

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

Выпуск 679

2021 г.

Издатель:

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

Редакционный совет

Председатель:

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

Члены редакционного совета:

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

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

Выпускающий редактор **А.В. Головина**
Технический редактор
и компьютерная верстка: *Е.Е. Лавриненко*
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. 08.12.2021.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 88,00. Уч.-изд. л. 43,50
Тираж 26 экз. Заказ 3941/91.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Авксентьев А.А., Динжос Р.И., Лизан В.М.* Методика терминального управления движением космического аппарата при межорбитальных перелетах с применением коррекции линии визирования 7
- Атамас А.С., Атарщиков А.Н., Кукушкин М.А.* Методический подход к выработке решения командиром в ходе управления мобильными организационно-техническими системами военного назначения в условиях динамически изменяющейся обстановки 16
- Власов В.А., Радионов Н.В., Яхваров Е.К.* Применение методов исследования операций для решения задач оценивания оптимальных объемов финансирования разработок космического вооружения и техники 27
- Захаров А.И., Зимовец А.И., Молодкин И.А., Неретина К.А., Хомоненко А.Д.* Повышение оперативности обработки информации в системе мониторинга космического пространства на основе технологии CUDA 38

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Альсаед С., Ефимов В.В.* Метод коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на основе нейросетевой аппроксимации погрешностей навигационных измерений 45
- Бурлаков С.О., Кузнецов С.С., Леванов Д.В., Цветков К.Ю., Шадрин А.Г.* Методика оценки коэффициента готовности радиолинии привязки летно-подъемного средства на маршруте полета 52
- Вознюк В.В., Галандзовский А.В., Комлык Д.А.* Вывод уточненного энергетического соотношения для радиоканалов с широкополосными сигналами 61
- Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Попов А.С.* Метод расширения зоны защиты полезного сигнала в адаптивных антенных решетках с подавлением помех по главному лепестку диаграммы направленности 70
- Куликов М.В., Сагалаев М.П.* Способы радиомаскировки местоположения земной станции спутниковой связи 81
- Лисицкий В.В., Панков Б.Б.* Методика контроля энергетических параметров информационно-измерительных систем реального времени 87

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алехин С.Г., Иванов Р.Д., Шемелов В.А.* Модель обучения интеллектуальной системы сбора и обработки метеорологической информации на борту беспилотных летательных аппаратов 94
- Жбанов К.К., Колесников Д.Д., Медяников Д.О., Сергеев Д.В.* Результаты определения цены деления отсчетных устройств гравиметров ГНУ-КВ на эталонном гравиметрическом полигоне 100

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Абашева И.В.* Модель структурно-семантических особенностей источников новостного текстового контента телекоммуникационных сетей с учетом особенностей лингвистической интерференции 106
- Абашева И.В., Алексеев В.Н., Жарков Д.А.* Тенденции усложнения способов защиты от «восстановления» паролей из хеш-кодов 115
- Афанасьев А.О., Пилькевич С.В.* Особенности восприятия текстового контента на веб-страницах 122
- Криулин А.А., Нефедов В.С., Потерпеев Г.Ю., Якунин В.И.* Подход к анализу вредоносного программного обеспечения с использованием мультиклассовой классификации 128
- Овчаров В.А., Соловьев И.А., Трофимова Н.А., Шинкаренко А.Ф.* Подход к профилированию поведения нарушителя на основе моделирования тактик, техник и процедур проведения компьютерных атак 137

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

- Абсалямов Д.Р., Сеньченков В.И.* Формирование множества контролируемых параметров специальных технических систем на основе теории ортогональных преобразований 149
- Арсеньев В.Н., Балугев С.Ю., Белихин Е.Н.* Методика идентификации параметров бортового оптико-электронного средства с центроидным алгоритмом обработки изображений точечных источников излучения 163
- Астанков А.М., Головчинская Н.В., Мироненков О.В.* Способы определения оптимального состава средств и методов неразрушающего контроля для диагностирования объектов наземной космической инфраструктуры 173
- Башилов А.И., Окороков М.В., Сухорученков Б.И.* Метод оценивания динамики показателей безотказности восстанавливаемых технических систем по результатам ограниченного периода отработки 185

<i>Ведерников М.В., Степанова К.А., Сырцов Л.А.</i> Моделирование теплообмена через радиопрозрачный купол	193
<i>Великий З.С., Шакмаев И.В.</i> Методика расчета удельного импульса тяги маршевой двигательной установки разгонного блока «Фрегат»	200
<i>Казанцев Д.И., Карытко А.А., Карытко Е.С.</i> Методика прогнозирования загрузки вычислительной системы на основе рекуррентной LSTM-сети со слоем внимания	210
<i>Козлов В.В., Лагун А.В., Сыров А.Д.</i> Решение задачи снижения деструктивного воздействия на элементы пускового устройства и стартового сооружения при старте ракеты-носителя	221
<i>Корбут В.А., Мищенко В.И., Новиков А.Н.</i> Модель формирования затрат на эксплуатацию радиоэлектронных средств ракетно-космической обороны	232
<i>Слатов В.Л., Соколова Т.В., Фарафонов А.В.</i> Создание специальной аппаратуры «Облик» малых космических аппаратов серии «Можаец»	243
ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК	
<i>Березин А.С., Мартышев А.Н., Федотов М.С., Шапошников А.А.</i> Использование средств гиревого спорта в силовой подготовке курсанта тылового ВУЗа как условие профессионального долголетия военного специалиста	250
<i>Васкевич В.М., Васкевич Н.В.</i> Интенсификация обучения инженерной графике в военном вузе на основе информационных компьютерных технологий ...	255
<i>Дулишкин Р.М., Инюшева Е.А., Касавцев М.Ю.</i> О результатах педагогического эксперимента по повышению уровня подготовленности курсантов академии к выполнению задач повседневной деятельности на основе применения обучающей программы для ЭВМ	260
<i>Ерофеев А.В., Кацик В.О.</i> Методический подход к формированию у курсантов устойчивых навыков в выполнении специальных обязанностей в нестандартных ситуациях	265
<i>Маркина М.К., Осипова И.В., Сахно И.В.</i> Особенности построения, применения и направления развития учебно-тренировочных средств образцов космических войск	271
<i>Сквазников М.А., Торшина И.П.</i> Принципы сохранения фундаментальности подготовки специалиста при разработке основных профессиональных образовательных программ	281

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

- Пауков А.Б.* Нормативное закрепление грубого дисциплинарного проступка как правовое средство обеспечения информационной безопасности военнослужащих 288
- Середенко В.М., Середенко Г.Е.* К вопросу обоснования психологических условий обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния заместителей командиров частей по военно-политической работе 292

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

- Григорьев К.Л., Козлов Ю.В., Пономарев Д.Ю.* Обоснование предложений по повышению качества планирования применения наземных технических средств при обеспечении управления орбитальной группировкой космических аппаратов 297
- Казахов Б.Д., Попов Д.М.* Методический подход к оцениванию потенциальных возможностей организационно-технических систем военного назначения по комплексному воздействию на противника 307
- Новиков В.А., Попов Д.М.* Методика обоснования рекомендаций по совершенствованию работы штаба при принятии решения и планировании применения воинских формирований 320
- Рефераты статей 328
- Сведения об авторах 338
- Сведения о рецензентах 347

А.А. Авксентьев,
кандидат технических наук, доцент;
Р.И. Динжос;
В.М. Лизан

МЕТОДИКА ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ МЕЖОРБИТАЛЬНЫХ ПЕРЕЛЕТАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОРРЕКЦИИ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ

Методика основывается на коррекции направления линии визирования, используемой при управлении движением космического аппарата по результатам прогнозов его конечного положения. Проведено сравнение качества управления космическим аппаратом с коррекцией и без коррекции направления линии визирования. Выполнены статистические расчеты с учетом динамики продольного и вращательного движения, использования в алгоритмах управления только бортовых параметров, влияния периодичности получения результатов измерений и их ошибок, ограничений на управляющие воздействия и нецентральности поля тяготения. Рассчитаны средние и максимальные ошибки при движении без коррекции и с коррекцией. Сделаны заключения о целесообразности применения и особенностях разработанной методики.

Ключевые слова: терминальное управление, космический аппарат (КА), математическое моделирование, линия визирования.

ВВЕДЕНИЕ

В практике космических полетов большое значение имеет точность достижения космическим аппаратом (КА) требуемых конечных условий. В данном исследовании рассматривается точность при автоматическом управлении движением КА. В этом случае она зависит не от навыков оператора, а от алгоритмов управления. Алгоритмы разрабатываются на основе методик, среди которых по влиянию регулируемых параметров на конечные промахи выделяются следующие:

1) *жесткого управления* [1, 2]. При таком управлении в полете отрабатываются заранее рассчитанные программы управления, содержащие значения выбранных параметров в соответствующие им моменты времени. Этими параметрами обычно являются углы ориентации вектора тяги и значения кажущейся скорости.

В полете программы не изменяются, даже если КА подвергается воздействию факторов, отличающихся от учтенных при подготовке программ. Действие возмущений приводит к отклонению от движения по заранее рассчитанной траектории. Поэтому жесткое управление обладает сравнительно низкой точностью достижения требуемых конечных условий и как несомненно проигрышное исключается из дальнейших сравнений;

2) *гибкого управления* [1, 3]. При указанном управлении в полете отрабатываются значения выбранных параметров, вычисляемых в зависимости от текущих параметров движения. Например, углы ориентации вектора тяги определяются с учетом текущего направления линии визирования (ЛВ) гипотетического или реального космического объекта (КО), к которому необходимо приблизиться. При управлении по линии визирования углы ориентации рассчитываются такими, что в результате воздействия тяги направление относительной скорости КА приближается к направлению ЛВ.

В условиях действия возмущений параметры движения КА и КО дополнительно изменяются, но, соответственно, меняется и направление ЛВ, а текущее направление движения КА, несмотря ни на что, приближается к требуемому. Поэтому гибкое управление обладает

большой точностью, чем жесткое, но все же не является управлением по прогнозируемому конечному промаху, который характеризует точность управления;

3) *терминального управления* [1, 4]. При котором управления после прохождения космическим аппаратом части траектории производится прогноз конечных значений параметров движения и рассчитывается вектор конечного промаха. Затем на оставшейся части траектории при каждом расчете направление ЛВ корректируется. Например, начальная точка ЛВ смещается на величину, обеспечивающую уменьшение прогнозируемого конечного промаха. Такое управление, как правило, превосходит гибкое по точности, поскольку уменьшает не текущий, а прогнозируемый конечный промах, величина которого характеризует точность достижения требуемых конечных условий.

При автоматическом управлении точность достижения конечных условий зависит от выбранной методики и разработанных на ее основе алгоритмов управления. Поэтому обоснованный выбор методики является актуальной задачей, решение которой способствует повышению точности управления движением КА.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Движение центров масс рассматриваемых объектов в соответствии с принципом суперпозиции и вторым законом Ньютона в инерциальной системе координат описывается уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\mathbf{V}_{КА}}{dt} = \mathbf{g}(\mathbf{R}_{КА}) + \mathbf{W}_{КА}; \\ \frac{d\mathbf{R}_{КА}}{dt} = \mathbf{V}_{КА}; \\ \frac{d\mathbf{V}_{КО}}{dt} = \mathbf{g}(\mathbf{R}_{КО}) + \mathbf{W}_{КО}; \\ \frac{d\mathbf{R}_{КО}}{dt} = \mathbf{V}_{КО}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\mathbf{V}_{КА}, \mathbf{V}_{КО}$ – векторы скоростей КА и КО;

$\mathbf{R}_{КА}, \mathbf{R}_{КО}$ – радиусы-векторы КА и КО;

$\mathbf{g}(\mathbf{R}_{КА}), \mathbf{g}(\mathbf{R}_{КО})$ – векторы гравитационных ускорений КА и КО, которые вычисляются в соответствии с выбранной моделью поля земного тяготения. В данном исследовании используется модель нормального поля земного тяготения [5].

$\mathbf{W}_{КА}, \mathbf{W}_{КО}$ – векторы ускорения от двигательных установок (ДУ) КА и КО соответственно. Возможны лишь следующие значения модулей ускорений: $|\mathbf{W}_{КА}| = W_{\max} \vee 0$ и $|\mathbf{W}_{КО}| = W_{\max} \vee 0$;

t – время.

Двигательные установки жестко связаны с корпусами КА и КО. Изменение направления тяги производится путем разворота КА или КО соответственно. Вращение каждого из активных объектов описывается динамическими уравнениями Эйлера [6]:

$$\begin{cases} J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y)\omega_y \omega_z = M_x; \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z)\omega_z \omega_x = M_y; \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x)\omega_x \omega_y = M_z, \end{cases} \quad (2)$$

где J_x, J_y, J_z – моменты инерции относительно осей связанной с объектом системы координат;

$\frac{d\omega_x}{dt}, \frac{d\omega_y}{dt}, \frac{d\omega_z}{dt}$ – проекции вектора вращательного ускорения на оси связанной системы координат;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции скорости вращения на связанные с объектом оси;

M_x, M_y, M_z – проекции вектора управляющего момента сил на оси связанной системы координат, причем

$$\begin{aligned} M_x &\in [-M_{x \max}, M_{x \max}], \\ M_y &\in [-M_{y \max}, M_{y \max}], \\ M_z &\in [-M_{z \max}, M_{z \max}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $M_{x \max}, M_{y \max}, M_{z \max}$ – модули максимальных моментов сил, развиваемых исполнительными органами.

Управление продольным движением производится с помощью алгоритмов, описанных в работе [7], и обеспечивает мягкое приближение параметров управляемого объекта к требуемым за минимальное время.

Управление вращательным движением описано в работе [8]. Оно обеспечивает оптимальный по быстродействию разворот оси ДУ управляемого объекта от текущего направления к требуемому по кратчайшему пути. При этом требуемое направление рассчитывается в результате работы алгоритма управления продольным движением.

Необходимо с учетом действия возмущений рассчитать средний $\Delta R_{\text{ксп}}$ и максимальный конечный промах $\Delta R_{\text{кmax}}$ при терминальном управлении движением КА по линии визирования. Кроме того, требуется определить расстояние от КА до космического объекта ΔR_n , на котором целесообразно начинать прогнозы и коррекции направления ЛВ.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Применение разработанной методики поясняет схема на рис. 1.

В блоке 1 задаются исходные данные, в числе которых все константы и начальные значения, необходимые для проведения расчетов в соответствии с уравнениями (1)–(3). Задаются также среднеквадратические отклонения (СКО) случайных ошибок измерений и характеристики систематических ошибок, не обнаруживаемых при калибровке приборов и не определяемых по заранее известным закономерностям. Если систематическая ошибка

обнаруживается при калибровке или может быть рассчитана с использованием известных закономерностей, то она учитывается и не приводит к ошибкам прогнозов. Кроме того, задается периодичность получения измерительной информации.

В блоке 2 проверяется условие прогнозирования конечных параметров движения. В таком случае

$$\Delta R \leq \Delta R_n \cap i_n = 0,$$

где ΔR – расстояние от КА до КО,

ΔR_n – расстояние от КА до КО, на котором начинаются прогнозы,

i_n – индикатор прогнозов с начальным значением $i_n = 0$,

Тогда конечные параметры движения прогнозируются, и управление передается в блок 3.

В блоке 3 проверяется условие запоминания значений параметров на момент начала прогнозов. Если индикатор запоминания i_z имеет значение 0, то начинается работа блока 4.

В блоке 4 запоминаются значения всех параметров, которые потребуются для возвращения процесса в состояние на момент начала прогнозов. Индикатору i_z присваивается значение 1 и производится переход к действиям, указанным в блоке 5.

В блоке 5 обнуляются СКО всех случайных величин, которые могли бы повлиять на результаты прогнозов. Поскольку при прогнозах случайные составляющие не известны, случайные величины заменяются своими математическими ожиданиями. Затем выполняются действия, входящие в блок 6.

В блоке 6 моделируется расчет направления линии визирования с учетом СКО и периодичности поступления параметров от источников измерительной информации. При прогнозах используются нулевые значения СКО, а при моделировании полета – присущие источникам информации ненулевые значения. Источниками информации являются наземные измерители, бортовая навигационная аппаратура потребителя, акселерометры, датчики угловых скоростей и бортовые камеры наблюдения. Во время расчета направления линии визирования учитываются смещения координат ее начальной точки на dx, dy и dz . До прогнозов смещения имеют нулевые значения, а после них – лучшие по прогнозируемому промаху. В блоке 6 производятся расчеты бортовых значений координат и скоростей исследуемых объектов, направления линии визирования, вектора скорости вращения и направления оси ДУ КА. Затем начинаются расчеты, входящие в следующий по номеру блок.

В блоке 7 рассчитываются управляющие воздействия. С помощью алгоритма, изложенного в работе [8], рассчитываются моменты сил M_x, M_y, M_z , обеспечивающие оптимальный по быстродействию разворот оси ДУ от текущего до требуемого направления. При этом требуемое направление оси вычисляется в результате работы алгоритма управления движением центра масс [7]. Разница между текущим и требуемым направлениями оси ДУ определяет выбор режима работы $R_{ДУ}$ двигательной установки.

По результатам предыдущих исследований [9] принято, что при разнице $>6^\circ$ ДУ включать нецелесообразно. В этом случае $R_{ДУ}$ присваивается значение 0 и ось ДУ начинает разворот. При достижении углом между текущим и требуемым направлениями оси двигательной установки величины $\leq 6^\circ$ присваивается значение $R_{ДУ} = 1$ и моделируется движение с включенной ДУ.

