам Одоевский. Всего было опубликовано четыре книги альманаха, в которых кроме издателей печатались А.С. Пушкин, А.С. Грибоедов, Е.А. Баратынский, Н.М. Языков. Сотрудничал Одоевский и в журналах «Современник», «Отечественные записки», «Европеец», «Вестник Европы», редактировал «Сельское обозрение». В начале 1820-х годов он участвует в заседаниях «вольного общества любителей русской словесности», которым руководил Ф.Н. Глинка, и входит в кружок переводчика и поэта С.Е. Раича.

Как человек большого государственного ума и эрудиции, на государственной службе Одоевский исполняет обязанности чиновника Комитета иностранной цензуры, директора Императорской публичной библиотеки, директора Румянцевского музея в Санкт-Петербурге (ныне ГМИИ им. А.С. Пушкина), а с переводом в 1861 году музея в Москву назначается сенатором московских департаментов Сената.

Известно, что Одоевский был противником крепостного права и всемерно поддерживал реформы Александра II. Восстание декабристов 1825 года (участником которого был двоюродный брат – А.И. Одоевский) безоговорочно осудил, однако однозначно осудил и николаевскую расправу над участниками восстания и даже был готов разделить участь каторжников. Выступая сторонником тюремной реформы, предлагал ввести в России систему судов присяжных. С личностью Одоевского связано и создание в России детских приютов, он также выступал одним из учредителей детской Елисаветинской больницы в Санкт-Петербурге.

Следует отметить, что Одоевский отличался разнообразием и научных интересов. В историю отечественной науки он вошел одним из учредителей археологического общества, а также Императорского географического общества.

Философское творчество Одоевского сочеталось со стремлением популяризировать свои идеи, излагая их, прежде всего, в литературно-художественной форме. Широко распространяя свое воздействия на литературу, искусство, научную мысль, на формирующиеся в обществе ценностные ориентации и социальные идеи, философ оказал существенное воздействие на зарождение в России космофилософских идей.

Основными произведениями, по которым мы можем судить о мировоззрении Одоевского, являются роман-утопия «4338. Петербургские письма», первый отечественный философский роман «Русские ночи», повести «Сегелиель», «Сульфида», «Саламандра», «Княжна Зизи», «Княжна Мими». Несколько изданий выдержал сборник «Сказки бабушки Иреней», куда вошли 14 сказок: «Город в табакерке», «Мороз Иванович», «Разбитый кувшин», «О четырех глухих» и другие. Зачастую под литературными псевдонимами – Ириной Модестович Гомозейко, дядя Ириной, а затем бабушка Иреней – простым народным языком, которым восхищался В.И. Даль, обсуждались сложнейшие вопросы общественной жизни. По свидетельству В.Г. Белинского, Одоевский породил «целую литературу книг для простонародия».

Философия Одоевского историософична. Как и большинство отечественных мыслителей, он занят идеями о России будущего, ее местом в будущем всего человечества. Особое место в этом плане занимает роман-утопия «4338. Петербургские письма». Он написан в 1835 году в форме писем (их семь) и так называемых фрагментов и заметок. Описываемые события происходят в 4338 году – за год до ожидаемого, согласно расчетам 1820 года, столкновения Земли с кометой Вьелы.

Автор писем, якобы обладая способностью входить в сомнабулическое состояние, переносится в эпоху 4339 года и хочет увидеть, «проведать, в каком состоянии будет находиться род человеческий за год до этой страшной минуты» [3]. Увиденное ему удастся записать, а выйдя из такого состояния, автор узнает, что во время сомнабулизма он был китайцем, студентом Главной Пекинской школы Ипполитом Цунгиевым. Письма обращались к студенту той же школы, Лингину.

Антропологизм Одоевского в романе имеет ярко выраженную патриотическую окраску. Как известно, он всегда и во всем выступал истинным патриотом России, всегда утверждал первенство русского народа. Заметим – не превосходство, а именно – первенство. Такое право наш народ, по мнению Одоевского, заслуживает не только по дарованным природой способностям, но и по чувству любви, своей высокой духовности. По-особому представлен русский народ и в романе «4338. Петербургские письма». И не только той ролью в человеческой цивилизации, когда «русское полушарие», как пишет в одном из писем китайский студент, стало называться «центром всемирного просвещения», но и достигнутым уровнем знаний в целом. «Сколько знаний, сколько глубокомыслия! Удивительная ученость и еще более удивительная изобретательность в этом народе! Она здесь видна на каждом шагу», – пишет о русском народе китайский студент [3].

Несомненный интерес для современников представляет описанный Одоевским уровень организации и достижения в области науки и техники, архитектуры, быта и т. д. Так, два города – Москва и Петербург, – которые были отделены друг от друга едва ли не степью, стали одним великолепным мегаполисом. А о той части, которая называется Московской, пишет автор писем, могут напоминать лишь архитектура и величественные остатки древнего Кремля.

Особый интерес для наших современников, особенно жителей Санкт-Петербурга, представляет пятое письмо, которое начинается с упоминания Пулковской обсерватории. Автор называет ее «знаменитой древней обсерваторией», рядом с которой построен дом первого министра. К специально построенным возле дома колоннам прикрепляются аэростаты прибывающих, которые на специальной платформе перемещаются в приемную министра. Такой приемной служит крытый сад, по-особому освещенный специальным «электрическим снаряжением в виде солнца» [3].

В огромных размерах Зале Ученого Конгресса, украшенном статуями и портретами великих людей, еженедельно проходят собрания ученых. Для удобства работы ученых здесь же размещены библиотека и физическая лаборатория.

Одоевский убежден в целесообразности существования двух наук. Одну из них он называет общей наукой предвидения и считает предметом ее изучения историю природы – «каталог предметов, которые есть и будут». Вторая наука, по Одоевскому, нужна «для того, чтобы не принять умершее за живое». Ее предназначение в исследовании человеческой истории как «каталога предметов, которые только были и никогда не возвратятся».

Существующее сотворчество физиков, историков, поэтов и музыкантов ведет к формированию «новой науки», убежден Одоевский, которая будет синтезировать способности людей в единое целое. Это целое, оформляясь в «цельное знание», фокусирует у Одоевского познание на изучении единого объекта – человека и природу как целостность.

В романе отмечается, что русским присуща и особая вера в науку, ее безграничные возможности. Делом, достойным удивления, трудом веков и науки называется построение в России системы хранилищ, которая берет начало от экватора и тянется по всему северному полушарию. «Русские победили даже враждебный свой климат» – читаем мы в романе. В каждом городе устроены теплохранилища, соединенные с главным резервуаром, куда огромные машины по трубам непрерывно нагоняют горячий воздух. Дома, крытые сады и даже аэростаты отапливаются этим воздухом. И наоборот, охлаждать климат, доставлять холодный воздух в Пекин с целью освежения городских улиц якобы предлагали китайскому правительству русские промышленники [3].

Вера в науку делает, пишет автор писем, русских бесстрашными. Если китайское правительство из-за множества несчастных случаев запретило «плавание по воздуху», то увиденное в России поражает китайского студента. «Они меня совсем не понимали, – пишет Ипполит Цунгиев в первом письме. – Они так верят в силу науки и в собственную бодрость духа, что для них летать по воздуху тоже, что нам ездить по железной дороге». Более того, при обсуждении опасности кометы, способов борьбы с ней, пишет молодой человек «... их вера в могущество ума была столь сильна, что они с насмешкой говорили об ожидаемом бедствии» [3].