В блоке 8 с помощью численного интегрирования рассчитываются истинные (ИП) и бортовые параметры (БП) КА и КО на шаг вперед. Поскольку отдельный пошаговый расчет ИП или БП является новым, рассмотрим его этапы более подробно.

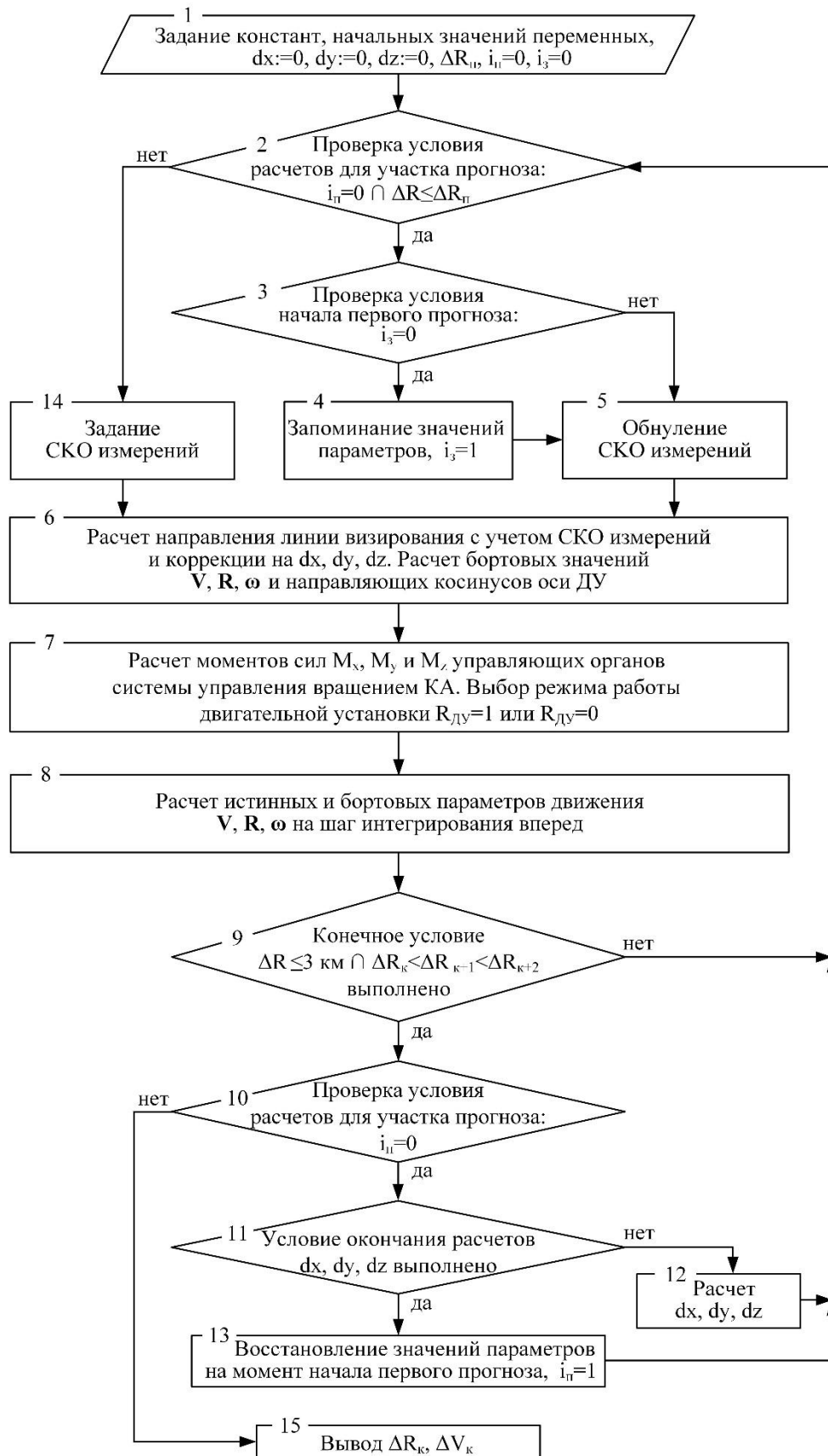


Рис. 1. Схема методики терминального управления движением КА с применением коррекции направления ЛВ

Истинные параметры – это точные значения параметров, которые по объективным причинам не могут использоваться для расчетов управляющих воздействий. Они не известны на борту объекта, но именно на них реагируют измерительные приборы. С неточностями и задержками ИП преобразуются в измеренные параметры, которые служат для получения и коррекции БП.

Истинные параметры отличаются от бортовых не только численными значениями. ИП меняются по законам физики и не могут изменяться по алгоритмам разработчика. В отличие от истинных параметров БП могут скачкообразно корректироваться.

Соответствующие друг другу ИП и БП имеют не только отличия, но и похожие черты. В промежутках между коррекциями соответствующие друг другу ИП и БП изменяются по одинаковым законам. В данном случае – по законам, описываемым уравнениями (1)–(3).

Раздельное пошаговое интегрирование ИП или БП предполагает использование сравнительно большого числа переменных. Например, движение КА моделируется с учетом применения на борту КА четырех массивов значений:

- ИП движения КА. Эти параметры применяются для моделирования работы измерительных приборов и расчетов истинных промахов;
- ИП движения КО. Используются для моделирования работы камеры наблюдения за космическим объектом с борта КА и расчетов истинных промахов;
- БП движения КА. Применяются на борту КА для вычисления управляющих воздействий, прикладываемых к КА;
- БП движения КО. Тоже используются на борту КА для вычисления управляющих воздействий, прикладываемых к КА.

Альтернативным по отношению к раздельному расчету является традиционный расчет без раздельного интегрирования ИП и БП. Моделирование с применением такого расчета в меньшей степени соответствует реальному процессу и является менее точным. При моделировании движения без раздельного интегрирования истинных и бортовых параметров снижается точность расчетов и повышается вероятность появления ошибочных выводов.

В блоке 9 проверяется выполнение конечного условия

$$\Delta R \leq 3 \text{ км} \cap \Delta R_k < \Delta R_{k+1} < \Delta R_{k+2}, \quad (4)$$

где $\Delta R_k, \Delta R_{k+1}, \Delta R_{k+2}$ – значения ΔR на трех последних шагах интегрирования. При этом условие (4) поясняет рис. 2.

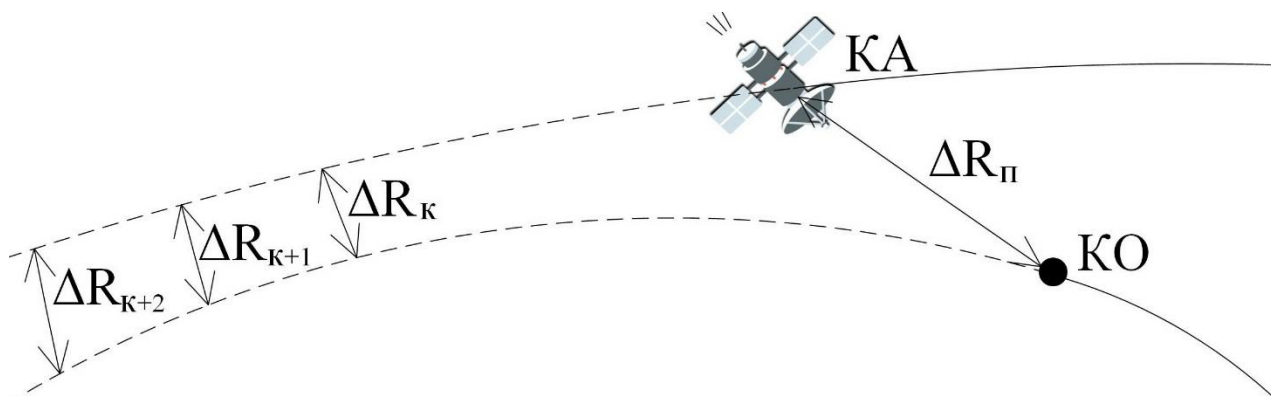


Рис. 2. Прогноз и проверка выполнения конечного условия

Пока (4) не выполняется, нельзя сказать, что КА систематически удаляется от КО и действия, указанные в блоках 2–9, повторяются. Если же условие (4) выполняется, то, как подтверждает моделирование, происходит устойчивое определение момента достижения минимального расстояния от КА до КО даже в условиях действия возмущений. В этом случае начинается работа блока 10.

Если $i_n = 0$, то полученное ΔR_k относится к числу прогнозируемых значений, и после работы блока 10 начинается работа блока 11.

В блоке 11 проверяется условие окончания расчетов смещений dx, dy и dz . Одним из возможных путей расчета является направленный перебор значений dx, dy, dz с уменьшаемым шагом. При его использовании сначала в окрестности начальных значений с шагом, например 1 м, находятся лучшие с точки зрения конечного промаха dx, dy и dz . Затем найденные значения уточняются для меньшего шага. Потом – для еще меньшего и т. д. Условием окончания расчетов является, например значение шага 1 см, для которого рассчитаны смещения, приводящие к минимальному ΔR_k .

В блоке 11 величина шага сравнивается с принятым конечным значением. Если шаг больше 1 см, то условие окончания не является выполненным и в блоке 12 задаются следующие по логике направленных переборов значения dx, dy, dz . Для них в блоках 2–9 рассчитывается соответствующее ΔR_k .

Если условие блока 11 выполняется, то затем в блоке 13 восстанавливаются значения, которые были сохранены в блоке 4. Кроме того, присваивается значение $i_n = 1$, после чего условие блока 2 перестает выполняться. Тогда в блоках 2, 14, 6–9 для полета в условиях действия возмущений рассчитываются значения конечного промаха ΔR_k и относительной скорости ΔV_k в момент достижения ΔR_k , которые выводятся в блоке 15 как результаты применения разработанной методики.

РАСЧЕТЫ ПО РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКЕ

Расчеты проведены для следующих условий и значений:

- на КА установлен комплект навигационной аппаратуры, позволяющий измерять координаты и скорости с СКО 10 м и 2 см/с соответственно. Измерения проводятся с периодичностью 0,1 с;
- тяга двигательной установки КА имеет перекося 2°, направленный в сторону поперечной связанной оси ou ;
- эксцентриситет тяги ДУ КА приводит к возмущающим моментам 0,01 Нм по поперечной связанной оси ou ;
- кажущееся ускорение измеряется с систематической не обнаруживаемой при калибровке ошибкой $1,0 \cdot 10^{-4}$ м/с² по связанной оси ox и с систематическими ошибками $1,0 \cdot 10^{-5}$ м/с² по остальным связанным осям. Случайные составляющие ошибок имеют СКО $9,8 \cdot 10^{-4}$ м/с² по каждой из связанных осей;
- скорость вращения КА измеряется с систематическими не обнаруживаемыми при калибровке датчиков ошибками измерений $5,0 \cdot 10^{-4}$ рад/с и со случайными составляющими, имеющими СКО $4,8 \cdot 10^{-8}$ рад/с, по каждой из связанных осей;
- с периодичностью 25 с без существенных ошибок определяется ориентация КА;
- каждую секунду при расстоянии от КА до КО менее 30 км с СКО равным 1 угловой минуте на фоне других объектов выделяется КО;
- с помощью наземных средств с СКО 10 м по расстоянию и 2 см/с по скорости измеряются координаты и скорости КО. Периодичность измерений равна 1 с;
- параметры движения исследуемых объектов соответствуют параметрам движения в окрестности геостационарной орбиты.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конечные промахи по расстоянию

ΔR_{Π} , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\Delta R_{\text{ксп}}$, м	4,8	4,9	5,5	5,5	5,2	4,8	4,7	4,9	4,2	4,0	3,9	3,6	3,6	3,5	3,4	4,0	3,3
$\Delta R_{\text{кmax}}$, м	8,4	8,0	10,1	10,2	10,1	14,6	8,2	8,7	7,9	8,0	9,8	8,0	11,2	13,9	10,2	14,8	9,8
ΔR_{Π} , м	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$\Delta R_{\text{ксп}}$, м	3,3	3,1	3,2	3,3	3,2	3,3	3,4	3,2	3,3	3,2	3,4	3,4	3,2	3,4	3,6	3,5	3,5
$\Delta R_{\text{кmax}}$, м	8,7	8,8	9,8	8,3	7,9	7,8	7,3	6,6	7,7	6,6	6,9	7,5	7,0	7,4	8,0	7,8	7,6
ΔR_{Π} , м	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$\Delta R_{\text{ксп}}$, м	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,6	3,5	3,7	3,7	3,7	3,5	3,6	3,7	3,6	3,6	3,7
$\Delta R_{\text{кmax}}$, м	7,3	6,5	6,6	7,2	8,1	8,5	8,2	7,0	6,8	5,9	6,9	7,4	6,6	7,3	6,2	7,4	7,3

В первой строке табл. 1 указано расстояние ΔR_{Π} в метрах, на котором проводились прогнозы и вычислялась величина коррекции ЛВ. С учетом рассчитанной величины коррекции, вводимой на оставшемся участке полета, вычислялся конечный промах $\Delta R_{\text{к}}$. Для каждого ΔR_{Π} проведено 300 расчетов конечных промахов, из которых рассчитывался средний $\Delta R_{\text{ксп}}$ и выбирался максимальный промах $\Delta R_{\text{кmax}}$. Средний и максимальный промахи представлены во второй и третьей строках табл. 1.

Расстоянию $\Delta R_{\Pi} = 0$ соответствует вариант движения без коррекции. В этом случае средний промах составил 4,8 м, а максимальный – 8,4 м.

Для расстояния $\Delta R_{\Pi} = 26$ м, начиная с которого линия визирования корректируется по разработанной методике, средний и максимальный промахи составили 3,2 и 6,6 м соответственно.

Кроме промаха по расстоянию рассчитывался промах по скорости, определяемый в момент достижения $\Delta R_{\text{к}}$. Для $\Delta R_{\Pi} = 26$ м средний и максимальный промахи по скорости составили 0,09 и 0,36 м/с соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и программно реализована методика терминального управления движением КА при межорбитальных перелетах с применением коррекции линии визирования, позволяющая проводить расчеты с учетом:

- систематических и случайных ошибок измерительных средств, а также периодичности поступающих от них информации;
- эксцентриситета и перекаса тяги ДУ, а также ограничений величины управляющих воздействий, прикладываемых исполнительными органами к космическому аппарату;
- использования в алгоритмах управления только бортовых параметров, отличающихся от истинных на величины ошибок;
- инерционности продольного и вращательного движения;
- влияния нецентрального поля тяготения на движение исследуемых объектов.

В результате исследований:

- рассчитаны величины среднего и максимального промахов при коррекции линии визирования по разработанной методике;

– проведен обоснованный выбор относительного расстояния, начиная с которого следует корректировать бортовую линию визирования.

Моделирование показало, что в рассмотренном примере средний промах уменьшился с 4,8 м при отсутствии коррекций до 3,2 м при коррекции бортовой линии визирования. Максимальный промах уменьшился с 8,4 до 6,6 м соответственно (см. табл. 1). Разработанная методика позволяет повысить точность управления движением центра масс космического аппарата.

Список используемых источников

1. *Лапшин Ю.В.* Системы управления ракет-носителей и космических аппаратов: курс лекций. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – 158 с.
2. *Легостаев В.П.* Инерциальная система управления. – 2020. – URL: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/2011368 (дата обращения: 14.01.2021).
3. *Аранович Г.П., Михайлин Д.А.* Управление и наведение самолетов и ракет: научно-популярный материал. – М.: МАИ, 2013. – 27 с.
4. Системы управления ракет-носителей. – 2020. – URL: <https://allrefrs.ru/5-22216.html> (дата обращения: 14.01.2021).
5. *Власов С.А., Мамон П.А.* Теория полета космических аппаратов: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 435 с.
6. *Бутенин Н.В., Луниц Я.Р., Меркин Д.Р.* Курс теоретической механики: в 2 т. – М.: Наука, 1979. – Т. 2. – 544 с.
7. *Авксентьев А.А.* Управление движением центра масс космического аппарата при мягком сближении с орбитальным объектом на участке ближнего наведения // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 5. – С. 364–369.
8. *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.
9. *Авксентьев А.А., Котьяшов Е.В.* Результативность сближения космического аппарата с пассивным объектом в условиях действия случайных возмущений // Труды XXXII Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», 27–28 июня 2013 г. – Серпухов: филиал ВА РВСН им. Петра Великого, 2013. – С. 18–24.

А.С. Атамас;
А.Н. Атарщиков,
кандидат военных наук;
М.А. Кукушкин,
кандидат военных наук

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫРАБОТКЕ РЕШЕНИЯ КОМАНДИРОМ В ХОДЕ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ОБСТАНОВКИ

Предлагается методический подход к принятию решения командиром в ходе управления мобильными организационно-техническими системами военного назначения [ОТС (М)] в условиях динамически изменяющейся обстановки, с учетом состояния дорожной сети, рельефа местности, а также одновременно воздействующих средств оптико-электронной и радиолокационной разведки противника на маршруте движения и средств радиотехнической разведки противника, при работе ОТС (М) на излучение.

Применение методического подхода, разработанного авторами на основе оперативно получаемой информации об изменении окружающей обстановки, позволяет в кратчайшие сроки подготовить предложения в решение командира с целью повышения живучести ОТС (М).