Описывая аэростаты, гальваностаты, локомотивы, а также электроходы, освещенные гальваническими фонарями, Одоевский подчеркивает, что они выступают стимулом просвещения, движущей силой всей познавательной деятельности человека «независимо от прямой пользы, или приносимой в их осуществлении».

Присущий всей русской философии панморализм, доминирование моральных установок находит у Одоевского и в описании значительных изменений, происходящих в обществе, особенно в сфере взаимоотношений между людьми. Отмечается простота обращения и радушие, которые не оставляют места в общении притворству и лицемерию. А достигается это русскими главным образом посредством природной регуляции человеческого организма, с помощью так называемых магнетических ванн. Другими словами, люди уже научились изменять свою и телесную, и духовную организацию.

В письмах ярко представлен и быт россиян. Они, в особенности дамы, великолепно одеты, «прекрасные и особо свежи». Подчеркивается, что последнее выступает свидетельством хорошего здоровья, неумение беречь которое считалось признаком плохого воспитания. Кстати, содержание меню россиян, представленное в романе, основано на «правилах нравственной математики»: для каждого звания – свой «прейскурант». Определен же он с учетом той пользы, которую конкретное звание может принести человечеству. Интересно, что основу еды русских составляют различные питательные эссенции, например, спаржевая, ананасная кислота, водород и т. д.

В своих «Заметках» (часть романа) Одоевский рассказывает о реализации космического проекта – освоения Луны. Условия для жизни человека на Луне отсутствуют, однако она используется как источник ресурсов для землян. Это позволяет, по мнению философа, решать,

прежде всего, одну из глобальных проблем – демографическую, несущую угрозу самому существованию Земли.

По Одоевскому, уже якобы найдены «способы сообщения с Луною». Однако они «чрезвычайно опасны» и поэтому для таких экспедиций «единственно употребляется войско». Так, впервые мы встречаем, по сути дела, указание на необходимость существования специальных сил, способных осуществлять не только кругосветные экспедиции, но и осваивать другие планеты. Да и комету Вьелы предполагается уничтожить с помощью военных снарядов, что, видимо, тоже предстоит выполнять этому «войску». Может это действительно было своеобразным предвосхищением создания войск, которые сегодня называются Космическими?

В целом социальный оптимизм Одоевского основывается главным образом на неограниченных возможностях науки и техники в решении любых социальных проблем, в том числе глобальных.

Однако к другим выводам мыслитель приходит в романе «Русские ночи», в котором в значительной степени подводит итоги своих размышлений о прошлом, настоящем и будущем человеческой цивилизации, смысле истории и культуры.

По сюжету, три юных любомудра – Ростислав, Вечеслав и Виктор – озабочены судьбой человечества и обращаются за советом к своему другу (мистика и ученому) по прозвищу Фауст. Кстати, в Фаусте нетрудно увидеть самого Одоевского. Последний читает им рукопись, состоящую из аллегорических повествований – диалогов и притч известных исторических персонажей. Их обсуждение и лежит в основе романа. С диалогов начинается роман, ими же все и заканчивается: эпилог целиком построен на диалогах. Роман, таким образом, имеет своеобразный сюжет, который определяется не сменой событий, персонажей, их связью, а кругом рассматриваемых в романе идей.

Перед читателем выступает беспощадный судья, вскрывающий глубину распада культуры, потерю духовности человеческой цивилизации. «Вот, господа, – пишет Одоевский, – следствие односторонности и специальности, которое нынче почитается целью жизни; вот что значит полное погружение в вещественные выгоды и полное забвение других, так называемых бесполезных порывов души. Человек думал закопать их, законопатить хлопчатой бумагой, залить дегтем и салом, – а они являются к нему в виде приведения: тоски непонятной!» [4].

Впервые в русской литературе такой резкой критике подвергается западная культура. Устами Фауста предрекается «гибель» Запада, распад его уже былой мощи. Несмотря на еще кажущийся безграничным рост материальных благ и возможностей научно-технического прогресса, в реальности лишь пустота, призрачность и иллюзия жизни настоящей. Пробуждение неизбежно и оно приносит с собой «невыносимую тоску». Кстати, актуальность выводов Одоевского в полной мере разделяется авторами статьи и о Западе XXI века.

Научное знание, считает русский философ, достигло тупиковой ситуации. «Мы достигли в эту минуту того состояния науки, – пишет Одоевский, – когда мы не можем решительно сказать, что мы ничего не знаем...» [4]. Он убежден, что постичь «целое» не позволяет дифференциация науки на ряд специальных дисциплин. Ослабело на Западе искусство, умирает религиозное чувство.

Однако, если начало «Русских ночей» пессимистично, то заканчивается роман все же на мажорной ноте. Спасти дух Европы призвана Россия, убежден Одоевский. И возможности ее, подчеркивает мыслитель, во «всеобъемлющей многосторонности русского духа, в стихии всеобщности или, лучше сказать, – всеобнимаемости» Россия не просто превзойдет Европу, она исцелит ее, считает Одоевский.

Философские идеи Одоевский оказались во многом пророческими, на века опередив время. Это выразилось не только в анализе глубокого духовного кризиса, затронувшего прежде всего западное общество, но и раскрытии перед человечеством всей меры ответственности за результаты своей природопреобразующей деятельности. В работах философа предстало

предвидение актуальных социальных проблем, угроз и вызовов, с которыми пришлось столкнуться людям XXI века.

Исследование философского творчества Одоевского позволяет глубже понять все богатство идей отечественной философской мысли, оценить ее вклад в мировую философию. В значительной степени именно благодаря творческим размышлениям Одоевского в лоно общеполитических систем начинают включаться космополитические идеи. Его отношение к миру и к самому себе воплощено преимущественно в литературно-художественной форме и позволяет с позиций гуманизма рассматривать проблемы взаимодействия человека и мира, глубже осознавать масштабы вызовов и угроз, с которыми столкнется человечество в будущем. Их решение Одоевский связывал главным образом с освоением космоса и особая миссия, считал он, в решении этой вселенской задачи будет по праву принадлежать России.

Самобытное течение мировой и отечественной мысли – русский космизм – сыграло значимую роль не только в формировании уникального типа общественного сознания, но и обусловило в значительной степени наступление эры практического освоения космоса. Среди основателей нового направления русской философии по праву достойное место занимает Владимир Фёдорович Одоевский.

Список используемых источников

1. Русский космизм: антология философской мысли / сост.: С.Г. Семенова, А.Г. Гачева. – М.: Педагогика-Пресс, 1993. – 368 с.
2. *Зеньковский В.В.* История русской философии. – Л.: ЭГО, 1991. – Т. 1, ч. 1. – 221 с.
3. *Одоевский В.Ф.* 4338. Петербургские письма. – М.: Огонек (АИО), 1926. – 64 с.
4. *Одоевский В.Ф.* Русские ночи. – Л.: Наука, 1975. – 137 с.

Basyrov A.G., Koshel I.N., Shushakov A.O. A model of parallel computing in degrading onboard computer system of a spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 8–15.

The operation of a parallel on-board computer system (BCS) of a spacecraft, which is degrading as a result of external destructive influences, is considered. A model of parallel computing in the conditions of degradation of a computing system is proposed.

The examples of modeling the functioning of the spacecraft military vehicle with the estimates of the maximum possible effectiveness of its functioning with various implementations of parallel computing plans are considered. Conclusions are made and suggestions are made for planning parallel processing of information under the conditions of destructive effects on the spacecraft.

Key words: parallel processing planning, maximum possible efficiency, destructive impact.

Vasiliev A.S., Kalyuzhnyy A.V., Shirobokov V.V. The algorithm of planning of parallel processing of information in the distributed dynamic network structure of the orbital grouping of microsatellites. // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 16–22.