Ключевые слова: выработка решения командиром, мобильные организационно-технические системы военного назначения, повышение живучести, динамически изменяющаяся обстановка.

ВВЕДЕНИЕ

В современных военных конфликтах все чаще используется оружие, которое способно поражать цели с высокой точностью на большие расстояния и за короткий промежуток времени после обнаружения цели. В связи с появлением таких ударных комплексов широкое распространение получили организационно-технические системы военного назначения в мобильном исполнении, которые для повышения своей живучести должны своевременно совершать маневрирование для смены рабочей позиции.

В качестве мобильных организационно-технических систем военного назначения ОТС (М) в данной статье будем рассматривать:

- модули полевых подвижных пунктов управления и узлов связи;
- подвижные наземные командно-измерительные пункты, осуществляющие управление орбитальными группировками космических аппаратов [1].

В работе [2] учитывались области маскировки мобильных объектов только от космических систем оптико-электронного наблюдения разведки противника. В работе [3] рассмотрены способы скрытия мобильного объекта от радиолокационного наблюдения из космоса. Однако в существующих научно-методических подходах [4–10] по управлению мобильными организационно-техническими системами военного назначения не в полной мере учитываются в ходе передвижения ОТС (М) в условиях динамически изменяющейся обстановки одновременно следующие параметры:

- возможности космических систем оптико-электронной разведки противника на маршруте движения ОТС (М);
- возможности космических систем радиолокационной разведки противника на маршруте движения ОТС (М);
- возможности космических систем радиотехнической разведки противника по обнаружению ОТС (М) при работе на излучение на рабочей позиции;

- возможности перемещения ОТС (М) по маршруту движения, исходя из состояния дорожной сети и рельефа местности;
- необходимое время нахождения ОТС (М) на рабочей позиции для выполнения задач по предназначению;
- допустимое время перемещения ОТС (М) по участкам дорожной сети, исходя из возможностей космических систем оптико-электронного и радиолокационного наблюдения разведки противника на маршруте движения ОТС (М).

Если учесть данные параметры в отношении процесса подготовки и принятия решения командиром на применение ОТС (М), то необходимо пересмотреть алгоритм оперативного управления ОТС (М). Для этого следует:

- разработать математическую модель уровней опасности на местности, позволяющую вычислить их значения, исходя из возможностей средств разведки противника;
- оперативно оценивать необходимость совершения очередного маневра с целью повышения живучести ОТС (М);
- осуществить программную реализацию алгоритмов моделирования нештатных ситуаций на основе анализа оценки обстановки в районе применения ОТС (М), с целью сокращения времени на подготовку и принятие решения командиром. Для этого необходим новый методический подход к выработке решения командиром в ходе управления ОТС (М) в условиях динамически изменяющейся обстановки, который в себя должен включать:
 - модель выхода ОТС (М) на рабочие позиции [11–14];
 - методику определения интервалов времени функционирования оптико-электронных и радиолокационных средств разведки противника на маршруте движения ОТС (М) [11–14];
 - методику определения интервалов времени функционирования радиотехнических средств разведки противника, в районе выполнения задач (на рабочих позициях) [11–14];
 - методику маскировки ОТС (М) от оптико-электронных, радиолокационных и радиотехнических средств разведки противника [15–23];
 - методику выбора рационального варианта применения ОТС (М) в различных условиях обстановки;
 - методику оценивания времени движения ОТС (М) [11–14].

В рамках данной статьи рассматривается вопрос разработки методики выбора рационального варианта применения ОТС (М) в различных условиях обстановки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Формализацию подхода к разработке методики к выработке решения командиром в ходе управления ОТС (М) в условиях динамически изменяющейся обстановки предлагается выполнить следующим образом.

Дано:

1. Требования к функционированию ОТС (М) в районе применения:

по оперативности выхода ОТС (М) на рабочую позицию (РП) –

$$T^{\text{РП}} \leq T^{\text{ТР}};$$

по ресурсоемкости – по количеству ОТС (М), выполняющих задачи по предназначению –

$$N^{\text{ОТС (М)}} \leq N^{\text{ТР}};$$

по живучести ОТС (М) на марше –

$$P_{\text{марш}}^{\text{ОТС (М)}} \geq P_{\text{марш}}^{\text{ТР}},$$

где $P_{\text{марш}}^{\text{ОТС (М)}}$ – живучесть ОТС (М) на марше;

$P_{\text{марш}}^{\text{ТР}}$ – требуемая живучесть ОТС (М) на марше;

по живучести ОТС (М) на РП –

$$P_{\text{РП}}^{\text{ОТС (М)}} \geq P_{\text{РП}}^{\text{ТР}},$$

где $P_{\text{РП}}^{\text{ОТС (М)}}$ – живучесть ОТС (М) на рабочей позиции;

$P_{\text{РП}}^{\text{ТР}}$ – требуемая живучесть ОТС (М) на рабочей позиции.

2. Множество ОТС (М), выполняющих задачи по предназначению:

$$N^{\text{ОТС (М)}} = \{n_z^{\text{ОТС (М)}}, \quad z = \overline{1, Z}\},$$

где z – количество ОТС (М), задействованных в каждом районе выполнения задач.

3. Объект «дорожная сеть» в районе применения ОТС (М): $H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$, представляющая собой систему автомобильных и грунтовых дорог, а также искусственные дорожные сооружения (зимники, мосты, переправы по льду, путепроводы, трубопроводы, тоннели, эстакады, подобные сооружения), где H_1, H_2, \dots, H_n – участки автомобильных или грунтовых дорог.

4. Интервалы времени функционирования космических средств разведки противника [11–14]:

Δt_{δ_1} – интервалы времени функционирования оптико-электронных средств разведки противника на маршруте движения ОТС (М);

Δt_{δ_2} – интервалы времени функционирования радиолокационных средств разведки противника, на маршруте движения ОТС (М);

Δt_{δ_3} – интервалы времени функционирования радиотехнических средств разведки противника, в районе выполнения задач (на рабочих позициях).

5. Времена выхода на рабочие позиции: $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{i(z-1)}$, где t_{i1} – время выхода i -го ОТС (М) для выполнения задач по предназначению в заданном интервале времени [11–14].

6. Интервалы времени между обнаружением ОТС (М) средствами разведки противника и нанесением удара [11–14]:

$$\Delta \tau_m = [t_m^{\text{H}}, t_m^{\text{K}}], \quad m = \overline{1, M}. \quad (1)$$

7. Варианты выхода ОТС (М) на рабочую позицию [11–14]:

$$W = \left\{ \tilde{w} = \langle w_1, w_2 \rangle \left| \begin{array}{l} w_1 \in W_1 \\ w_2 \in W_2 \end{array} \right. \right\}, \quad (2)$$

где W_1 – варианты последовательного выхода на РП одним ОТС (М);

W_2 – варианты параллельного выхода на РП несколькими ОТС (М).

8. Варианты выхода ОТС (М) с рабочей позиции с целью повышения живучести [11–14]:

$$\Psi = \left\{ \tilde{\psi} = \langle \psi_1, \psi_2 \rangle \left| \begin{array}{l} \psi_1 \in \Psi_1 \\ \psi_2 \in \Psi_2 \end{array} \right. \right\}, \quad (3)$$

где Ψ_1 – варианты заблаговременного выхода из зоны поражения, при условии успешного выполнения задачи по предназначению ОТС (М);

Ψ_2 – варианты выхода из зоны поражения, непосредственно после обнаружения средствами разведки противника.

9. Варианты маскировки ОТС (М) от космических средств разведки противника [15–23]:

$$\acute{O} = \left\{ \tilde{\acute{o}} = \langle \acute{o}_1, \acute{o}_2, \acute{o}_3 \rangle \left| \begin{array}{l} \acute{o}_1 \in \acute{O}_1 \\ \acute{o}_2 \in \acute{O}_2 \\ \acute{o}_3 \in \acute{O}_3 \end{array} \right. \right\}, \quad (4)$$

- где \acute{o}_1 – варианты маскировки ОТС (М) от оптико-электронных средств разведки противника;
 \acute{o}_2 – варианты маскировки ОТС (М) от радиолокационных средств разведки противника;
 \acute{o}_3 – варианты маскировки ОТС (М) от радиотехнических средств разведки противника.

Варианты маскировки ОТС (М) от оптико-электронных средств разведки противника представляют собой \acute{o}_1 :

- использование естественных масок, видовых свойств местности, местных предметов, ночи, тумана, облачности – \acute{o}_1^1 [15];
- маскировку растительностью – \acute{o}_1^2 [15];
- применение искусственных аэрозольных образований – \acute{o}_1^3 [15];
- придание объектам маскирующих форм – \acute{o}_1^4 [16];
- уменьшение разности излучения объекта и фона – \acute{o}_1^5 [16];
- изменение параметров излучения и формы объекта – \acute{o}_1^6 [16];
- изменение состава и взаимного расположения объектов – \acute{o}_1^7 [17].

Варианты маскировки ОТС (М) от радиолокационных средств разведки противника представляют собой \acute{o}_2 :

- использование радиолокационных отражателей – \acute{o}_2^1 [18];
- использование радиорассеивающих и радиопоглощающих покрытий – \acute{o}_2^2 [18];
- снижение радиолокационного контраста объектов – \acute{o}_2^3 [18];
- использование противорадиолокационной маскировки объектов плазменными образованиями – \acute{o}_2^4 [19];
- применение ложных целей – \acute{o}_2^5 [19];
- комплексное применение методов противорадиолокационной маскировки – \acute{o}_2^6 [19];
- управление рассеянием радиоволн – \acute{o}_2^7 [19].

Варианты маскировки ОТС (М) радиотехнических средств разведки противника представляют собой \acute{o}_3 :

- ограничение или запрещение работы радио и радиоэлектронных средств – \acute{o}_3^1 [20];
- уменьшение мощности излучений радиостанций – \acute{o}_3^2 [20];
- применение антенн направленного действия, использование экранирующих и отражающих свойств местности и местных предметов – \acute{o}_3^3 [21];
- своевременное устранение характерных признаков в работе радиосредств, обусловленных неисправностью радиопередающих устройств, линий дистанционного управления ими и оконечной аппаратуры – \acute{o}_3^4 [22];
- сокращение до минимума времени работы радиосредств на излучение – \acute{o}_3^5 [23].

Требуется построить множество допустимых вариантов применения ОТС (М) для выполнения задач по предназначению, исходя из сложившейся обстановки в районе применения ОТС (М):

$$\Omega = \{\omega_k | k = \overline{1, K}\}, \quad (5)$$

где $\omega_k = \langle n_2^{\text{ОТС (М)}}, \overline{E_{ik}}, \overline{H_{ik}}, [t_{ik}, t_{jk}], [t_{jk}, t_{ik+1}], \widetilde{w}_k, \widetilde{\Psi}_k, \widetilde{\acute{o}}_k \rangle$; $\widetilde{w}_k \in W$, $\widetilde{\Psi}_k \in \Psi$, $\widetilde{\acute{o}}_k \in \acute{O}$.

Для обеспечения высокого качества выработанного решения командиром в ходе оперативного управления ОТС (М) в условиях динамически меняющейся обстановки необходимо найти рациональный вариант применения ОТС (М), удовлетворяющий следующим критериям:

$$P_{(\omega_k)} \geq P_{\text{тр}}; \quad (6)$$

$$R_*^{\text{ОТС (М)}} \leq R_{\text{тр}}^{\text{ОТС (М)}}; \quad (7)$$

$$T_*^{\text{РП}} \leq T_{\text{тр}}^{\text{РП}}.$$

МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ОБСТАНОВКИ

При разработке методики необходимо принять следующие допущения:

- 1) ОТС (М) перемещаются только по дорожной сети в районе применения;
- 2) в случае обнаружения ОТС (М) разведкой противника, он будет поражен через интервал времени Δt_m с вероятностью 1.

Для решения поставленных в статье задач необходимо решить ряд частных задач:

формирование исходных данных;

анализ исходных данных;

формирование динамического пространства уровней опасности в районе выполнения задач;

формирование маршрутов (таблиц маршрутов) передвижения ОТС (М) в другие районы выполнения задач;

моделирование предлагаемых вариантов безопасного размещения ОТС (М) и оценку этих вариантов решений.

Методика выбора рационального варианта применения мобильных организационно-технических систем военного назначения в различных условиях обстановки представлена на рис. 1.

На *первом этапе* реализации методики осуществляется ввод множества исходных данных. Далее решаются задачи по формированию допустимых графов дорожной сети в районе применения ОТС (М) – $(G_1 = E_1, H_1), (G_2 = E_2, H_2), \dots (G_z = E_z, H_z)$, исходя из состояния дорожной сети в заданных интервалах времени $[t_{i1}, t_{j1}], [t_{i2}, t_{j2}], \dots [t_{iz}, t_{jz}]$. При этом используются следующие множества:

$\{E_{i1}\}, \{E_{i2}\}, \dots, \{E_{im}\}$ – множество потенциальных рабочих позиций (возможных мест размещения ОТС (М)) ($m = \overline{1, M}$ – количество потенциальных рабочих позиций в i -м районе выполнения задач), на которых ОТС (М) выполняют задачи по предназначению в заданные интервалы времени;

$\{H_{i1}\}, \{H_{i2}\}, \dots, \{H_{in}\}$ – множество элементов «дорожная сеть» ($n = \overline{1, N}$ – количество элементов «дорожная сеть»), соединяющих рабочие позиции $\{E_1\}, \{E_2\}, \dots, \{E_m\}$ в i -м районе выполнения задач.

Затем решается задача по определению границы районов выполнения задач по предназначению в районе выполнения задач (РВЗ) и в районе применения ОТС (М) в заданных интервалах времени $[t_{i1}, t_{j1}], [t_{i2}, t_{j2}], \dots [t_{iz}, t_{jz}]$, которые зависят от поставленных задач, где $z = \overline{1, Z}$ – количество РВЗ, а время выхода ОТС (М) на рабочие позиции – $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{i(z-1)}$.

Потом решается задача по формированию матрицы значений уровней опасности для каждой потенциальной рабочей позиции $A_1 = \{E_{i1}\}, A_2 = \{E_{i2}\}, \dots, A_m = \{E_{im}\}$ во всех РВЗ – $z = \overline{1, Z}$, где применяются ОТС (М) по предназначению и осуществляется ранжирование по возрастанию уровней опасности в различных РВЗ. При этом необходимо задать допустимые уровни опасности для рабочей позиции в различных РВЗ $\{E_{i1}\}, \{E_{i2}\}, \dots, \{E_{im}\}$ – $\langle A_{1i}^{\text{доп}}, A_{2i}^{\text{доп}}, \dots, A_{mi}^{\text{доп}} \rangle$ в соответствии с классификацией значений уровней опасностей в точках координат местности, где 1-й класс опасности – «Опасно» при интервале значений (от

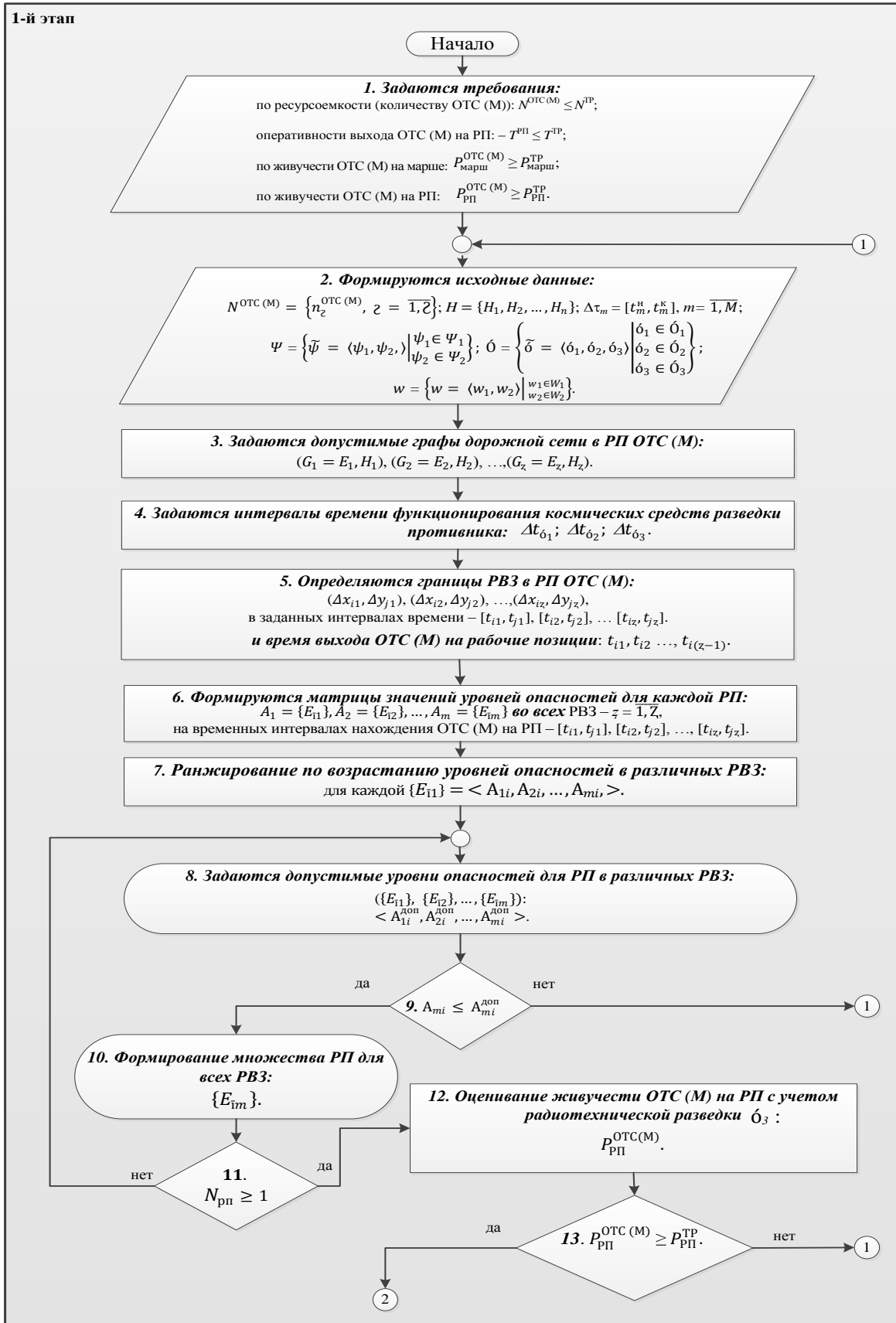


Рис. 1. Методика выбора рационального варианта применения мобильных организационно-технических систем военного назначения в различных условиях обстановки (начало)

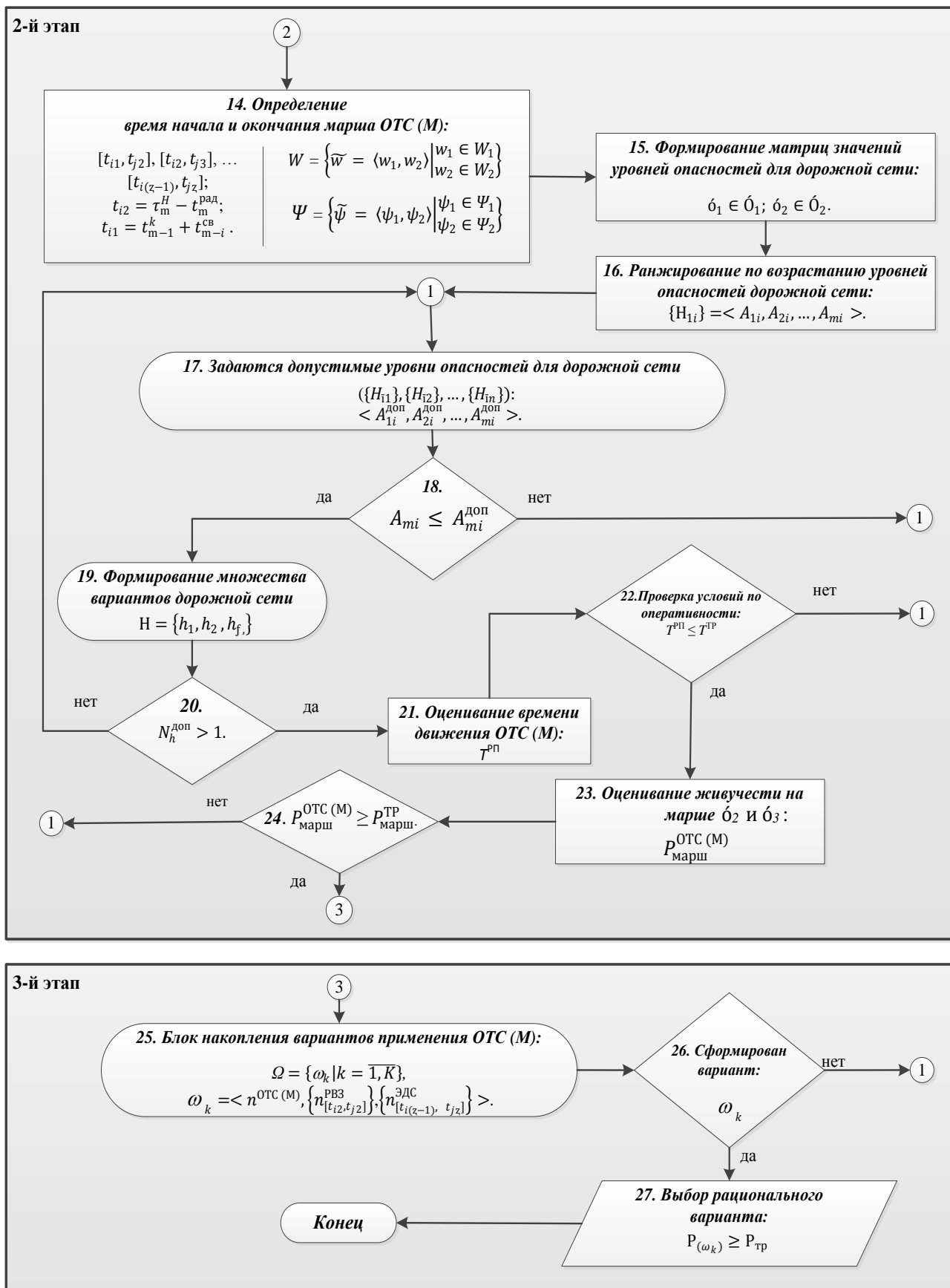


Рис. 1. Методика выбора рационального варианта применения мобильных организационно-технических систем военного назначения в различных условиях обстановки (окончание)

1 до 0,8); 2-й класс опасности – «Предельно» при интервале значений (от 0,8 до 0,4); 3-й класс опасности – «Безопасно» при интервале значений (от 0,4 до 0). Далее формируется множество рабочих позиций для всех РВЗ: $\{E_{im}\}$, и решается задача расчета живучести ОТС (М) на РП с учетом способов маскировки, применяемых от радиотехнических средств разведки противника δ_3 [20–24]. Расчет живучести проводится согласно формуле

$$P_{\text{РП}}^{\text{ОТС (М)}} = 1 - (1 - P\delta_3^1)(1 - P\delta_3^2)(1 - P\delta_3^3)(1 - P\delta_3^4)(1 - P\delta_3^5). \quad (8)$$

На *втором этапе* решается задача расчета живучести ОТС (М) при осуществлении марша – $P_{\text{марш}}^{\text{ОТС (М)}}$, с учетом радиолокационных δ_2 и оптико-электронных средств δ_1 разведки противника. Для этого необходимо определить время начала и окончания марша для всех свободных ОТС (М):

$$[t_{i1}, t_{j2}], [t_{i2}, t_{j3}], \dots [t_{i(z-1)}, t_{jz}],$$

где t_{i2} – время начала марша, $t_{i2} = \tau_m^H - t_m^{\text{пад}}$;

t_{i1} – время окончания марша (при этом $t_{i1} = t_{m-1}^k + t_{m-i}^{\text{CB}}$) с учетом выбранных вариантов выхода ОТС (М) на рабочую позицию

$$W = \left\{ \tilde{w} = \langle w_1, w_2 \rangle \left| \begin{array}{l} w_1 \in W_1 \\ w_2 \in W_2 \end{array} \right. \right\}$$

и вариантов выхода ОТС (М) с рабочей позиции

$$\Psi = \left\{ \tilde{\psi} = \langle \psi_1, \psi_2 \rangle \left| \begin{array}{l} \psi_1 \in \Psi_1 \\ \psi_2 \in \Psi_2 \end{array} \right. \right\} [15–19, 24].$$

Расчет живучести проводится согласно формуле

$$P_{\text{марш}}^{\text{ОТС (М)}} = 1 - (1 - P\delta_1^1)(1 - P\delta_1^2)(1 - P\delta_1^3)(1 - P\delta_1^4)(1 - P\delta_1^5)(1 - P\delta_1^6) \times \\ \times (1 - P\delta_1^7)(1 - P\delta_2^1)(1 - P\delta_2^2)(1 - P\delta_2^3)(1 - P\delta_2^4)(1 - P\delta_2^5)(1 - P\delta_2^6)(1 - P\delta_2^7). \quad (9)$$

При соответствии полученных значений живучести ОТС (М) при совершении марша к заданным требованиям, происходит накопление всех допустимых вариантов применения ОТС (М) – $\Omega_{\text{доп}} = \{\omega_k | k = \overline{1, K}\}$, где вариант включает:

$$\omega_k = \langle n^{\text{ОТС (М)}}, \{n_{[t_{i2}, t_{j2}]}^{\text{РВЗ}}\}, \{n_{[t_{i(z-1)}, t_{jz}]}^{\text{ЭДС}}\} \rangle,$$

где $n^{\text{ОТС (М)}}$ – количество применяемых ОТС (М);

$\{n_{[t_{i2}, t_{j2}]}^{\text{РВЗ}}\}$ – множество районов выполнения задач с интервалами времени начала и окончания работы ОТС (М) в РВЗ;

$\{n_{[t_{i(z-1)}, t_{jz}]}^{\text{ЭДС}}\}$ – множество элементов дорожной сети (ЭДС) с интервалами времени начала и окончания движения ОТС (М) по ЭДС.

На *третьем этапе* проверяется условие: сформирован ли вариант применения ОТС (М) – ω_k . В случае выполнения условия переходим к выбору рационального варианта, в противном случае происходит коррекция исходных данных.

Для проверки адекватности представленного методического подхода был проведен эксперимент на основе исходных данных, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета живучести ОТС (М)

Т, мин	Интервалы времени функционирования космических средств разведки противника, Δt_{θ}	Варианты маскировки ОТС (М) от космических средств противника, θ	Варианты выхода ОТС (М) на рабочую позицию, W	Варианты выхода ОТС (М) с рабочей позиции, Ψ	Количество применяемых ОТС (М), $n_{\text{ОТС (М)}}$	Дорожная сеть
10	$\Delta t_{\theta_1}, \Delta t_{\theta_2}, \Delta t_{\theta_3}$	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	W_1, W_2	Ψ_1, Ψ_2	1; 2; 3.	Шоссейная, грунтовая, естественная
20	$\Delta t_{\theta_1}, \Delta t_{\theta_2}, \Delta t_{\theta_3}$	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	W_1, W_2	Ψ_1, Ψ_2	1; 2; 3.	Шоссейная, грунтовая, естественная
30	$\Delta t_{\theta_1}, \Delta t_{\theta_2}, \Delta t_{\theta_3}$	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	W_1, W_2	Ψ_1, Ψ_2	1; 2; 3.	Шоссейная, грунтовая, естественная
40	$\Delta t_{\theta_1}, \Delta t_{\theta_2}, \Delta t_{\theta_3}$	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	W_1, W_2	Ψ_1, Ψ_2	1; 2; 3.	Шоссейная, грунтовая, естественная
50	$\Delta t_{\theta_1}, \Delta t_{\theta_2}, \Delta t_{\theta_3}$	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	W_1, W_2	Ψ_1, Ψ_2	1; 2; 3.	Шоссейная, грунтовая, естественная
60	$\Delta t_{\theta_1}, \Delta t_{\theta_2}, \Delta t_{\theta_3}$	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	W_1, W_2	Ψ_1, Ψ_2	1; 2; 3.	Шоссейная, грунтовая, естественная
70	$\Delta t_{\theta_1}, \Delta t_{\theta_2}, \Delta t_{\theta_3}$	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	W_1, W_2	Ψ_1, Ψ_2	1; 2; 3.	Шоссейная, грунтовая, естественная

Таким образом, рассчитав значение живучести ОТС (М) $P(\omega_k)$ при нахождении на рабочих позициях и перемещении по элементам дорожной сети, получаем график зависимости живучести ОТС (М) от продолжительности ее применения (нахождения на рабочих позициях и перемещения по элементам дорожной сети), который представлен на рис. 2.

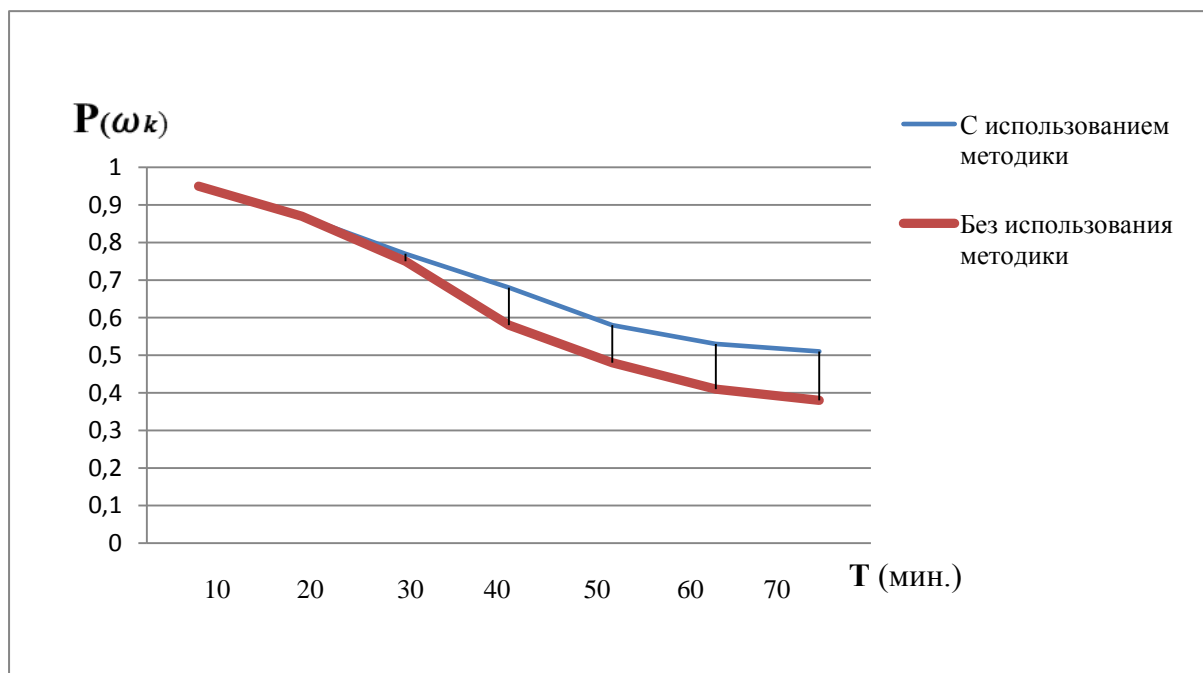


Рис. 2. Зависимость живучести ОТС (М) от продолжительности его применения (нахождения на рабочих позициях и перемещения по элементам дорожной сети)

Данная зависимость показывает, что при использовании данной методики уменьшение показателя живучести ОТС (М) на рассчитанном временном интервале менее значительно, чем без ее применения. Особенно четко данная тенденция прослеживается с увеличением времени активного функционирования ОТС (М) на рабочих позициях, а также при передвижении между ними.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение разработанной методики позволяет повысить живучесть подвижных организационно-технических систем военного назначения в ходе их применения в условиях динамически изменяющейся обстановки при работе ОТС (М) на излучение. При этом исходят из состояния дорожной сети, рельефа местности, а также одновременного воздействия средств оптико-электронной и радиолокационной разведки противника на маршруте движения и средств радиотехнической разведки противника.

Данная методика является универсальной, и она применима ко всем организационно-техническим системам военного назначения.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/200083020> (дата обращения: 20.07.2021).
2. Пат. России № 2008111406/02. Способ снижения заметности подвижного объекта для оптико-электронных систем наблюдения из космоса / Колесник А.В., Чарушников А.В. – Оpubл. 24.03.2008, Бюл. № 27.
3. Пат. России № 2.312.297. Способ скрытия мобильного объекта от радиолокационного наблюдения из космоса / Полетаев А.М. – Оpubл. 08.06.2006, Бюл. № 34.
4. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008.
5. *Чикалов Н.В., Дерюшев В.В.* Пусковые установки и командные пункты ракетных комплексов: учеб. пособие. – МО РФ, 2018. – С. 49–52.
6. Оценка живучести сложных информационных систем связи с подвижными объектами журнал / Л. Чжао [и др.] // Информация и космос. – 2015. – № 3 – С. 36–41.
7. *Ермак Д.Г.* Мероприятия тактической маскировки // Армейский сборник: журн. – 2014. – Апрель. – С. 6-7.
8. *Михайлов Д.В.* Война будущего: возможный порядок нанесения удара средствами воздушного нападения США в многосферной операции на рубеже 2025–2030 годов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2019. – № 12. – С. 44–52.
9. *Афонин И.Е., Макаренко С.И., Митрофанов Д.В.* Анализ концепции «быстрого глобального удара» средств воздушно-космического нападения и обоснование перспективных направлений развития системы воздушно-космической обороны в Арктике в интересах защиты от него // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2020. – № 15. – С. 75–87.
10. Применение воинских частей и соединений запуска и управления КА: учеб пособие / Б.Д. Казахов [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019.
11. *Минаков Е.П., Суровикин С.В.* Методика организации скрытного перемещения наземных объектов // Известия института инженерной физики. – 2016. – № 2 (40). – С. 13–19 // Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_25897142_16220681.pdf (дата обращения: 10.07.2021).
12. *Минаков Е.П., Мусиенко С.А., Шафигуллин И.Ш.* Сборник основных терминов, понятий и определений по вопросам оценивания эффективности и моделирования применения специальных организационно-технических систем. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013.
13. *Минаков Е.П.* Зоны применения орбитальных группировок Военно-космических сил. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 1997.
14. *Минаков Е.П.* Карты космической обстановки для оценивания эффективности применения космических аппаратов дистанционного зондирования поверхности Земли: материалы IV Междунар. конф. «Микротехнологии и новые информационные услуги в авиации и космонавтике». – СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2005.