In the article the approach to the organization of information processes technology-based functionally-distributed computing in the perspective of the orbital group of satellites built on the technology of distributed spacecraft in which the interaction takes place between microsatellites clients via high-speed communication channels and data processing is performed by one or more selected micro-servers on board which has a high performance computing system.

Key words: planning of parallel processing of information, grouping of microsatellites, onboard computer system.

Goncharevsky V.S. Energetically optimal control of mutual maneuvering of spacecraft in free space // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 23–27.

The solution of variational problems for finding optimal programs for controlling the relative motion of spacecraft in free space is presented. As a result solutions to the problem with fixed the optimal value is obtained by the ends relative control program optimal motion is found laws of change of relative velocity and relative control acceleration, as well as the corresponding value energy costs index. Solve problems with movable ends allowed determine the optimal values of such control program parameters, like time and initial conditions of mutual spacecraft maneuver.

Key words: mutual maneuvering; power costs; relative motion; control program.

Kazantsev D.I. Method of organization of virtualization of computing resources of a complex of automation tools for solving target tasks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 28–35.

The method of virtualization of computing resources of a complex of automation tools is proposed. The process of configuring a set of automation tools based on virtualization of computing resources, which can be used in the creation (design), operation and modernization of computer systems that operate using virtualization technologies, is considered. The configuration decision is made based on the developed system of fuzzy inference rules implemented in accordance with the Mandani algorithm. The method can be used to optimize the functioning of a complex of automation tools based on virtualization of computing resources.

Key words: configuration, virtualization, computing resources, complex of automation tools.

Kazahov B.D., Kozlov V.V., Lagun A.V. Justification of indicators to assess the performance of protection systems missile and space complex in terms of external destructive impact // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 36–44.

The analysis of the state of protection of the rocket and space complex in modern conditions is carried out. Problems that interfere with the normal functioning of the technological process of preparing a space rocket for launch under conditions of external destructive influence have been identified. Reduced methodological aspects of the need to form protection systems for rocket and space complexes. The article presents a morphological analysis of the concepts of the appearance of the complex protection system, as well as the concepts of security and survivability of the complex in various operating conditions. Developed indicators that characterize the security of the rocket and space complex in these conditions. Proposals for calculating the developed indicators were formed.

Key words: rocket and space complex, technological equipment, protection system, indicators, positional area, functioning processes.

Kalyuzhnyy A.V., Shulgin A.N., Shushakov A.O. Model and algorithm for optimal resource management of stochastic parallel computing processes. // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 45–52.

The model and algorithm implementing the method of optimal control of the power consumption of computing elements in high-performance computing systems under non-uniform computational load are considered. As a tool for reducing energy consumption, the use of multiple functional States of processors in conditions of high fragmentation of tasks, as well as taking into account the stochastic nature of parallel computing processes, is proposed. The principle of optimal control of the resource intensity of parallel computing is described. The results of simulation modeling are presented.

Key words: high-performance computing system, optimal, energy intensity, parallel computing process.

Kolesnik A.V., Ortikov M.Y., Charushnikov A.V. Justification of the composition of tools for developing software for modeling space systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 53–61.

The article presents information about the results achieved in the development and application of a single tool for developing software for modeling space systems. Based on the analysis of the results of the research and their comprehensive testing, recommendations are given for organizing work in the field of unification of computer models of space systems. The article includes the main theses of the decision of the round table «Current state and prospects of development of methods and technologies for modeling the use of space forces, systems and tools in automated systems of command and control of troops and weapons», held as part of the scientific and business program of the International military-technical forum «Army-2019».

Key words: instrumentation, computer model, space system, software system, unifying, method, algorithm.

Blagodyrenko E.V., Korobchenko I.P. Surveying of space objects by means of ground-based optical electronic systems with registration of spectrophotometric information // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 62–68.

Principals of space objects surveying by means of ground-based optical electronic systems with registration of spectrophotometric information and possibilities of its using for surveyed spacecraft recognition was considered in the paper. Generalized block diagram of ground-based spacecraft surveying optical-electronic system with registration of spectrophotometric information submitted.

Comparative analysis of two main technics of spectrophotometric information receiving: multi-spectral photometric and spectrophotometric technics performed in the work.

The possibility of technical feasibility of spectrophotometric measurements channel introduction into the present trajectory measurements optical electronic systems, intended for spacecraft's motion parameters, in the process of its modernizations.

Key words: optical-electronic systems, surveying of spacecraft, spectrophotometric information, spacecraft recognition.

Buchinsky D.I., Voznyuk V.V. Immunity of a coherent demodulator of binary phase-modulated signals with a spread spectrum under exposure to gaussian interference with a band-bounded uniform spectrum // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 69–76.

The paper presents the results of an analytical and numerical study of the noise immunity of a coherent demodulator of binary phase-shift keyed signals with spectrum spreading under the influence of Gaussian noise with a uniform band-limited spectrum. In the course of an analytical study, a mathematical model of the effect of such interference on a coherent demodulator of binary phase-shift keyed signals with spread spectrum was obtained. On the basis of a numerical study of the obtained analytical model, the parameters of interference with a uniform band-limited spectrum were determined, the effect of which minimizes the quality of reception.

Key words: noise immunity, spread spectrum signal, uniform spectrum interference, noise-like signal.

Zinnurov S.H., Novikov E.A., Stepanova E.A. Modeling of processes of generation and services of the traffic with a complex structure using the MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW logic-event modeling software package // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 77–86.

The article describes approaches to analytical and simulation modeling of the generation process, and also service traffic of a complex structure in a switching device. For research are offered interchangeable source models for interrupted Poisson and hyperexponential flows. The paper shows a one-to-one correspondence between the values Queuing system characteristics of interrupted Poisson and hyperexponential flows, the parameters of which are fixed by known conversion relations. It is proposed as a simulation modeling tool to use the Stateflow software package from Matlab/Simulink. The logic of functioning of the main elements of the simulation model is revealed, a study was conducted and shown the convergence the results of analytical and simulation modeling the services process a complex structure traffic, described by hyperexponential and interruptible Poisson processes.

Key words: complex structure traffic, Stateflow, interrupted Poisson process, hyperexponential distribution.

Kozlov Y.V., Kukushkin M.A., Mukheev O.Y. Methodological approach to assessing the stability of information exchange in the control loop of orbital constellations of spacecraft under conditions of destructive influences // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 87–94.

The article analyzes the possible options for the impact on information exchange in the circuit of the ground-based complex for managing orbital groupings of spacecraft, as well as possible options for monitoring the state of information exchange and timely detection of the impact on it. A mathematical apparatus based on semi-Markov processes has been developed that describes the various states of the information and telecommunication network as a result of various exposure options. The dependences of the stability of the information exchange of the information on the timing of detecting the impact on it are calculated.

Key words: ground-based complex for managing orbital constellations of spacecraft, stability of information exchange, semi-Markov processes.

Makhov D.S., Finko O.A. Way of space-time coding of information in parallel radio channels of radio engineering systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 95–107.

The way of space-time coding of information in parallel radio channels of radio engineering systems is offered. Parallel radio channels in work are understood as the parallel radio channels formed partial a beam of the characteristic of an orientation of a multibeam antenna array. The way consists in application of concatenation of the initial message and splitting it on fragments of various length depending on a partial radio channel quality. Fragments of the message appear remainders of division of the initial message on the bases in of residual number system. A part of the bases corresponding to partial radio channels of the best quality is used for correction of errors. In work analytical expressions and descriptive models of an space-time noiseproof code and system of coding are presented. Results of numerical researches of comparison of the correcting abilities of the offered code with known are given.

Key words: space-time noiseproof code, parallel radio channel, multibeam antenna array, control basis, residual number system.

Pimenov V.F., Popov A.S. Analysis of degree of suppression of interference correlated with signal in linear antenna array at optimization by minimum mean square deviation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 108–119.

The article presents the results of the computational experiment on investigation and comparison of characteristics of optimal spatial selection correlated and uncorrelated with the interference signal in the linear equidistant antenna array (AA), optimal by the criterion of minimum standard deviation. The character of the beam pattern and performance indicators of the optimized antenna array compared to the standard AA depending on the angle of arrival of interference and the presence of correlation relationship between the signal and interference are studied and shown. Dynamics of change of signal-to-interference ratio at output of optimized antenna array from value of correlation coefficient, difference between angles of signal arrival and correlated interference are analyzed, parameters of signal-interference situation are given, resulting in unacceptable reduction of spatial filter efficiency.

Key words: adaptive antenna arrays, premeditated radio interference, resistance to interference, noise cutoff coefficient, vector of weighting coefficients of an antenna array.

Alekseev A.V., Ragimov E.A. Choice of the optimum number of initial data for construction of an algebraic polynom when creating relief plastic cards // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 120–124.

To determine the inflection points of contour lines, which are necessary for constructing lines of zero curvature, a moving approximation of the initial data by an algebraic polynomial of the second degree can be used. This article substantiates the choice of the optimal number of source data that must be used in constructing such an algebraic polynomial.

Key words: maps, polynomial, navigation, approximation, relief.

Alekseev V.F., Andrievskaya V.Y. Determination of allowable discrete of gravimetric measurements to ensure the required accuracy of restoring the function of second derivatives of the geopotential // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 125–128.

The article proposes a technique for a priori estimation of the permissible detail of gravimetric survey, which is planned to be used to determine the second derivatives of the geopotential. Equations are proposed that allow us to estimate the mean square error of the second derivatives of the

geopotential depending on the complexity of the gravitational field and the discreteness of the initial values of the gravity anomalies.

Key words: geopotential, gravimetry, accuracy, function, Earth's gravitational field.

Directions of improvement of systems for drainage of surface runoff in urbanized areas / V.S. Ivanovskiy, V.S. Ignatchik, S.Y. Ignatchik, N.V. Kuznetsova, S.V. Sarkisov, M.A. Senyukovich, B.M. Usvyatsov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 129–138.

In accordance with regulatory documents, the calculation of networks for the removal of atmospheric precipitation from urbanized areas is carried out by the method of «limiting intensities», which combines two parts: meteorological and hydraulic. The article analyzes the state of the subject area of each of them.

The necessity of introducing a new accelerated method of updating climatic parameters, which allows solving the problem on the basis of data for a period of 5 years or more, has been experimentally substantiated.

The need for the development of a universal method for the hydraulic calculation of drainage networks for surface runoff, operating under conditions of uneven increase in runoff areas, with different versions of the formulation of the calculated rainfall intensities, and allowing to determine the costs changing in time, is substantiated.

Key words: systems for drainage of surface runoff, the method of "limiting intensities", climatic parameters, flooding of urbanized areas, hydraulic calculation.

Litinsky E.I., Makarenko A.A., Maslennikov S.A. The justification method of the complex utilizing space mapper's selection for the digital elevation modeling // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 139–149.

This article reviewed presentation of the advanced justification method of the complex utilizing space mapper's selection for the digital elevation modeling. For the first time, it was proposed to take into account the possibilities of different types of space observation systems by matrix survey of terrain areas in the area of building a digital elevation model. The improvement is based on the method for substantiating the requirements for space observation information for building a digital elevation model, which, in contrast to those developed earlier, makes it possible to connect the accuracy of building a digital elevation model by photogrammetric methods with the resolution and overlap of the original satellite images. Also presented is an example of modeling the use of these space systems as options for using orbital systems for building digital elevation models of two different-latitude earth surfaces.

Key words: space mapping systems, space observation systems, digital elevation model, the complex utilizing, justification method of the selection, the complex utilizing modeling.

Stanislavichus R.-B.B., Suvorov A.V., Yakovlev A.I. Investigation of the influence of errors in the initial astronomical and geodetic data on the operation of inertial navigation systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 150–155.

The method is based on measurements completely carried out on the object in accordance with Newton's law of motion and gravity. The measurements are carried out by the sensor unit of the inertial navigation system installed at the facility.

Key words: inertial navigation systems, errors, astronomical and geodetic data.

Chernov I.V., Yakunin V.I. Model of the process of gyrotheodolite operations to solve the problem of assessing the quality of its results // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 156–163.

The article substantiates the quality indicator of the target effect of the gyrotheodolite operations and the indicators of virtual (possible) time and resource costs, which allow us to take into account the impact of possible random time delays when assessing the quality of the geodetic preparation methods for the area (GPR).

The type of dependence of the target effect on the autonomy index of the GPR method is determined, which allows the use of the developed mathematical apparatus to support decision-making on the implementation of the GPR method in the absence of information from external sources. For example, geospatial exploration of the Arctic region or any other autonomous region.

The operational functionality of the linking indicator of the target effect of the GPR process with the cost of resources and time has been substantiated. This approach allows us to justify the choice of the GPR method, which ensures the satisfaction of the requirements for its quality.

Key words: model, virtual (possible) quality of the results of geodetic preparation, autonomy, gyrotheodolite, justification for choosing a method of geodetic preparation.

Applying Machine Learning Methods to Malware Detection Tasks / I.V. Abasheva, M.A. Eremeev, A.A. Kriulin, V.S. Nefedov, G.Y. Poterpeev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 164–171.

The article discusses the approach to detecting malware based on the application of machine learning algorithms to samples of various programs. As part of the approach, signs of malware are generated and various classification algorithms are considered. As a result, a quantitative assessment of the application of each algorithm is given, and the weight coefficients of the signs of malware are determined.

Key words: machine learning, pattern recognition, malware search.

Solovyov I.A., Solovyova M.V., Trofimova N.A. Security analysis of using the SAML language for implementing single sign-on scenarios // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 172–181.

The article presents the results of analyzing the features of the SAML standard application procedures, the specifics and potential defects of the XMLDSig standard with the identification of factors that characterize the vulnerability of the SAML protocol. Based on the results obtained, a comprehensive security model of the SSO infrastructure was defined and a justification was given for the implementation model of XSW threats, for the peculiar models of XSW violators of various types, and for the event of success of an XSW attack on the SAML protocol application procedure.

Key words: SAML markup language, end-to-end authentication, single sign-on scenarios, XML document, SAML protocol, XSW vulnerabilities, XSW attack, XSW threat and XSW intruder model.

Generalized mathematical model of the process of functioning of the onboard support complex of spacecraft in the conditions of technogenic pollution of near-earth space / A.A. Abdurakhimov, P.S. Goncharov, A.M. Denisov, A.V. Kuhtin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 182–194.

A generalized mathematical model of the process of functioning of the onboard support complex of spacecraft in the conditions of technogenic pollution of near-earth space is presented. A distinctive feature of the model is its multilevel aggregative structure. The mathematical model allows predicting the parameters of the spacecraft under the influence of particles of space debris and the presence of uncertainty in source data.

Key words: spacecraft, onboard support complex, mathematical model, space debris, technogenic pollution.