15. *Меньшаков Ю.К.* Защита объектов и информации от технических средств разведки: учеб. пособие. – М.: Российск. гос. гуманит. ун-т, 2002. – 309 с.
16. *Бекетов А.А., Белоконь А.П., Чермашенцев С.Г.* Маскировка действий подразделений Сухопутных войск. – М., 1976. – С. 14–19.
17. *Сиверс А.П., Суслов Н.А., Метельский В.И.* Основы радиолокации. – Судпромгиз, 1959. – С. 154–159.
18. Методики комплексной оценки эффективности защиты военных объектов от технических средств разведки иностранных государств и систем наведения ВТО. – М.: Воен. изд-во, 2015. – 176 с.
19. Рекомендации по повышению эффективности маскировки войск и объектов от современных технических средств разведки и систем наведения оружия / ФГБУ «ЦНИИИ ИВ» МО. – М.: МО РФ, 2019. – 205 с.
20. *Николаенко Ю.С.* Противодействие радиотехнической разведке // Системы безопасности, связи и телекоммуникаций. – 1995. – № 6. – С. 12–15.
21. *Гришин Ю.П., Ипатов В.П.* Радиотехнические системы: учебник для вузов / под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Академия, 2008. – С. 42–47.
22. *Перунов Ю.М., Фомичёв К.И., Юдин Л.М.* Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.
23. *Никольский Б.А.* Методы и средства радиоэлектронной защиты летательных аппаратов: учеб. пособие: в 2 ч. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – Ч. 2. – С. 6–15.
24. *Дедков В.К., Водолазский В.И.* Живучесть и безопасность сложных технических систем // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2002. – № 4. – С. 63–79 // Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_42458565_16220681.pdf (дата обращения: 11.07.2021).

В.А. Власов,
кандидат технических наук, доцент;
Н.В. Радионов,
доктор экономических наук, профессор;
Е.К. Яхваров,
кандидат экономических наук

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНИВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ОБЪЕМОВ ФИНАНСИРОВАНИЯ РАЗРАБОТОК КОСМИЧЕСКОГО ВООРУЖЕНИЯ И ТЕХНИКИ

В предложенной статье рассматриваются модель и технико-экономические аспекты создания образцов космического вооружения и техники. Сформулирована постановка технико-экономической задачи целочисленного программирования оценки в сложных военно-экономических системах (на среднем и верхнем уровнях иерархии) экономического эффекта, определяемого моделями типа «затраты-результат» или «стоимость-эффект» при условии максимизации возможных технических характеристик системы. Предложены пути ее решения при линейной и показательной зависимости от параметров системы. Обоснована адекватность степенной зависимости функции качества военно-экономической системы в оптимальной функции затрат.

Ключевые слова: военно-экономическая система, финансирование разработок вооружения и военной техники, верхний уровень иерархии, норматив эффективности В.В. Новожилова, случайная величина дисконтирования.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время теория и практика военно-экономических исследований характеризуются сложностью моделирования, вызванной проблемой неопределенности исходных данных экономических показателей. В качестве основного инструментария решения задачи неопределенности в военно-экономических исследованиях применяется вероятностный подход, основанный на концепции теории вероятностей [9]. Проведенные Н.Н. Моисеевым [10], Л. Заде, Р. Беллманом [11] фундаментальные исследования подтверждают, что применение случайно-вероятностного подхода в военно-экономических исследованиях не является единственным «инструментом». Для решения проблемы неопределенности можно выделить подход, связанный с вопросами сложности структуры экономических взаимосвязей, которая обусловлена спецификой современного этапа развития мировой экономики. В соответствии с теорией системного анализа неопределенность является сложноструктурированным понятием [12], она обеспечивает сообразность выводов исследований реальным экономическим процессам.

Согласно современному системному подходу при изменении уровня иерархии системы меняются как математические закономерности уровня, так и характеристики качества и эффективности самой системы. В сложных военно-экономических системах на средних и верхних уровнях иерархии основными характеристиками является экономический эффект заданный технико-экономическим моделям типа «затраты-результат» или «стоимость-эффект». Поэтому согласно требованиям системного подхода для анализа эффективности или синтеза систем на таких уровнях желательно иметь прямые соотношения эффекта W и затрат C : $W = W(C)$.

Целью публикации статьи является обоснование эффективности вложенных средств в инвестиционный проект создания вооружения и военной техники с максимально возможными техническими характеристиками.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕБОРА

Постановка задачи. Одной из важнейших задач военно-экономического анализа является получение функций $W(C)$ как для системы в целом, так и для отдельных подсистем или этапов жизненного цикла системы, в том числе этапа создания серийных образцов [8].

Наиболее просто функция $W(C)$ получается для калькуляционных моделей. Они относятся к нижнему уровню иерархии принятия решений, на котором описание военно-технических систем допускает тождество стоимости и эффекта $W \equiv C$. Например, калькуляционные модели широко применяются при расчетах стоимости изготовления космического аппарата (КА). Постановка такой задачи может быть представлена в виде

$$C_{КА} = \sum_{i=1}^n D_{КА}(t_i) \cdot [K_i \cdot C_{уд_i} \cdot M_i] \rightarrow \min_{\substack{K_i, t_i, M_i \\ i=1, \dots, n}} \text{ при ограничении } \sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{уд_i}^{v_i} \cdot M_i^{v_i} \leq I_{КА \text{ доп}}, \quad (1)$$

где $C_{уд_i}$ – удельная (по массе) стоимость изготовления i -й подсистемы КА;

t_i – временной интервал изготовления i -й подсистемы КА;

$D_{КА}$ – случайная величина дисконтирования стоимости КА (снижения будущей стоимости затрат, приведения ее к текущему времени инвестирования);

M_i – масса i -й подсистемы КА, причем $\sum_{i=1}^n M_i = M_{КА}$, где $M_{КА}$ – масса КА;

K_i – коэффициент «инновационности» (или технологической важности) подсистемы, который учитывает зависимость средней стоимости i -й подсистемы КА от конструктивно-технологической сложности, $K_i = \frac{\lambda_{Ии}}{\lambda_{Ти}}$, где $\lambda_{Ии}$ – коэффициент, который характеризует применение новых материалов, комплектующих систем и проч.; $\lambda_{Ти}$ – коэффициент, который характеризует применения отработанных технологических решений, технологической оснастки и проч.;

$I_{КА \text{ доп}}$ – текущий лимит финансирования закупок.

В настоящее время технико-экономическая задача создания образцов космического вооружения и техники (1) чаще всего решается в дискретной постановке, когда по каждой i -й подсистеме КА имеется возможность изготовления нескольких вариантов (полностью совместимых по функционированию в системе КА), отвечающих требованиям заданного качества КА $W_{КА}$ в целом:

$$W_{КА} (K_i^{v_i}, t_i^{v_i}, C_{уд_i}^{v_i}, i = 1, \dots, n) = W_{зад},$$

где v_i – номер варианта изготовления i -й подсистемы КА;

$W_{зад}$ – заданное требование качества КА.

Методика решения. Особенностью задачи (1) является ее существенная нелинейность, связанная с целочисленным значением неизвестных номеров вариантов v_i . Поэтому в общем случае для определения глобально оптимального решения подобных задач применим лишь метод простого перебора вариантов. Однако при определенных условиях можно применять ускоренные алгоритмы направленного перебора.

Направленный перебор в задаче (1) становится возможным в результате перехода от записи с ограничениями к безусловной задаче, используя традиционный прием неопределенных множителей Лагранжа (принцип расширения) для добавления ограничений к целевой функции. В результате получается квазилагранжиан, по виду аналогичный задаче математического программирования:

$$\Lambda(v_i, i=1, \dots, n, \lambda) = \min_{\substack{v_i, i=1, \dots, n \\ v_i \in \{v_i(W_{зад})\} \\ \lambda \geq 0}} \left[\sum_{i=1}^n C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} + \lambda \cdot \left(\sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} - I_{КА \text{ доп}} \right) \right], \quad (2)$$

где λ – коэффициент, приводящий инвестиционные и сборочные затраты к единому временному интервалу.

Согласно экономической теории стоимости денег во времени [2, 3] для сложения величин $C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i}$ и $K_i^{v_i} \cdot C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i}$ требуется их приведение к единому текущему времени путем дисконтирования или наращивания одной из них. С учетом преобразования оценок затрат на изготовление подсистем с соответствующей оснасткой в ожидаемые затраты на их сборку можно считать функцию экономической эффективности инвестиций E_{Δ} в совмещение подсистем КА при сборке как аналог элементарной прибыли.

С учетом отсутствия будущих доходов прибыль обращается в убыток (только расходы):

$$E_{\Delta} = -\hat{D} \cdot \sum_{i=1}^n C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} - \sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i}, \quad (3)$$

где \hat{D} – случайная величина дисконтирования прибыли от инвестиций.

Величину \hat{D} можно определить по следующей формуле [2, 3]:

$$D = \frac{D_0}{(1+r)^n}, \text{ или } D = D_0 \cdot e^{-r \cdot n}, \text{ или } D = D_0 \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot (1+r)^n},$$

где $r \in [0, 1]$ – переменное значение процентной ставки (предполагаемая величина экономического риска);

n – количество периодов (месяцы, кварталы, года);

D_0 – будущая стоимость платежей.

Если провести дисконтирование денежных потоков стоимостей к текущему времени функции (3) и сравнить ее с функцией (2), то прослеживается эквивалентность технической и экономической задачи

$$\max_{\substack{v_i, i=1, \dots, n \\ v_i \in \{v_i(W_{зад})\} \\ \lambda \geq 0}} \left[\sum_{i=1}^n C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} + \lambda \cdot \sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} \right] \Leftrightarrow \max_{\substack{v_i, i=1, \dots, n \\ v_i \in \{v_i(W_{зад})\} \\ D \geq 0}} E_{\Delta}.$$

Величина D [2, 3] отражает понятие периода времени (выраженного в n) окупаемости инвестиционных затрат $\sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i}$ за счет получения будущих доходов $\sum_{i=1}^n C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i}$.

Обратная величина $1/D = e_H$ является нормативом эффективности В. В. Новожилова [4].

При $r \rightarrow 0$ величина $D \rightarrow D_0$, а при $r \rightarrow \infty$ величина $D \rightarrow 0$. Такое условие дает возможность использовать метод «седловой точки» [5] для решения задач в виде (2).

Этапы решения задачи на нижнем уровне иерархии военно-экономической системы.

1. Функция (9) записывается в виде экономического аналога «седловой точкой» [5]:

$$\Lambda_1([M_i^{v_i}]^*, r) = \min_{D \geq 0} \left(\max_{\substack{v_i, i=1, \dots, n \\ v_i \in \{v_i(W_{зад})\}}} \left[- \sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} - D(r|n) \cdot \sum_{i=1}^n C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} \right] \right).$$

2. При определенном значении n выбирается минимальное значение $r = r_0$, при котором

выполняется условие $\sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} > I_{КА \text{ доп}}$.

3. Решается задача безусловной максимизации при заданном приращении $r = r_0 + \Delta r$:

$$\sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} - D(r|n) \cdot \sum_{i=1}^n C_{yДi}^{v_i(t)} \cdot M_i^{v_i} \rightarrow \max_{\substack{v_i, i=1, \dots, n \\ v_i \in \{v_i(W_{зад})\}}} . \quad (4)$$

4. При решении, удовлетворяющему условию $\sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{уд_i}^{v_i(I)} \cdot M_i^{v_i} > I_{КА\ доп}$, этап 3 повторяется.

5. При решении, удовлетворяющему условию $\sum_{i=1}^n K_i^{v_i} \cdot C_{уд_i}^{v_i(I)} \cdot M_i^{v_i} \leq I_{КА\ доп}$, одним из оптимизационных методов приближений находится рациональное значение r^* ($\Delta r \rightarrow 0$), при котором выполняются ограничения. Полученные из (4) для этого r^* номера вариантов и соответствующие значения $[M_i^{v_i}]^*$ можно считать локально оптимальным решением задачи.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ВЕРХНЕМ УРОВНЕ ИЕРАРХИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В более общем случае задача оценивания оптимальных объемов финансирования разработок вооружения и военной техники формулируется в виде оптимизационной методики поиска решений с максимально возможными техническими характеристиками системы.

Постановка задачи. Пусть известны зависимости показателя качества военно-экономической системы W и ее стоимости I от вектора $\bar{X}_{\langle n \rangle}$ ее проектных параметров:

$$W = f_1(\bar{X}_{\langle n \rangle}); I = f_2(\bar{X}_{\langle n \rangle}).$$

Если существует возможность, хотя бы и не однозначно, выразить $\bar{X}_{\langle n \rangle} = f_2^{-1}[I]$, то в результате подстановки получается прямая зависимость

$$W = f_1(\bar{X}_{\langle n \rangle}) = f_1(f_2^{-1}[I]) = f_3(I).$$

В таком случае из условия $\frac{df_3(I)}{dI} = 0$ можно найти оптимальное значение I^* и соответствующие значения показателя эффективности и параметров системы $W^* = f_3(I^*)$; $\bar{X}_{\langle n \rangle}^* = f_2^{-1}[I^*]$.

Методика решения. В наиболее распространенных на практике случаях методика решения поставленной задачи строится на основе квадратично-линейной аппроксимации. В качестве первого шага в данном методическом приеме рассматриваются два чисто математических предположения о возможности представления функций в виде разложения в ряд Тейлора. Причем, для функции «технической» зависимости показателя качества системы («естественно») предполагается разложение до квадратичных членов, а для функции «экономической» оценки стоимости принимается линейное представление («бухгалтерский подход»):

$$W \approx W_0 + \bar{A}_{\langle n \rangle}^T \cdot \bar{X}_{\langle n \rangle} + \bar{X}_{\langle n \rangle}^T \cdot B_{\langle n, n \rangle} \cdot \bar{X}_{\langle n \rangle}; I \approx I_0 + \bar{C}_{\langle n \rangle}^T \cdot \bar{X}_{\langle n \rangle} \quad (5)$$

где $\bar{X}_{\langle n \rangle} = [x_1, \dots, x_n]^T$ – вектор проектных параметров системы; W_0, I_0 – опорные значения показателя качества и стоимости системы соответственно (если это возможно при $\bar{X}_{\langle n \rangle} \equiv 0$);

$\bar{A}_{\langle n \rangle}, \bar{C}_{\langle n \rangle}, B_{\langle n, n \rangle}$ – заданные векторы и матрица коэффициентов аппроксимации.

Модификация функции эффективности. Несмотря на кажущуюся «естественность», далее можно показать, что предложенный прием оказывается некорректным с точки зрения общеэкономических представлений о предельной полезности инвестиций. Тогда

$$W \approx W_0 + \sum_{i=1}^n (b_{ii} \cdot x_i^2 + a_i \cdot x_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (6)$$

где $a_i = [A]_i$; $b_{ij}, i = 1, \dots, n-1, j = i+1, \dots, n$ – коэффициенты, полученные из матрицы $B_{\langle n, n \rangle}$ с учетом суммирования симметричных элементов матрицы: $b_{ij} = [B]_{jk} + [B]_{kj}$.

Введем матрицу из n^2 коэффициентов $G_{\langle n,n \rangle} = \{g_{ki}, k, i = 1, \dots, n\}$ и обозначим

$$y_k = \sum_{i=1}^n g_{ki} \cdot x_i, \quad k = 1, \dots, n \quad (7)$$

Несложно заметить, что с учетом известных коэффициентов $a_i, b_{ij}, i, j = 1, \dots, n$ из решения системы уравнений

$$\sum_{k=1}^n g_{ki}^2 = b_{ii}; \quad \sum_{k=1}^n g_{ki} = a_i, \quad i = 1, \dots, n; \quad (8)$$

$$2 \cdot \sum_{k=1}^n g_{ki} \cdot g_{kj} = b_{ij}, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad j = i+1, \dots, n, \quad (9)$$

только некоторые коэффициенты g_{ki} можно определить однозначно. Действительно, так как количество уравнений в данной системе равно $n^2 - \frac{n-3}{2} \cdot n$, то количество переменных n^2 при $n > 3$ оказывается больше, чем количество уравнений. Это означает, что $\frac{n-3}{2} \cdot n$ величин из $g_{ki}, k, i = 1, \dots, n$ можно задавать произвольно, а остальные определяются из решения системы нелинейных уравнений (15)-(16).