Method for determining the location of an external force applied to the body of a spacecraft equipped with a power gyroscopic complex / A.A. Abdurahimov, M.S. Karev, S.N. Krasnoshekov, D.V. Skvortsov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 195–203.

An approach to determining the location of the application of the disturbing force on the body (external elements) of spacecraft for various purposes is presented. A limited set of raw data is used, which can be obtained by telemetry measurements. Based on the results obtained, a justification is given for the possibility of localizing the place of application of external force.

Key words: spacecraft, technical condition, force, moment of force.

Belikhin E.N. Methodology for the allocation of tolerances on the parameters of on-board optoelectronic means of spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 204–212.

The dependence of the accuracy characteristics of on-board optoelectronic devices (BOES) on the scatter characteristics of their parameters is investigated. A simplified mathematical model has been developed for the relation between the error of the BOES and the deviations of the parameters from the calculated values. The resulting model meets the accuracy requirements. A methodology has been developed for the distribution of tolerances on the parameters of BOES. An indicator of the quality of solving the problem of the distribution of tolerances on the BOES parameters of spacecraft (SC) is proposed.

Key words: optoelectronic devices, scatter of parameters, distribution of tolerances.

Evaluation of the influence of the rocket-carrier class on the reduction of the specific cost of reducing useful loads at the best of the multi-time use of the first stage liquid rocket engine / D.G. Belyanin, S.Y. Gerasimenko, S.Y. Pirogov, V.V. Tipaev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 213–216.

Based on an analysis of the development directions of modern launch vehicles, variants of changing the design of missiles with the aim of reducing the cost of launch are considered. Based on the technical and economic model for evaluating the cost of launching launch vehicles of the tandem scheme of light, medium and heavy classes, the effects of reducing the cost of launch due to the reuse of the first stage rocket engine are considered.

Key words: unit cost of launch, launch vehicle, propulsion system.

Boldyrev K.B., Karchin A.Y., Pospishenko V.I. Combined model of rocket block body loading under conditions of destructive aerothermodynamic loads at the descent stage // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 217–222.

The article justifies an approach to the stress-strain state determination of the hull structure of a detachable rocket block consisting of hermetical thin-walled compartments and non-hermetical frame compartments when it is braking in the dense layers of the atmosphere. We propose a model of rocket block body loading which is based on a combination of engineering methods of fuel tanks strength and stability parameters determination and numerical methods of analyzing the load-bearing capacity of the rocket block transitional and tail compartments under extreme aerothermodynamic loading.

Key words: carrier rocket, missile block, detachable part, passive trajectory section.

Bocvin S.A., Garkovenko A.S., Hvatkov V.A. Main problems and trends in the development of automated accounting systems for personnel of the Armed Forces of the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 223–227.

The article provides a retrospective analysis of the formation and development of automated accounting systems for personnel of the Armed Forces of the Russian Federation. The main problematic issues of the organization (maintenance) of automated personnel accounting are formulated. Ways to solve them are suggested. The main development trends of automated personnel accounting of the Armed Forces of the Russian Federation are reviewed.

Key words: automated systems, personnel registration.

Gasyuk D.P., Dubovsky V.A., Stativka V.S. Technique for optimizing the movement of faulty missile weapons // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 228–236.

In the materials of the article the methodology is presented, the application of which allows to reduce the transportation costs caused by the need to move the missile weapons in order to restore their serviceable condition. Optimality is achieved by reducing the distances when defective boosters are moved to locations of service organizations.

The novelty is in the application of the Hungarian method for solving the transport task, which is adapted to the specifics of optimizing the movements of defective missile weapons and provides the required reliability of the task.

Key words: linear programming methods, Hungarian method, transport task, missile armament.

Gerasimenko S.Y., Pirogov S.Y., Pospishenko V.I. Research of dependence of initial parameters of movement of separate parts of carrier rockets from parameters of rocket-dynamic rescue system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 237–242.

The article presents the results of a study of the dependence of the initial motion parameters of the separated parts of launch vehicles on the parameters of the rocket-dynamic rescue system. An algorithm for calculating the initial motion parameters based on modified energy-mass equations of motion, which takes into account the use of the rocket-dynamic rescue system, is presented.

Key words: detachable part, launch vehicle, rocket-dynamic rescue system, payload.

Grudin I.V., Palguyev D.A., Shentyabin A.N. Information subsystem for collection, processing and exchange radar information of the network structure // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 243–253.

The analysis of existing algorithms for processing radar information is carried out, and the problems of using traditional algorithms for processing radar information on a time scale close to real time are identified. The prerequisites for creating an information system of a network structure are revealed. A solution for delivering radar information to consumers without changing the hierarchical structure of the information support system is proposed. Recommendations for building the structure of a promising automated control system, its information subsystem, and their application in the AF are developed.

Key words: algorithm, automated control system, network structure, information support, telemetry information.

Dolgov I.I., Pankratov A.V., Esaulov K.A. Algorithm for restoring the information and computing complex of complex technical systems, taking into account the priority of the tasks to be solved // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 254–265.

This article presents an algorithm for restoring the information and computing complex of complex technical systems, taking into account the priority of the tasks to be solved. Comparative analysis of recovery information and computing complex technical systems, without priority and with priority tasks. The hardware implementation of the proposed recovery algorithm is described.

Key words: information and computing complex, recovery algorithm, survivability, reliability, priority of recovery.

Kalabin P.V. Investigation of the influence of flywheel engine parameters on the characteristics of a small spacecraft optimal in speed of rotation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 266–275.

Solution for the scientific task of optimal speed automatically-operated turn of axisymmetric small satellites with flywheel engines is provided in this work. The task is resolved for one channel of satellite orientation control. There are analytical expressions demonstrating dependency of flywheel engine driving moment sign switching time and automatically-operated turn completion time from flywheel engine parameters included in the article. It's shown that engines with heavier flywheels but smaller electric engine mechanical constant to be used in order to increase automatically-operated turn speed. Research made can be useful for choosing flywheel engines for Earth remote sensing small satellites or orbital objects.

Key words: small satellite, flywheel engine, quasi-optimal turn, control law.

Kliepov A.V., Polyakov S.A., Shapovalov D.V. Methodology for substantiating long-term plans for the operation of equipment of complex technical complexes of space forces // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 276–287.

The paper analyzes the problem of long-term planning in managing the technical condition of equipment that is part of complex technical complexes of the Space forces (STK KV).

The paper presents a model of the operation of STK KV equipment and formulates the problem of long-term planning of repair and maintenance costs by minimizing the loss function. An approach to solving the problem based on the concept of locally optimal control with forecasting is proposed.

An algorithm for solving the formulated problem is developed, and the procedures included in it are described.

Key words: planning, decision-making, complex technical system, technical condition management, operation.

Kovalev F.E., Mirgorodskiy A.N., Elzofon D.A. Optimization of operating costs objects of ground-based space infrastructure // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 288–293.

The article considers a comprehensive approach to substantiate the optimal cost of reconstruction of the structure (heat consumption and thermal insulation of enclosing structures), which allows to minimize the cost of further operation. All types of costs are taken into account, both energy and non-energy, which affect the cost of operation, and functional dependencies on the formation of costs of each type are derived. Cost optimization with simultaneous consideration of thermodynamic and economic indicators is carried out by the method of thermoeconomics (exergoeconomics), which takes into account both capital investment in reconstruction and the cost of further operation over the entire service life.

Key words: reconstruction of the structure, operation of the structure, heat consumption, thermal insulation, energy efficiency, operating costs, thermoeconomics, exergoeconomics, reduced costs, technical systems, heating system.

Kopkin E.V., Popov D.V., Chikurov V.A. A heuristic algorithm for selecting multi-valued diagnostic features based on their value for evaluating the technical state of an object // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 294–307.

The article offers a computationally simple heuristic algorithm that allows you to select the minimum set of checks for diagnostic features that have a multi-valued representation form that provides the highest value of the value of diagnostic information obtained in the process of evaluating the technical state of an object.

Key words: technical state of an object; diagnostic feature; value of diagnostic information.

Kosyrev S.V., Lebedev M.Y., Sokolov D.A. Organization of solid municipal waste management at military facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 308–316.

The article discusses the scientific and methodological approach to solving one of the main tasks defined by the "Strategy of the environmental safety of the Russian Federation for the period until 2025", to increase the level of disposal of consumer waste using the military facilities of the Plesetsk cosmodrome as an example of the economic feasibility of such activities for organizations disposing of waste in the Arkhangelsk region.

Key words: ensuring environmental safety, recycling and reducing waste generation, criteria, targets, economic effect.

Litvinova N.B., Tupitsin Y.E., Shishkin E.V. Procedure for determination of terms of maintenance of equipment of technical systems of special facilities using flexible strategies // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 317–323.

The article presents method of determination of terms of maintenance of components of technical systems operated according to actual technical condition. The initial information in the proposed methodology is statistical data on the values of parameters characterizing the technical condition of the equipment. Fan linear and exponential random functions are used as a model of the random process of changing technical state-determining parameters. To determine the terms of maintenance, the time of reaching the defining parameter of the critical value corresponding to the parametric failure of the equipment is considered.

Key words: diagnostic parameter, technical condition, fan random functions, mathematical model, random distribution, technical systems.

Salnikov V.M., Shishkin E.V., Halmetov R.R. Utilization of the heat of rocket fuel at the launch facility // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 324–328.

This article discusses proposals for the utilization of a significant amount of heat released into the atmosphere in the form of hot gas jets when launching space rockets. The Russian space industry is a highly intelligent and most modern apparatus for providing the country's scientific, technical, research and defense power. The most striking embodiment of the greatness of the country are spaceports. Cosmodromes consist of many sites and positions.

Key words: starting equipment, gas-dynamic, shock-wave action; protection from high temperature impact; heat utilization.

Samoylov E.B., Shmelev V.V. Estimation of power characteristics of the missile and space equipment by results of ground-based trajectory measurements // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 329–339.

The problem of forecasting of area of possible trajectories of the movement of object of supervision by results of ground-based trajectory measurements is considered. Distinctive feature of the solved task is possibility of calculation not only passive (ballistic) section of trajectory, but also active. In calculations the priori data on aerodynamic and power characteristics of object of control are not used. Application can have the offered device at estimation and control of flight technical

characteristics of objects, access to which results of distance measurements is absent for the objective reasons. Demonstrative results of practical approbation are given, the error of calculations is evaluated.

Key words: missile and space equipment, flight technical characteristics, processing of measuring information.

Sasunkevich A.A., Silantev D.S., Silantev S.B. Improving the accuracy of calculating control parameters in the non-atmospheric flight section without calculating the parameters of the flight rocket // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 340–347.

Based on the analysis of the features of the implementation of iterative terminal guidance methods in the non-atmospheric section of the launch vehicle flight without calculating the parameters of its movement, it is shown that when forming control parameters, it is necessary to increase the accuracy of determining the remaining flight time. The developed algorithm for solving this problem is presented. The results of mathematical modeling are presented, which confirm the correctness of the theoretical provisions of this algorithm.

Key words: algorithm, method, guidance, remaining flight time, launch vehicle, system, parameters, accuracy, control, operational and technical characteristics.

Yatsechko M.I. Algorithm of optimal management of the engineering and aviation service during preparation for flights of a group of aircraft under conditions of a limited number of personal staff // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 348–361.

The article presents an algorithm for managing the aviation engineering service, which makes it possible to optimally distribute the personnel to perform work on preparing a group of aircraft for a simultaneous departure in order to minimize the total training time in a limited number of specialists. In this case, the algorithm takes into account the probabilities of failure of all aircraft in all specialties and their recovery time.

Key words: algorithm, aviation technology, automated control system, aircraft, optimization, engineering and aviation service.

Vanyagin V.E., Vanyagina M.R., Moldovanova S.M. Assessing level of confidence in the results of the student in proctoring technology // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 362–368.

Proctoring technology provides control over online training tests. The proposed methodology of the assessing the level of confidence in the results of the examinee during proctoring allows to evaluate the conducted tests objectively on the basis of developed metrics and indicators and make a decision on the possibility of taking into consideration the results of the examinee.

Key words: proctoring, proctor, distance learning, online training test, higher military school, confidence assessment methodology.

Golubev M.A., Rozanova L.V. Functional model of work organization with service reviews of graduates of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 369–372.

The sequence and features of the organization of processing, analysis of service reviews of graduates and accepting decisions on making changes to the main professional educational programs of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky are studied.

Key words: service review, functional model.

Degtyarev A.N., Spirin A.P. The potential of humanitarian disciplines: formation of cadets attitude to national identity as a professional value // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 373–378.

The article discusses the importance of cadets adopting their national identity as professional value. The possibilities of humanitarian disciplines taught at military universities are revealed for the formation of the value attitude of cadets to national identity.

Key words: humanitarian disciplines, national identity, professional values, cadets.

Methodology for evaluating the performance of researchers in a research organization / V.I. Erokhin, A.P. Kadochnikov, M.K. Markina, S.V. Sotnikov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 379–387.

The article deals with the problems of evaluating the performance of research staff. To date, there is no single database of indicators that characterize the results of work of employees of a research organization. To solve this problem, a methodology for evaluating the performance of researchers was developed and described. The methodology includes the definition of performance indicators and their value, a specific list of tasks for each job category, and the minimum required set of indicators to pass the threshold level. The practical value of this method lies in its application when evaluating the results of research staff, as well as during certification. For the practical implementation of the method, the "Algorithm of actions for evaluating the performance (certification) of scientific employees of a research organization" was developed.

Key words: evaluation of the performance, research organization.

Inozemtseva L.A., Kuzhekin N.S. Psychological and pedagogical imperatives of formation of professional competence of a teacher of a military educational institution // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 388–393.

The publication deals with current problems of professional competence formation of the teaching staff and psychological and pedagogical requirements for the training of teaching staff of the Academy.

Key words: professional competence, psychological and pedagogical imperatives, pedagogical competencies, psychological competencies, professional retraining, advanced training, technological educational process.

Repyakh N.A., Hrustova A.N. «A new poetic philosophy» Vladimir Fedorovich Odoevsky as the foreigner of the philosophy of russian cosmism // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 675. – P. 394–399.

The article discusses the cosmophilosophical views of the Russian writer, scientist, philosopher of the XIX century V.F. Odoevsky, who had a significant impact on the formation of the literary and artistic direction in the philosophy of Russian cosmism.

Key words: cosmism, civilization, humanity, science, culture, scientific and technological progress.

Абашева Ирина Владимировна, адъюнкт 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-54, e-mail: 89117298491@mail.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.

Алексеев Антон Викторович, начальник 161-й лаборатории (научно-исследовательской) Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931) 250-27-02, e-mail: Alex___.@mail.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, e-mail: vfalex_vti@mail.ru

Андриевская Виктория Юрьевна, старший научный сотрудник 162-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (921) 635-46-61, e-mail: vika75_07@mail.ru

Басыров Александр Геннадьевич, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexanderbas@mail.ru

Белихин Евгений Николаевич, адъюнкт 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 731-58-80.