В простейшем случае произвольно задаваемые $\frac{n-3}{2} \cdot n$ величин с индексами из соответствующего произвольно заданного множества индексов $J_{\frac{n-3}{2} \cdot n}$ можно приравнять к нулю: $g_{ki} = 0, k, i \in J_{\frac{n-3}{2} \cdot n}$. Тогда формально система (7)-(8) становится разрешимой. Следовательно, после возведения в квадрат

$$y_k^2 = \sum_{i=1}^n g_{ki}^2 \cdot x_i^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n g_{ki} \cdot g_{kj} \cdot x_i \cdot x_j.$$

и суммирования по индексу k , можно получить выражение:

$$\sum_{k=1}^n y_k^2 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^n g_{ki}^2 \right] \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[2 \cdot \sum_{k=1}^n g_{ki} \cdot g_{kj} \right] \cdot x_i \cdot x_j = \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j.$$

Если к данному выражению добавить равенство

$$W_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i = W_0 + \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^n g_{ki} \right] \cdot x_i = W_0 + \sum_{k=1}^n \left[\sum_{i=1}^n g_{ki} \cdot x_i \right] = W_0 + \sum_{k=1}^n y_k,$$

то получится тождество

$$W_0 + \sum_{k=1}^n (y_k^2 + y_k) \equiv W_0 + \sum_{i=1}^n (b_{ii} \cdot x_i^2 + a_i \cdot x_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j.$$

По аналогии для функции «экономической» оценки стоимости несложно получить:

$$I_0 + \sum_{k=1}^n d_k \cdot y_k = I_0 + \sum_{k=1}^n d_k \cdot \left[\sum_{i=1}^n g_{ki} \cdot x_i \right] = I_0 + \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^n d_k \cdot g_{ki} \right] \cdot x_i = I_0 + \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i,$$

где коэффициенты d_k определяются в матричном виде выражением

$$\bar{D}_{\langle n \rangle} = G_{\langle n,n \rangle}^{-1} \cdot \bar{C}_{\langle n \rangle},$$

где $\bar{D}_{\langle n \rangle}$ – соотношение номенклатурного значения n -образца вооружения к его затратам.

Для удовлетворения условия существования обратной матрицы $G_{\langle n,n \rangle}^{-1}$ необходимо, чтобы не все диагональные элементы матрицы $G_{\langle n,n \rangle}$ были ненулевыми. Поэтому при выборе про-

извольных нулевых элементов $g_{ki} = 0$ множество $J_{\frac{n-3}{2} \cdot n}$ не должно включать равные индексы: $\langle i, i \rangle \notin J_{\frac{n-3}{2} \cdot n}$.

Переход к агрегированной модели. Прделанные выше выкладки означают, что существует, хоть и неоднозначный, переход от моделей (8) и (9) показателя качества системы и оценки стоимости ее создания с «истинными» характеристиками x_i к модели с агрегированными характеристиками y_k , которую можно записать в векторном виде:

$$W \approx W_0 + \bar{E}_{\langle n \rangle}^T \cdot \bar{Y}_{\langle n \rangle} + \bar{Y}_{\langle n \rangle}^T \cdot E_{\langle n, n \rangle} \cdot \bar{Y}_{\langle n \rangle}; I \approx I_0 + \bar{D}_{\langle n \rangle}^T \cdot \bar{Y}_{\langle n \rangle}, \quad (10)$$

где $\bar{Y}_{\langle n \rangle} = [y_1, \dots, y_n]^T$; $\bar{E}_{\langle n \rangle} = [1, \dots, 1]^T$ – n -мерный единичный вектор; $E_{\langle n, n \rangle}$ – единичная диагональная матрица.

Если в полученной агрегированной системе (10) и (11) каким-либо образом определить вектор переменных $\bar{Y}_{\langle n \rangle}$, то из соотношений (10) однозначно определяется вектор «истинных» параметров:

$$\bar{X}_{\langle n \rangle} = G_{\langle n, n \rangle}^{-1} \cdot \bar{Y}_{\langle n \rangle}. \quad (11)$$

Задача оптимизации агрегированных параметров может быть представлена в виде

$$W_0 + \sum_{k=1}^n (y_k^2 + y_k) \rightarrow \max_{y_k > 0, k=1, \dots, n} \quad (12)$$

при ограничении $I_0 + \sum_{k=1}^n d_k \cdot y_k = I_{зад}$, где $I_{зад}$ – лимит финансирования разработок.

После дифференцирования лагранжиана

$$\Lambda = W_0 + \sum_{k=1}^n (y_k^2 + y_k) - \lambda \cdot \left(I_0 + \sum_{k=1}^n d_k \cdot y_k - I_{зад} \right), \quad (13)$$

по переменным y_k, λ , получается система линейных уравнений:

$$2y_k - d_k \cdot \lambda = 0, \quad k = 1, \dots, n; \quad I_0 + \sum_{k=1}^n d_k \cdot y_k = I_{зад}.$$

Решение этой системы записывается в виде

$$y_k = \frac{d_k}{\sum_{k=1}^n d_k^2} \cdot (I_{зад} - I_0), \quad k = 1, \dots, n; \quad \lambda = 2 \cdot \frac{I_{зад} - I_0}{\sum_{k=1}^n d_k^2}. \quad (14)$$

Наконец, подставляя это решение в формулу для показателя эффективности, можно получить прямую его зависимость от стоимости разработки (лимита финансирования):

$$W = W_0 + \frac{1}{\sum_{k=1}^n d_k^2} \cdot (I_{зад} - I_0)^2 + \frac{\sum_{k=1}^n d_k}{\sum_{k=1}^n d_k^2} \cdot (I_{зад} - I_0) = A \cdot I_{зад}^2 + B \cdot I_{зад} + C, \quad (15)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{\sum_{k=1}^n d_k^2}; \quad B = \frac{\sum_{k=1}^n d_k - 2 \cdot I_0}{\sum_{k=1}^n d_k^2}; \quad C = W_0 - \frac{\sum_{k=1}^n d_k - I_0}{\sum_{k=1}^n d_k^2} \cdot I_0.$$

Полученная зависимость показывает, что существует такой объем финансирования $I_{зад}^*$, который обеспечивает оптимальное значение показателя технической эффективности:

$$I_{зад}^* = -\frac{B}{2A} = \begin{cases} I_0 - \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^n d_k, & \text{при } I_0 > \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^n d_k; \\ 0, & \text{при } I_0 \leq \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^n d_k. \end{cases}$$

Так как в формуле (15) коэффициент при квадратичном члене всегда положительный $A > 0$, то при $I_{зад} > I_{зад}^*$ значение показателя эффективности W будет увеличиваться по квадратичной зависимости (рис. 1).

Следовательно, величина $I_{зад}^*$ определяет точку минимума показателя W . Однако именно этот вывод является не вполне корректным, о чем и было указано выше. В действительности для большинства инновационных технических систем на практике наблюдается закон убывающей эффективности финансирования. Согласно этому закону дополнительное финансирование разработок приводит к эффекту увеличения (улучшения) показателя эффективности разрабатываемой системы. Однако с ростом финансирования скорость роста показателя эффективности существенно замедляется. Нетрудно заметить, что в полученной выше зависимости этого эффекта не наблюдается, что и приводит к выводу о некорректности (противоречивости) данного результата.

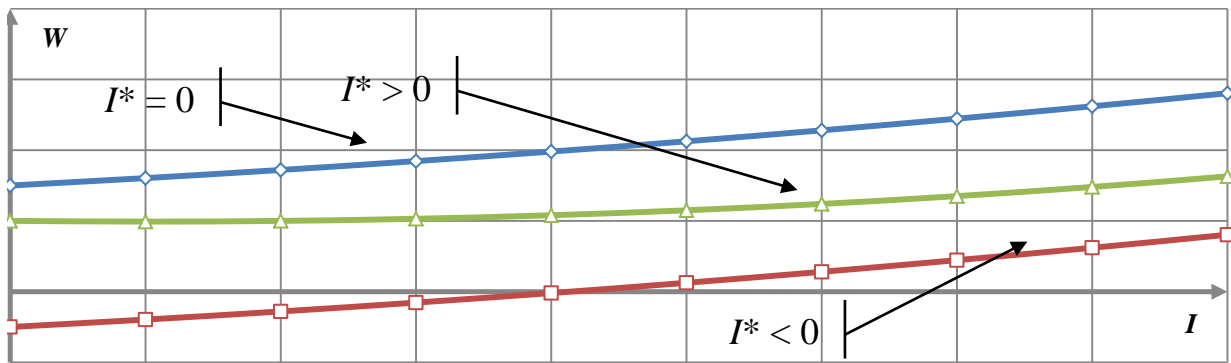


Рис. 1. Функция «эффективность-стоимость» при линейной зависимости от параметров системы

Корректировка исходных моделей. Для устранения данного противоречия необходимо провести корректировку исходной модели (8) и (9). При этом для простоты вместо (8) можно рассмотреть только линейные функции «технической» зависимости показателя качества от параметров системы:

$$W \approx W_0 + \bar{A}_{(n)}^T \cdot \bar{X}_{(n)}$$

а вместо (9) рассмотреть аппроксимацию «экономической» оценки стоимости показательной функцией:

$$I \approx I_0 \cdot \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i}, \quad \alpha_i \geq 1, \quad i = 1, \dots, n.$$

Для такой модели задачу оптимального финансирования создания системы можно записать в «истинных» переменных:

$$W_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i \rightarrow \max_{x_i > 0, i=1, \dots, n}$$

при условии $I_0 \cdot \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i} = I_{зад}$. После дифференцирования лагранжиана

$$\Lambda = W_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i - \lambda \cdot \left(I_0 \cdot \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i} - I_{зад} \right)$$

по переменным x_i, λ получается система нелинейных уравнений:

$$\lambda \cdot \frac{\alpha_k}{x_k} I_0 \cdot \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i} = a_k, \quad k = 1, \dots, n; \quad I_0 \cdot \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i} = I_{зад}.$$

Решение этой системы записывается в виде:

$$x_k = \frac{\alpha_k}{a_k} \cdot \left[I_0^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}} \cdot \prod_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{a_i} \right)^{\frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^n \alpha_j}} \right]^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}} \cdot I_{зад}^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}}, \quad k = 1, \dots, n; \quad \lambda = \left[I_0^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}} \cdot \prod_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{a_i} \right)^{\frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^n \alpha_j}} \right]^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} - 1}.$$

Подставляя полученные выражения в формулу показателя эффективности, можно снова получить прямую его зависимость от стоимости разработки (лимита финансирования):

$$W = W_0 + \sum_{k=1}^n a_k \cdot x_k = W_0 + A \cdot I_{зад}^B, \quad (16)$$

где $A = \left(\prod_{j=1}^n \alpha_j \right) \cdot I_0^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}} \cdot \prod_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{a_i} \right)^{\frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^n \alpha_j}}$; $B = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$.

График функции (16) представлен на рис. 2. При дифференцировании функции (16) показатель степени $B < 1$, поэтому производная от W по $I_{зад}$ является убывающей функцией от $I_{зад}$.

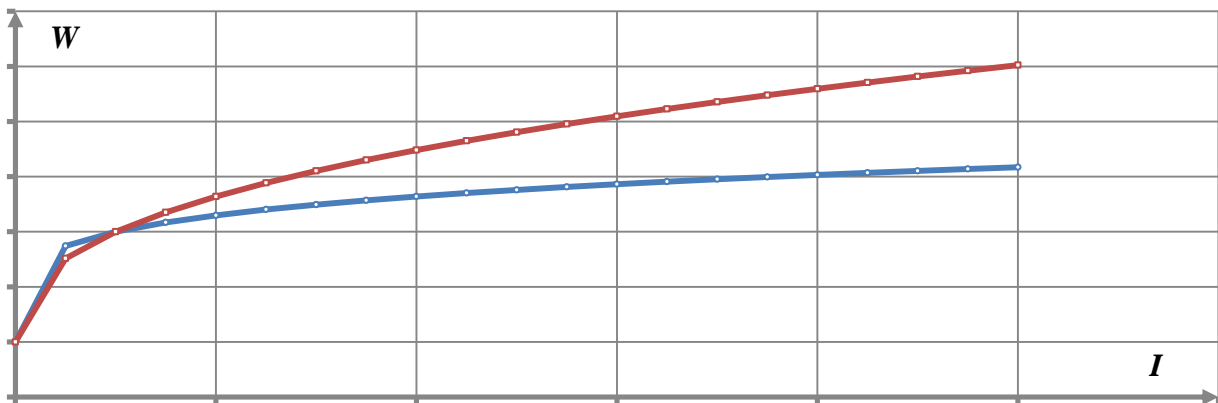


Рис. 2. Примеры функции «эффективность-стоимость» при показательной зависимости от параметров системы

Анализ полученных результатов. Полученный выше результат можно пояснить с использованием теоретических выкладок.

Пусть рассматривается задача максимизации простейшей аддитивной свертки двух технических показателей системы $x_1 + x_2 \rightarrow \max$ при условии, что для их достижения два вида ресурсов расходуется по известному плану ресурсопотребления:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = a_1;$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = a_2$$

Из этой системы тривиально находится решение задачи максимизации:

$$x_1 = \frac{a_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} a_1 - \frac{a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} a_2; \quad x_2 = \frac{a_{11}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} a_2 - \frac{a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} a_1.$$

Отсюда для заданной константы $x_1 + x_2 = W$ можно определить кривую безразличия задачи максимизации к ресурсам. В двумерном случае она имеет линейный вид

$$a_2 = \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}{a_{11} - a_{12}} \cdot W - \frac{a_{22} - a_{21}}{a_{11} - a_{12}} \cdot a_1. \quad (17)$$

Следует отметить, что с учетом пределов достижимости технических показателей при $x_1 \leq m_1$ и $x_2 \leq m_2$ функция безразличия слева и справа будет также ограничена:

$$a_2 \geq \frac{a_{22}}{a_{12}} \cdot a_1 - \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}{a_{12}} \cdot m_1; \quad a_2 \leq \frac{a_{21}}{a_{11}} \cdot a_1 - \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}{a_{11}} \cdot m_2.$$

Графически полученные зависимости имеют вид, представленный на рис. 3.

Вертикальные и горизонтальные линии кривой безразличия на рис. 3 обозначают теоретическую необходимость бесконечного запаса одного из ресурсов при условии достижения пределов по одному из технических параметров.

Если в рассматриваемой задаче количество технических параметров будет увеличиваться, то, по аналогии с предыдущими рассуждениями, для одного и того же значения константы W по каждому двум параметрам можно получить выражения вида (17). При этом результирующая кривая безразличия внутри области ограничений окажется кусочно-линейной. Учитывая, что в выражениях (24) коэффициент при W отрицательный, результирующая кривая безразличия будет выпуклой вниз, что в первом приближении аппроксимируется обратной зависимостью $a_2 = a_0(W)/a_1$, где $a_0(W)$ – некоторая функция аппроксимации при заданном W . При этом с увеличением W кривые безразличия все больше удаляются от начала координат, а скорость этого удаления имеет более чем линейный порядок за счет расширения линий ограничений (рис. 3).

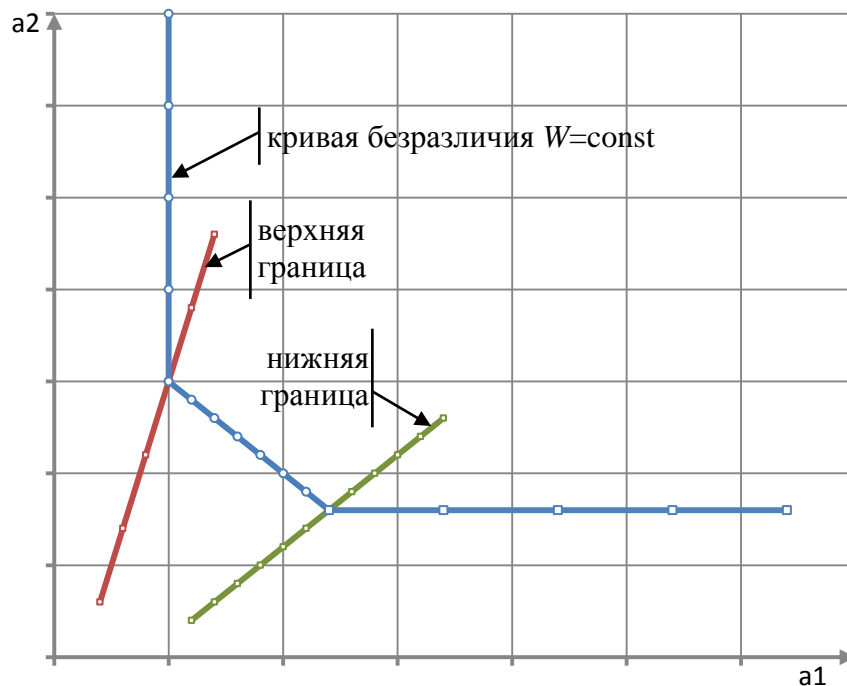


Рис. 3. Кривая безразличия в задаче оптимизации ресурсов

Экономическая составляющая в задаче связана со стоимостью используемых ресурсов. Это позволяет окончательно сформулировать комплексную задачу оптимизации.

Для двухмерного случая ресурсов естественно находить такие их запасы, при которых минимизируются суммарные затраты:

$$C_1 \cdot a_1 + C_2 \cdot a_2 \rightarrow \min ,$$

где C_1, C_2 – соответствующие стоимости.

Очевидно, что при заданном минимуме затрат I оптимальное соотношение ресурсов вычисляется по формуле

$$a_2 = \frac{I}{C_2} - \frac{C_1}{C_2} \cdot a_1.$$

Данная зависимость определяет прямую экономического безразличия запасов ресурсов. При этом с уменьшением I прямая безразличия приближается к началу координат.

Учитывая полученный результат технической задачи (см. рис. 3) и вид прямой экономического безразличия, несложно представить, что оптимальным решением технико-экономической задачи на верхнем уровне иерархии принятия военно-экономических решений будет точка пересечения двух линий – кривой безразличия в технической задаче и прямой безразличия в экономической задаче, определяемая из уравнения

$$\frac{I}{C_2} - \frac{C_1}{C_2} \cdot a_1 = \frac{a_0(W)}{a_1}.$$

В результате решения этого уравнения получается оптимальное значение ресурса:

$$a_1^* = \frac{I}{2 \cdot C_1} \pm \sqrt{\left(\frac{I}{2 \cdot C_1}\right)^2 - \frac{C_2}{C_1} a_0(W)}. \quad (18)$$

Отсюда при $a_1^* = \text{const}$ получаемая по результатам проделанного анализа функция затрат $W(I)$ с учетом нелинейности функции $a_0(W)$ будет иметь показательный вид:

$$W = a_0^{-1} \left[\frac{I}{C_2} \cdot a_1^* - \frac{C_1}{C_2} \cdot a_1 \right] = \left[\frac{I}{C_2} \cdot a_1^* - \frac{C_1}{C_2} \cdot a_1 \right]^n, \quad n < 1.$$

Это подтверждает сделанный выше вывод об адекватности степенной зависимости в оптимальной функции затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные исследования методов решения технико-экономической задачи на верхнем уровне иерархии системы позволили:

- сформировать методику решения технико-экономических задач целочисленного программирования методом направленного перебора путём использования принципа расширения (добавлением ограничений к целевой функции неопределённых множителей Лангранжа). В методике обоснована эквивалентность технической и экономической задач путем приведения величин этих задач к единому текущему времени стоимостей, что позволило использовать метод «седловой точки» для их решения;

- на основании задачи оценивания оптимальных объемов финансирования разработок сформулировать задачу в виде оптимизационной методики поиска решений с максимально возможными техническими характеристиками военно-экономической системы. В методике рассмотрен вариант решения задачи на основе квадратично-линейной аппроксимации, результатом решения которого является полученная прямая зависимости показателя эффективности от стоимости разработки (лимита финансирования), т. е. функция «эффективность-стоимость» при линейной зависимости от параметров системы (см. рис. 1). В методике также был рассмотрен уточненный вариант решения задачи, полученным результатом решения которого является функция «эффективность-стоимость» при показательной зависимости от параметров системы (см. рис. 2).

Таким образом, логическим завершением исследования, связанного с принятием военно-экономических решений на верхнем уровне иерархии системы в технико-экономической задаче, является построение кривых безразличия. Точка пересечения кривых безразличия в технической задаче и экономической задаче является оптимальным решением, определяемым из уравнения (18), что подтверждает вывод об адекватности степенной зависимости в

оптимальной функции затрат. Сокращение затрат на разработку и создание космического вооружения и техники, при прямом соотношении затрат и эффекта, позволит повысить качество образцов вооружения.

Список используемых источников

1. *Ефремов Р.Н.* Динамические модели, применяемые при исследовании эффективности. Учебное пособие. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1980. – С.124.
2. *Радионов Н.В.* Модели эффективности инвестиций и кредитования. Основы финансового анализа. – СПб.: Наука, 2005. – 600 с.
3. *Радионов Н.В., Фадеев А.С.* Модели выбора в задачах инвестиционного проектирования. – М.: РЕСТАРТ, 2012. – 192 с.
4. *Новожилов В.В.* Проблемы измерения затрат и результатов при оптимальном планировании. – М.: Наука, 1972. – 434 с.
5. *Колемаев В.А.* Математическая экономика: учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 240 с.
6. *Горбулин В.И., Евдокимов Р.А., Фадеев А.С.* Обоснование стратегии развертывания и восполнения орбитальных систем космических аппаратов на основе комплексной оптимизации управления организационно-технической системой // Вопросы электромеханики: тр. ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 128, № 3. – С. 35–40.
7. Задача технико-экономического обоснования финансирования операций по развертыванию и наращиванию систем малых космических аппаратов / В.И. Горбулин [и др.] // Успехи радиоэлектроники. – 2010. – № 3. – С. 42–48.
8. *Горбулин В.И., Панченко В.В., Радионов Н.В.* Техничко-экономический подход к выбору системы малых космических аппаратов // Известия высших заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 4. – С. 40–46.
9. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2004. – С. 17–31.
10. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1982. – С. 27–59.
11. *Bellman R.E., Zadeh L.A.* Decision-Making in Fuzzy Environment // Management Science, 17. – 1970. – № 4. – P. 141–164.
12. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник / под общ. ред. А.Н. Павлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 14–58.

А.И. Захаров*,
кандидат технических наук, профессор;
А.И. Зимовец*;
И.А. Молодкин**,
К.А. Неретина*;
А.Д. Хомоненко*,
доктор технических наук, профессор
*ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.
**ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

ПОВЫШЕНИЕ ОПЕРАТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ CUDA

Рассматривается использование технологии CUDA (параллельного программирования с использованием графических процессоров) для повышения оперативности обработки информации в системе контроля космического пространства. Производится оценивание влияния распараллеливания на скорость вычислений на примере решения задачи определения параметров орбиты космического объекта с помощью численного интегрирования дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты 4-го порядка.

Приводятся численные данные по ускорению параллельных вычислений на графических процессорах (GPU) по сравнению с параллельными вычислениями на центральном процессоре (CPU). Определены требуемые условия организации параллельной обработки информации в системе контроля космического пространства, при которых достигается повышение оперативности обработки информации с использованием GPU.

Ключевые слова: обработка информации, метод Рунге – Кутта, многопроцессорные системы, параллельное программирование, графические процессоры.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в системах контроля космического пространства одним из наиболее актуальных направлений исследований становится обеспечение требуемой оперативности и точности идентификации космических объектов на основе применения технологий обработки больших данных. Важное место в ряду таких технологий занимает организация параллельных вычислений на основе графических процессоров.

При решении прикладных задач всё чаще возникает необходимость использования параллельных вычислений [1]. Переход к многоядерным системам, в свою очередь, требует одновременного перехода к параллельным вычислениям, поскольку задействовать вычислительный потенциал многоядерных процессоров можно в случае, если разделить выполняемые вычисления на информационно-независимые блоки и организовать их выполнение на разных ядрах. Подобный подход позволяет выполнять вычисления с меньшими затратами времени, а также получать максимальное ускорение, которое ограничивается числом имеющихся ядер и «независимых» блоков в выполняемых вычислениях.

В настоящее время широкое применение получила технология CUDA (на англ. *Compute Unified Device Architecture*) – программно-аппаратная архитектура, позволяющая производить вычисления с использованием графических процессоров NVIDIA, поддерживающих технологию GPGPU (*General-Purpose computing on Graphics Processing Units*) произвольных вычислений на видеокартах.

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИИ CUDA

Вычислительная производительность современных графических ускорителей определяется в первую очередь характеристиками графических процессоров, на которых происходит реализация. Помимо CUDA существуют и другие решения, такие как PyCUDA, CUDAfy, OpenCL, AMD FireStream, производительность которых в сотни раз превышает аналогичные показатели центральных процессоров. Главной особенностью этих технологий является то, что GPU состоит из сотен малопроизводительных ядер с общей для всех кеш-памятью.

Технология CUDA предназначена для разработки приложений, реализуемых с помощью массивно-параллельных вычислительных устройств. CUDA SDK позволяет реализовывать на языках C/C++, Python и Fortran сложные алгоритмы, а также включать в текст программ функции, применяющиеся в графических процессорах. Эта платформа доступна разработчикам программного обеспечения через библиотеки с ускорением CUDA, директивы компилятора, такие как OpenACC, и расширения для стандартных языков программирования.

Эффективность решения задач с использованием видеокарт, в первую очередь, зависит от их характеристик. Например, графическая карта NVIDIA TITAN RTX, предназначенная для исследователей и разработчиков, обеспечивает высокую скорость параллельной обработки данных с одновременной передачей данных между GPU и памятью. Здесь необходимо ещё и программное обеспечение, которое позволит раскрыть все возможности GPU, а также грамотный подбор задач, решение которых можно представить в виде большого числа независимых информационных блоков. Таким образом, для реализации возможностей современных видеокарт необходимо соответствующее программное обеспечение, например технологии CUDA и трудоемкие задачи, алгоритмы решения которых можно распараллелить.

Алгоритмы делятся на три группы [2]: последовательные, последовательно-параллельные (ПП) и параллельные. Абсолютно последовательные алгоритмы не распараллеливаются и их реализация не вызывает затруднений, так как для этого достаточно одного процессора. Для строго параллельных алгоритмов также нет затруднений для реализации, если их число меньше или равно количеству работающих процессоров.

Даже если алгоритмов больше, то и этот вопрос решается положительно за счет масштабирования (подключение дополнительного числа процессоров).

Гораздо сложнее решается вопрос реализации ПП-алгоритмов:

- их надо еще предварительно распараллелить;
- следует определить число параллельных потоков (ветвей), так как именно они определяют загрузку рабочих процессоров;
- необходимо спланировать, запрограммировать и реализовать выполнение параллельной программы.

Часть указанных трудностей в организации параллельного вычислительного процесса можно избежать, применяя аппаратно-программные средства распараллеливания многоядерных процессоров (CPU) с дополнительным применением вычислений на графических процессорах GPU для решения сложных научных и технических задач, в частности задач обработки данных в системе контроля космического пространства (СККП). Снижение времени обработки данных для решения поставленных задач происходит за счет особой организации графического процессора, позволяющей реализовать параллельное выполнение подзадач. Таким образом, система расходует минимальные временные и технологические ресурсы и становится более выгодной с экономической точки зрения.

В архитектуре CUDA существует понятие ядра. *Ядром* называется параллельная подпрограмма, запускаемая на устройстве. Программу ядра параллельно выполняют несколько потоков (threads). Пакеты этих потоков организованы в *блоки* или *нити* потоков (blocks).

Блок потоков содержит в себе определенное количество нитей, выбираемых на основе количества свободной памяти, а также допустимых задержек доступа к ней. Количество нитей в блоке также ограничено функционально-логической и структурной организацией вычисли-

тельной машины. Взаимодействие нитей возможно только в пределах одного блока. Каждая нить в блоке имеет свой собственный идентификатор. Этот идентификатор доступен через встроенную переменную *threadIdx*. Блоки и нити концептуально организованы как одномерные, двумерные или трехмерные массивы – решетки (*grid*). Координаты потока в массиве определяются через переменную встроенную *blockIdx*.

Блоки потока объединяются в варпы (*warps*) по 32 элемента. Внутри варпов потоки выполняются параллельно на аппаратном уровне по принципу ОКМД (одна команда, множество данных). Таким образом, обеспечивается параллелизм на уровне данных. Компилятор CUDA и само устройство обеспечивают выполнение всеми потоками одинаковых инструкций как можно чаще. В случае, когда части потоков необходимо выполнить другой набор инструкций, остальные потоки входят в режим ожидания, что негативно сказывается на производительности. Во избежание таких ситуаций необходимо минимизировать использование ветвлений в ядрах.

Решетка (*grid*) – набор блоков потоков с одинаковой размерностью, которые выполняют одно и то же ядро. Решетки полезны для параллельного вычисления большого количества потоков, поскольку блоки потоков физически ограничены. Однако, блоки потоков в решетке могут не обмениваться данными через общую память а, следовательно, могут не синхронизироваться друг с другом.

На рис. 1 изображена иерархия организации потоков в CUDA [3]. Ядро содержит решетку блоков 3 x 2. Каждый блок потоков представляет собой блок потоков размером 6 x 3, что дает в общей сложности 108 потоков, параллельно выполняющих указанное ядро.

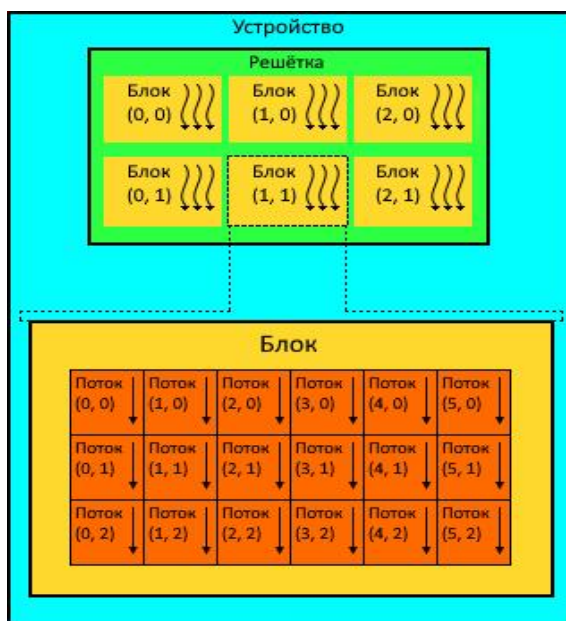


Рис.1. Иерархия организации потоков

При написании программы на CUDA можно определить количество потоков, которые необходимо запустить. Структура программы CUDA требует хранилища на двух устройствах – на хосте (компьютере), на котором выполняется программа, и на графическом процессоре устройства, выполняющем код CUDA. Каждый процесс хранения реализует модель памяти и имеет отдельный стек памяти и кучу. Это означает, что необходимо отдельно передавать данные с хоста на устройство. Каждый графический процессор обычно содержит встроенную глобальную память (*global memory*), называемую динамической памятью с произвольным доступом (DRAM), или памятью устройства. Этот тип памяти сохраняет данные в течение всей работы приложения. Блоки, в свою очередь, тоже имеют свою память, называемую

мую разделяемой памятью (*shared memory*). Каждый поток обладает своей локальной памятью (*local memory*). Управление этим типом памяти происходит автоматически.

Кроме вышеперечисленных типов памяти, существуют еще два типа общей кэшируемой памяти: константная и текстурная. Аналогично глобальной памяти содержащиеся в них данные также сохраняются на протяжении выполнения программы, однако они доступны только для чтения.

Чтобы выполнить ядро на графическом процессоре, необходимо написать код, который выделяет отдельную память на графическом процессоре. Это достигается за счет использования определенных функций, предоставляемых CUDA API. В программе реализуется следующая последовательность:

- выделение памяти на устройстве;
- перенос данных из памяти хоста в память устройства;
- запуск ядра на устройстве;
- перенос результата обратно из памяти устройства в память хоста;
- освобождение выделенной памяти на устройстве.

Примеры оценивания влияния применения технологии CUDA на скорость вычислений рассматривались в ряде статей. В частности, в [4] проводится сравнительный анализ скорости вычислений на центральном и графическом процессоре. В статье [5], аналогичный анализ проводится на примере решения прикладной задачи определения параметров орбиты продольного движения малого космического аппарата относительно базового космического аппарата [6].

Для оценки влияния распараллеливания по технологии CUDA был проведен эксперимент на примере решения задачи определения параметров орбиты космического аппарата (КА) в Гринвической системе координат (ГСК) с помощью численного интегрирования дифференциальных уравнений методом Рунге Кутты 4-го порядка.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Дано:

1. Дифференциальные уравнения движения КА в Гринвической системе координат – система дифференциальных уравнений четвертого порядка для неизвестных функций $X = x(t)$, $Y = y(t)$, $Z = z(t)$ в виде [7]:

$$\begin{cases} \ddot{X} = 2\omega\dot{Y} - \frac{\mu X}{r^3} + \omega^2 X, \\ \ddot{Y} = 2\omega\dot{X} - \frac{\mu Y}{r^3} + \omega^2 Y, \\ \ddot{Z} = -\frac{\mu Z}{r^3}. \end{cases}$$

В формуле введены следующие обозначения:

X, Y, Z – координаты радиуса-вектора положения спутника в ГСК;

ω – угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси, $\omega = \frac{2\pi}{T} \approx 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$;

μ – геоцентрическая гравитационная постоянная, численное значение которой принимается равным $\mu = 3,9860044 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$;

r – расстояние от Земли до КА (высота орбиты).

2. Начальные исходные данные на момент $t = 0$:

x_0, y_0, z_0 – координаты радиус-вектора положения КА в ГСК в момент времени $t=0$;
 $V_{x_0}, V_{y_0}, V_{z_0}$ – проекции вектора скорости спутника на оси ГСК в момент времени $t=0$.

3. Расчетные формулы метода Рунге – Кутты решения дифференциальных уравнений четвертого порядка:

$$\vec{y}(t+h) = \vec{y}(h) + \frac{(\vec{k}_1 + 2\vec{k}_2 + 2\vec{k}_3 + \vec{k}_4)}{6} + \vec{O}(h^5),$$

где $\vec{k}_1 = hA\vec{y}(t) + hf(t)$,

$$\vec{k}_2 = hA\left(\vec{y}(t) + \frac{\vec{k}_1}{2}\right) + hf\left(t + \frac{h}{2}\right),$$

$$\vec{k}_3 = hA\left(\vec{y}(t) + \frac{\vec{k}_2}{2}\right) + hf\left(t + \frac{h}{2}\right),$$

$$\vec{k}_4 = hA(\vec{y}(t) + \vec{k}_3) + hf(t+h).$$

Требуется рассчитать прогноз движения космического аппарата (КА) по заданным начальным условиям:

1. Задать уравнения движения КА в нормальной форме.
2. Рассчитать координаты положения и проекции вектора скорости КА методом Рунге – Кутты 4-го порядка на заданный промежуток времени $[T_0, Y_{зад}]$ (шаг $h = 400$ с) с применением CUDA.

3. Вычислить скорость движения КА $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ на заданный момент времени.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА РУНГЕ – КУТТА С РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ПО ТЕХНОЛОГИИ CUDA

В работе [9] программно реализован метод Рунге – Кутта с использованием технологии CUDA, содержащей объявления устройств для ряда переменных (`dev_x0`), а также операции выделения памяти с помощью метода `cudaMalloc()`, копирования значений с помощью метода `cudaMemcpy()` из хоста в устройство и обратно.