Белянин Дмитрий Геннадьевич, преподаватель 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 752-45-25, e-mail: vka@mil.ru

Благодыренко Евгений Васильевич, преподаватель 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-31, e-mail: vka@mil.ru

Болдырев Константин Борисович, доцент 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 997-75-95, e-mail: vka@mil.ru

Боцвин Сергей Александрович, заместитель начальника Главного управления кадров Министерства обороны Российской Федерации (191160, Россия, Москва, 1-й Хорошевский проезд, 3); тел.: 8 (495) 693-55-55.

Бучинский Дмитрий Игоревич, адъюнкт 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (926) 015-82-74.

Ванягин Владимир Евгеньевич, докторант Михайловской военной артиллерийской академии (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22); кандидат военных наук; e-mail: bobastik2008@yandex.ru

Ванягина Марина Романовна, профессор кафедры иностранных языков Санкт-Петербургского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации (198206, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Пилютова, 1); кандидат педагогических наук, доцент; e-mail: bobastik2008@yandex.ru

Васильев Алексей Сергеевич, заместитель начальника 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 180-52-63, e-mail: alserwas@yandex.ru

Вознюк Валерий Васильевич, доцент 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 299-75-78.

Гарковенко Артем Сергеевич, начальник Управления учета военнослужащих Главного управления кадров Министерства обороны Российской Федерации (191160, Россия, Москва, 1-й Хоросhevский проезд, 3); тел.: 8 (495) 693-51-13.

Гасюк Дмитрий Петрович, профессор кафедры боевого применения подразделений специального и технического обеспечения ракетных войск и артиллерии Михайловской военной артиллерийской академии (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 281-72-07, e-mail: cz_tipt@mail.ru

Герасименко Сергей Юрьевич, адъюнкт 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (953) 153-50-63, e-mail: vka@mil.ru

Голубев Михаил Александрович, доцент 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-62.

Гончаревский Вилен Степанович, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 347-53-16, e-mail: vilenstepan@yandex.ru

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

Грудинин Игорь Владимирович, профессор 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (981) 742-47-65, e-mail: giviniv@yandex.ru

Дегтярев Алексей Николаевич, начальник отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров Военной академии материально-технического обеспе-

чения (199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 090-26-45, e-mail: alex01102000@yandex.ru

Денисов Андрей Михайлович, докторант 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

Долгов Илья Игоревич, адъюнкт 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-36, e-mail: ilya.dolgov@rambler.ru

Дубовский Виталий Александрович, докторант Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (199034, Россия, Санкт-Петербург, набережная Макарова, 8); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 956-70-92, e-mail: dubovskiy@inbox.ru

Еремеев Михаил Алексеевич, профессор МИРЭА – Российского технологического университета (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, 20); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (499) 215-65-65, e-mail: mihailer@rambler.ru

Ерохин Владимир Иванович, старший научный сотрудник 512-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (961) 712-89-82, e-mail: erohin_v_i@mail.ru

Зиннуров Салават Халилович, начальник 212-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 (981) 781-71-29.

Ивановский Владимир Сергеевич, член-корреспондент РАН, начальник Военного инновационного Технополиса ЭРА Министерства обороны Российской Федерации (353456, Россия, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр., 28); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (495) 693-30-98.

Игнатчик Виктор Сергеевич, профессор Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 320-11-39, e-mail: ign73@yandex.ru

Игнатчик Светлана Юрьевна, профессор Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 744-26-02, e-mail: Ignatchik_SY@yandex.ru

Иноземцева Людмила Александровна, преподаватель 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 810-62-63, e-mail: lucilia@mail.ru

Кадочников Андрей Павлович, начальник 512-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 (981) 897-43-25, e-mail: kado162@mail.ru

Казанцев Денис Иванович, преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 216-39-29, e-mail: zilan.ka@yandex.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.

Калабин Павел Васильевич, адъюнкт 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

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 113-й лаборатории 11-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: mixeu@inbox.ru

Карчин Александр Юрьевич, старший преподаватель 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 374-03-00, e-mail: vka@mil.ru

Клепов Андрей Владимирович, доцент 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 347-97-35.

Ковалев Фёдор Евгеньевич, старший преподаватель 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-43.

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

Козлов Юрий Викторович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-94-59, e-mail: ukandco@mail.ru

Колесник Алексей Владимирович, докторант 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 940-65-57, e-mail: kolesnika@mail.ru

Копкин Евгений Вениаминович, профессор 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65.

Коробченко Игорь Павлович, начальник 3-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-30, e-mail: vka@mil.ru

Косырев Сергей Викторович, профессор 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-93, e-mail: kosyrev.sergey@yandex.ru

Кошель Игорь Николаевич, начальник 2-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-20, e-mail: kin1470@mail.ru

Краснощеков Сергей Николаевич, старший научный сотрудник 113-й лаборатории 11-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Криулин Артур Андреевич, доцент МИРЭА – Российского технологического университета (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, 20); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 215-65-65, e-mail: kriul@rambler.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 (812) 347-95-96.

Кузнецова Наталия Викторовна, ведущий инженер ООО «Ассоциация ученых и инженеров по водоснабжению и водоотведению» (196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Решетникова, 15, лит. А, пом. 58-Н, офис 411); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 993-83-52, e-mail: natalyakuznetsova.aviv@yandex.ru

Кукушкин Михаил Александрович, преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-94-59.

Кухтин Андрей Валентинович, начальник лаборатории 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

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.

Лебедев Михаил Юрьевич, адъюнкт 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93, e-mail: lebedev.m1hall@yandex.ru

Литвинова Наталья Борисовна, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: skarlet27@list.ru

Литинский Евгений Игоревич, старший научный сотрудник 262-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: litinskij1990@mail.ru

Макаренко Александр Анатольевич, старший научный сотрудник 26-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: alanmak@ya.ru

Маркина Мария Константиновна, младший научный сотрудник 614-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 983-65-57, e-mail: kravshenok@mail.ru

Масленников Сергей Александрович, начальник 7-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Махов Денис Сергеевич, докторант штатной очной докторантуры Краснодарского высшего военного училища имени генерала армии С.М. Штеменко (350063, Россия, Краснодар, ул. Красина, 4); кандидат технических наук; тел.: 8 (918) 310-83-10, e-mail: sinedvoham@mail.ru

Миргородский Александр Николаевич, старший преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: mirgorodsky@km.ru

Михеев Олег Юрьевич, заместитель начальника 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (921) 447-55-09.

Молдованова Светлана Михайловна, 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 (911) 908-00-76, e-mail: s.moldovanova@mail.ru

Нефедов Владимир Сергеевич, доцент МИРЭА – Российского технологического университета (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, 20); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 215-65-65, e-mail: neefed@rambler.ru

Новиков Евгений Александрович, начальник 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.

Ортиков Михаил Юрьевич, старший научный сотрудник 253-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 442-01-64, e-mail: mort1964@rambler.ru

Пальгуев Дмитрий Анатольевич, доцент кафедры радиотехники радиофизического факультета ФГАУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского» (603950, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (831) 462-32-72, e-mail: dmi-palguev@yandex.ru

Панкратов Алексей Владимирович, начальник 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-36, e-mail: pankratov-av@rambler.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, e-mail: pimvikf@yandex.ru

Пирогов Сергей Юрьевич, начальник 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-13, e-mail: kafedra17@rambler.ru

Поляков Сергей Александрович, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 720-84-18.

Попов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник 231-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (961) 806-26-58, e-mail: arahar@mail.ru

Попов Дмитрий Вячеславович, адъюнкт 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: 707dim@rambler.ru

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

Потерпеев Герман Юрьевич, доцент МИРЭА – Российского технологического университета (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, 20); кандидат технических наук; тел.: 8 (499) 215-65-65, e-mail: pointpro@yandex.ru

Рагимов Эльхан Агабек-оглы, старший научный сотрудник 162-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (921) 920-08-88, e-mail: elhan_rag@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

Розанова Людмила Владимировна, научный сотрудник 614-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-31.

Сальников Вадим Михайлович, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 397-96-43, e-mail: salnikov50@yandex.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

Саркисов Сергей Владимирович, начальник кафедры систем жизнеобеспечения Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 012-99-69, e-mail: ser-sark@yandex.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

Сенюкович Михаил Александрович, адъюнкт Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); тел.: 8 (921) 653-05-65, e-mail: senyukovich19@gmail.com

Силантьев Денис Сергеевич, старший эксперт 4-го отдела Военно-научного комитета Вооруженных Сил Российской Федерации (119160, Россия, Москва, Фрунзенская наб., 22/2); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 961-00-69, e-mail: denissila@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 (911) 951-16-32, e-mail: silantev2008@yandex.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

Соколов Дмитрий Александрович, преподаватель 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93, e-mail: falcon.85@bk.ru

Соловьев Игорь Александрович, старший научный сотрудник 341-й лаборатории 34-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии

имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

Соловьева Маргарита Владимировна, научный сотрудник 363-й лаборатории 36-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

Сотников Сергей Владимирович, старший научный сотрудник 511-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) 784-43-67, e-mail: svсотников66@gmail.com

Спирин Антон Павлович, преподаватель кафедры гуманитарных и социально-экономических дисциплин Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); тел.: 8 (904) 631-14-77, e-mail: Sap1410@mail.ru

Станиславичюс Римас-Бронюс Броняус, доцент 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: suvorof506@mail.ru

Стативка Василий Семёнович, профессор кафедры технического обеспечения Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (199034, Россия, Санкт-Петербург, набережная Макарова, 8); доктор военных наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ; тел.: 8 (911) 709-16-19, e-mail: vat @mil.ru

Степанова Елена Александровна, начальник лаборатории 16-го Центрального научно-исследовательского испытательного института Министерства обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А.И. Белова (141006, Россия, Московская обл., Мытищи, 1-й Рупасовский пер., 19); тел.: 8 (916) 710-94-88.

Суворов Александр Вячеславович, 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: suvorof506@mail.ru

Типаев Владимир Владимирович, начальник 14-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 (911) 278-27-39, e-mail: vka@mil.ru

Трофимова Наталья Андреевна, научный сотрудник 343-й лаборатории 34-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

Тупицин Юрий Евгеньевич, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: nordman14056@yandex.ru

Усвяцов Борис Михайлович, Администрация Санкт-Петербурга (191060, Россия, Санкт-Петербург, Смольный пр-д, 1); кандидат военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 576-41-11.

Финько Олег Анатольевич, профессор кафедры Краснодарского высшего военного училища имени генерала армии С.М. Штеменко (350063, Россия, Краснодар, ул. Красина, 4); советник Российской академии ракетных и артиллерийских наук (107564, Москва, 1-я Мясниковская ул., 3, стр. 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (988) 241-11-71, email: ofinko@yandex.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.com

Хватков Вадим Александрович, главный инспектор направления (организационно-планового) управления (организационно-планового и комплектования) Главного управления кадров Министерства обороны Российской Федерации (191160, Россия, Москва, 1-й Хорошевский проезд, 3); тел.: 8 (495) 693-51-13, e-mail: xvatkoff@mail.ru

Хрустова Алёна Николаевна, старший преподаватель 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 225-88-87, e-mail: yugani@rambler.ru

Чарушников Александр Валерьевич, начальник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (921) 912-92-85, e-mail: avchar@yandex.ru

Чернов Иван Владимирович, доцент 72-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: 4ern86@bk.ru

Чикуров Виталий Александрович, начальник 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: Chikurov69@bk.ru

Шаповалов Дмитрий Викторович, ВРИД заместителя 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

Шентябин Александр Николаевич, руководитель службы АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов имени М.А. Карцева» (117437, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 108); кандидат военных наук; тел.: 8 (495) 330-09-29, e-mail: ale1284@yandex.ru

Широбоков Владислав Владимирович, начальник 563-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 (981) 761-28-41, e-mail: 17126vlad@gmail.ru

Шишкин Евгений Вячеславович, докторант 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 397-96-43, e-mail: shishkin78@yandex.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 (962) 716-90-58, e-mail: valja1978@yandex.ru

Шульгин Альберт Николаевич, преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 720-32-34, e-mail: alex_grid69@mail.ru

Шушаков Алексей Олегович, заместитель начальника 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 013-85-25, e-mail: shushakovaleksei@mail.ru

Эльцофон Денис Александрович, курсовой офицер-преподаватель 4-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-43.

Эсаулов Константин Андреевич, старший преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-93-24, e-mail: home5263@yandex.ru

Яковлев Алексей Иванович, доцент 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: suvorof506@mail.ru

Якунин Владимир Иванович, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Яцечко Михаил Иванович, адъюнкт кафедры эксплуатации авиационного оборудования Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (394064, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а); тел.: 8 (910) 343-61-59, e-mail: yatsechko@list.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 217-03-39.

Алексеев Тимофей Владимирович, профессор 108-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор исторических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-04.

Алёшкин Андрей Петрович, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-31.

Басыров Александр Геннадьевич, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexanderbas@mail.ru

Башкирцев Виктор Павлович, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-23-57.

Гнидко Константин Олегович, профессор 65-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (999) 532-71-82, e-mail: ambers@list.ru

Доронин Александр Павлович, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: doronin52@mail.ru

Еремеев Игорь Юрьевич, профессор 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 238-06-62.

Захаров Иван Вячеславович, доцент 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 776-29-58, e-mail: x.vano-z80@yandex.ru

Карагодин Владимир Викторович, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 227-36-79, e-mail: vladimirkar@rambler.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

Крыжановский Владимир Иванович, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 310-66-37.

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

Летучий Юрий Александрович, старший научный сотрудник 32-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) 235-28-71, e-mail: vka.52@mail.ru

Лоскутов Андрей Иванович, начальник 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (904) 551-24-91, e-mail: rujenx@mail.ru

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: georgy_maltsev@mail.ru

Минаков Евгений Петрович, профессор 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 247-98-01, e-mail: ep.minakov12345@mail.ru

Назаров Андрей Вячеславович, начальник 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 262-85-39, e-mail: naz-av@mail.ru

Новиков Александр Валерьевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: salska@mail.ru

Новиков Евгений Александрович, начальник 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

Огородников Владимир Петрович, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор философских наук, профессор; тел.: 8 (951) 668-24-86; e-mail: ogo-vladimir@yandex.ru

Павлов Александр Николаевич, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: pavlov62@list.ru

Панкратов Алексей Владимирович, начальник 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 738-65-59, e-mail: vka36@inbox.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

Разумов Александр Владимирович, старший научный сотрудник 57-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) 237-10-21, e-mail: razumov.5555@bk.ru

Романченко Александр Михайлович, старший преподаватель 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук.

Садин Дмитрий Викторович, профессор 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 912-54-04, e-mail: sadin@yandex.ru

Салов Вячеслав Викторович, начальник 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент.

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.

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.

Хомоненко Анатолий Дмитриевич, профессор 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-24.

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

Чарушников Александр Валерьевич, начальник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-21.

Щербина Игорь Сергеевич, начальник 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-57.