Программа предназначена для расчета орбит космических аппаратов с использованием распараллеливания на графических процессорах по заданным начальным условиям. Помимо начальных условий в программе задаются время τ , на момент которого необходимо рассчитать положение КО, удовлетворяющее условию $0 \leq \tau \leq t$, а также угловая скорость движения ω . Боковое движение рассчитывалось для углового положения орбиты от 0 до 359°, высоты круговой орбиты от 100 до 500 км (для большей вычислительной нагрузки) и трех различных вариантов управляющего воздействия.

Приведенные вспомогательные операции составляют накладные расходы ресурсов времени и памяти при использовании технологии CUDA. Отсюда следует, что выигрыш в оперативности на основе применения технологии CUDA возникает не всегда, а при условии наличия нескольких параллельно обрабатываемых потоков. Распараллеливание проводилось для пяти наборов векторов координат и проекций скоростей методом Рунге – Кутты 4-го порядка с шагом 400 с. На расчет параметров движения КО с помощью центрального процессора потребовалось 0,0040 с. С помощью GPU на расчет параметров движения понадобилось 0,0029 с (рис. 3). Таким образом, уменьшение времени расчета параметров орбиты составило 27,5%.

Расчеты проводились на ноутбуке Acer Nitro AN515-54, процессор Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU 2.40GHz. Установленная память (ОЗУ 8.00 ГБ); 64-разрядная операционная система Windows 10, процессор x64. Видеоадаптер NVIDIA GeForce RTX 2060 (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики NVIDIA GeForce RTX 2060

CUDA-ядра, шт.	1920
Производительность FP32, GFLOPS	6221
Тензорные ядра, шт.	240
RT-ядра, шт.	30

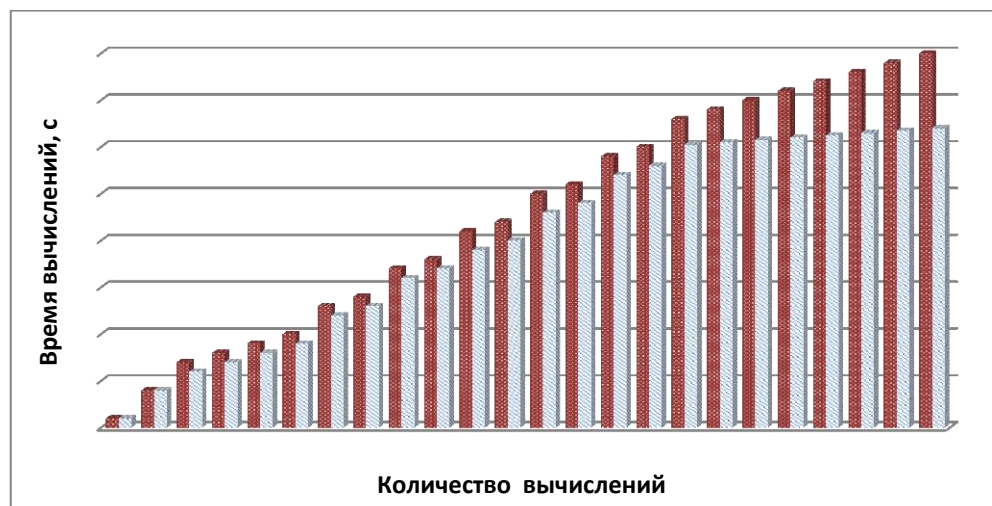




Рис. 3. Сравнение времени расчета параметров орбиты, где  – CPU;  – GPU

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный компьютерный эксперимент по повышению оперативности обработки информации для задачи расчета параметров орбит КА на основе параллельных вычислений с применением графических процессоров и технологии CUDA позволяет сделать следующие выводы:

- использование рассмотренной технологии позволяет повысить оперативность обработки информации с использованием GPU по технологии CUDA по сравнению с CPU;
- для достижения выигрыша по оперативности параллельных вычислений с использованием технологии CUDA обязательна организация совместной обработки нескольких независимых друг от друга потоков вычислений (например, независимых массивов исходных данных в СККП);
- дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлениях оценивания целесообразности применения технологии CUDA для решения прикладных задач, связанных с обработкой больших объемов информации [7, 8].

Список используемых источников

1. Оценка влияния параллельной обработки изображений на оперативность функционирования БКУ ка дистанционного зондирования Земли / А.И. Захаров [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 61–71.
2. Модели и методы исследования информационных систем: моногр. / А.Д. Хомоненко [и др.]; под ред. А.Д. Хомоненко. – СПб.: Лань, 2019. – 204 с.

3. *Боресков А.В., Харламов А.А.* Основы работы с технологией CUDA. – М.: ДМК-Пресс, 2016. – 232 с.
4. *Мальцев Н.С., Молодкин И.А., Гильванов Р.Г.* Сравнительный анализ скорости вычислений на центральном и графическом процессоре // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2020. – № 2. – С. 51–58.
5. Estimation of the characteristics of complex objects using big data technologies / A.D. Khomonenko [et al.] // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. – Vol. 2803. – P. 123–128.
6. *Аверьянов А.В.* Аналитический метод расчета движения малого космического аппарата, связанного с базовым космическим аппаратом // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 4. – С. 75–77.
7. *Мелешко А.В., Онуфрей А.Ю., Пятков В.В.* Синтез цифрового многомерного следящего измерителя координат объекта // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 670. – С. 69–75.
8. Особенности баллистического обеспечения полетов космических аппаратов серии «Можаяец» / Н.Ф. Аверкиев [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 640. – С. 20–25.
9. Свид. о регистрации программы для ЭВМ № RU 2021614741 / Молодкин И.А., Зимовец А.И., Хомоненко А.Д. – 2021.

С. Альсаед;
В.В. Ефимов,
доктор технических наук, профессор

МЕТОД КОРРЕКЦИИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предлагается метод коррекции погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) беспилотного летательного аппарата (БЛА) в интересах повышения автономности функционирования интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы (ИИСНС) в условиях радиоэлектронного подавления (РЭП) каналов спутниковой навигации. Метод основан на построении модели погрешностей БИНС с помощью нейроподобных сетей (НС), обучаемых по навигационным параметрам, которые формируются ИИСНС на этапе до применения средств РЭП. Приводится функциональная структура ИИСНС с нейросетевым аппроксиматором погрешностей БИНС.

Ключевые слова: аппроксимация погрешностей, беспилотный летательный аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, нейроподобная сеть.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ современного этапа развития авиационной техники свидетельствует о широко-масштабном и многоцелевом применении беспилотных летательных аппаратов и авиационных систем на их основе для решения задач целевого и обеспечивающего характера [1, 2]. Эффективность применения БЛА подтверждается практикой их использования в ходе проведения целого ряда операций в период с 2018 по 2020 год в различных регионах планеты. Высокие темпы развития нового вида авиационной техники и расширение области ее практического применения, в которой БЛА превосходят по показателю «результативность/стоимость» пилотируемую авиационную технику, обусловили необходимость разработки и создания соответствующих комплексов и систем противодействия им [3–5].

Основные способы противодействия БЛА базируются на применении зенитно-ракетных и зенитно-артиллерийских комплексов противовоздушной обороны (ПВО), средств РЭП и радиоэлектронной борьбы, а также комплексов функционального поражения СВЧ и лазерным излучением. Опыт боевого применения комплексов ПВО в интересах огневого поражения БЛА показал чрезвычайно низкую эффективность и экономическую нецелесообразность данного способа противодействия, особенно для малоразмерных и низкоскоростных БЛА. Средства поражения СВЧ-излучением в настоящее время находятся в стадии разработки, и реальных данных об эффективности их применения как средств противодействия БЛА нет. Лазерные комплексы обладают потенциально более высокой эффективностью, но негативно отличаются существенной зависимостью от метеоусловий и требуют высокоточного наведения и удержания луча на корпусе БЛА. Приведенные факты свидетельствуют о том, что противодействие БЛА наиболее вероятно будет реализовано на основе радиоэлектронного подавления радиолиний управления и передачи данных, а также каналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС). Обоснованность последнего тезиса дополнительно подтверждается тем фактом, что в периоды непосредственной угрозы и ведения боевых действий функциональное подавление навигационной аппаратуры потребителей (НАП) СРНС в зоне вооруженного конфликта будет первостепенной задачей противодействующей стороны.

Современные подходы к построению бортовых комплексов управления БЛА предполагают использование интегрированных навигационных систем [6, 7]. Обязательными компонентами таких систем являются НАП СРНС и БИНС.

В качестве дополнительного навигационного оборудования могут использоваться радиобаровысотомеры, а также радиолокационные, лазерные или оптико-электронные средства наблюдения подстилающей поверхности, обеспечивающие навигацию БЛА по цифровым картам местности. В условиях функционального подавления НАП СРНС средствами РЭП противоборствующей стороны основным источником информации о навигационных параметрах БЛА остается БИНС, характеризующаяся постоянным возрастанием погрешностей навигационных определений. Известные модели БИНС предполагают наличие информации о погрешностях инерциальных измерителей (акселерометров и датчиков угловых скоростей) и ошибках ввода начальных условий [6, 8]. На практике такая информация известна с высокой степенью неопределенности. Кроме того, указанные модели не учитывают зависимость ошибок БИНС от режимов полета БЛА, которая, как показывают результаты исследований, существенна [9].

В данной статье предлагается на этапе полета БЛА, когда НАП СРНС неработоспособна вследствие воздействия средств РЭП противоборствующей стороны, корректировать БИНС по результатам моделирования ее погрешностей с помощью НС, обучаемых на этапе до начала воздействия средств РЭП. В отличие от известных подходов к использованию технологий искусственного интеллекта для повышения точности интегрированных навигационных систем [10], предлагаемый метод при построении модели погрешностей БИНС предусматривает учет не только текущего состояния объекта, но и режимов его полета.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим систему управления движением и навигации БЛА, функциональная схема которой изображена на рис. 1.

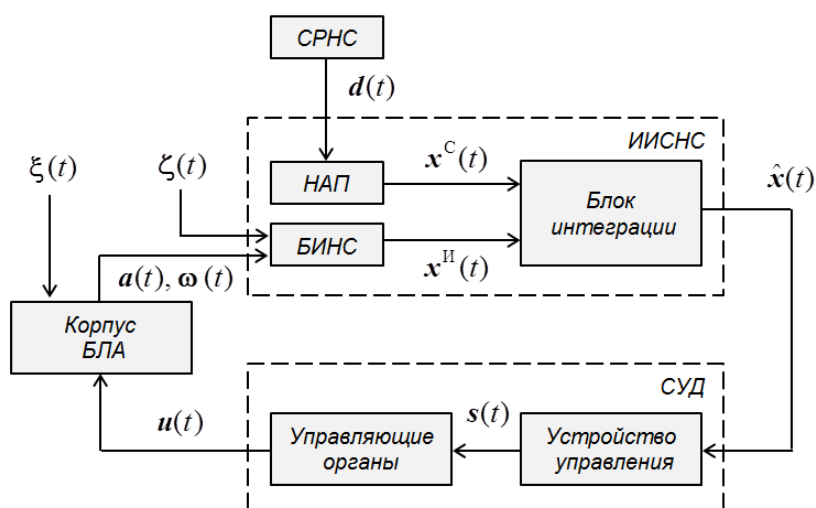


Рис. 1. Функциональная схема системы управления движением и навигации БЛА

Система представляет собой замкнутый контур, образованный объектом управления (БЛА), интегрированной навигационной системой ИИСНС и системой управления движением (СУД). В состав ИИСНС входят НАП СРНС, БИНС и блок интеграции, реализующий комплексирование по слабосвязанной схеме [6, 8].

Пусть динамика объекта управления описывается векторно-матричным обыкновенным дифференциальным уравнением вида

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{G}(t)\boldsymbol{\xi}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния объекта управления в момент времени t ;
 $\mathbf{u}(t)$ – вектор управляющих воздействий (сил и моментов сил), прикладываемых к корпусу БЛА;
 $\boldsymbol{\xi}(t)$ – вектор возмущений;
 $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{B}(t)$ и $\mathbf{G}(t)$ – матрицы состояния, управления и возмущения соответственно.

Управляющие органы, входящие в состав СУД, формируют управляющие воздействия $\mathbf{u}(t)$ в соответствии с сигналами $s(t)$ устройства управления, реализующего законы управления движением БЛА в форме обратной связи по оценкам текущего вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}(t)$. Значения управляющих сигналов $s(t)$ определяют режим полета БЛА.

Оценка текущего состояния БЛА $\hat{\mathbf{x}}(t)$ формируется в ИИСНС на основе интегрированной обработки вектора состояния $\mathbf{x}^C(t)$, сформированного НАП по полученным от спутников СРНС эфемеридной информации, псевдодальностям и псевдоскоростям $\mathbf{d}(t)$, а также вектора состояния $\mathbf{x}^H(t)$, сформированного БИНС по результатам измерений с помощью акселерометров и датчиков угловых скоростей (ДУС) соответственно вектора кажущегося ускорения $\mathbf{a}(t)$ и вектора абсолютной угловой скорости БЛА $\boldsymbol{\omega}(t)$ и численного интегрирования навигационных уравнений. Результаты измерений акселерометров и ДУС зашумлены случайными погрешностями $\boldsymbol{\zeta}(t)$. Совместная обработка с помощью фильтра Калмана спутниковой и инерциальной навигационной информации дает высокую точность оценивания параметров состояния объекта в условиях, когда справедливы допущения о характере действующих на БЛА возмущений $\boldsymbol{\xi}(t)$ и измерительного шума $\boldsymbol{\zeta}(t)$ (они должны быть гауссовскими белыми шумами с нулевым математическим ожиданием и должны обладать статистической независимостью) и известны корреляционные матрицы этих случайных процессов.

На практике, в первую очередь при использовании в составе БИНС микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков, такие допущения выполняются далеко не в полном объеме, что приводит к большим погрешностям оценивания параметров состояния объекта управления в ИИСНС. Кроме того, реальные условия применения ИИСНС характеризуются пропаданием сигналов от спутников СРНС, обусловленным естественным влиянием внешней среды или целенаправленным подавлением средствами противоборствующей стороны. В целях обеспечения требуемой точности навигационных определений в таких условиях используются технологии искусственного интеллекта, в частности нейророботные сети [10].

Предлагаемые подходы к использованию нейросетевых технологий для повышения точности ИИСНС в условиях отсутствия сигналов от спутников СРНС характеризуются многообразием применяемых архитектур НС, схем их включения в структуру ИИСНС, состава входных и выходных параметров используемых моделей погрешностей БИНС. При этом каждое решение обладает определенными преимуществами по сравнению с другими только в конкретных условиях. Кроме того, ни в одной из предложенных схем не реализован учет влияния режима движения объекта на погрешности его навигационных определений.

МЕТОД КОРРЕКЦИИ БИНС НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Учет влияния режима движения объекта управления при построении нейросетевой модели погрешностей интегрированной навигационной системы впервые был предложен в статье [11]. В настоящей работе рассматривается вариант конкретной реализации данного подхода.

Известные сегодня решения по повышению точности ИИСНС в условиях пропадания сигнала СРНС с помощью нейросетевых средств [10] реализуются по двум схемам: компенсационной, когда НС используется вместо фильтра Калмана НАП СРНС, и дополняющей, когда НС используется совместно с фильтром Калмана, работающим в прогнозном режиме. При этом для построения моделей погрешностей навигационных определений применяются НС различной архитектуры:

- многослойные персептроны;
- НС каскадной корреляции;
- НС радиально-базисных функций;
- вейвлет-нейронные сети;
- однослойные НС с экстремальным алгоритмом обучения.

В качестве компонентов входного вектора НС используются наборы параметров движения БЛА: скорость и азимут движения; координаты положения и время; скорость и координаты положения; кажущееся ускорение и абсолютная угловая скорость; координаты, линейная и угловая скорости, углы ориентации. Компонентами выходного вектора НС в большинстве случаев являются погрешности координат и скорости.

Предлагаемый метод может быть реализован как по компенсационной, так и по дополняющей схеме использования нейросетевых моделей погрешностей. Рассмотрим основные этапы метода в случае реализации компенсационной схемы, в которой в качестве компонентов выходного вектора НС используются координаты положения, линейной скорости движения БЛА и параметры его ориентации.

Этап 1. На интервале времени до начала применения средств подавления СРНС, когда БЛА осуществляет полет в штатном режиме, одновременно формируется множество нейросетевых моделей погрешностей БИНС, отличающихся архитектурой и составом входных векторов. Функционально каждая НС описывается соответствующей этой сети зависимостью вида

$$\delta_i^{\text{HC}}(t) = f_i^{\text{HC}}(b_i^{\text{HC}}(t), x^{\text{И}}(t), s(t), t), \quad (2)$$

где $\delta_i^{\text{HC}}(t)$ – формируемый i -й НС вектор погрешностей БИНС;

$f_i^{\text{HC}}(\cdot)$ – реализуемая i -й НС векторная функция, определяемая ее архитектурой;

$b_i^{\text{HC}}(t)$ – вектор параметров i -й НС, определяемых в процессе ее обучения;

$i \in \overline{1, N}$ – условный номер НС (здесь N – количество нейросетевых моделей).

Обучение каждой i -й НС осуществляется по выходной информации ИИСНС $\hat{x}(t)$, которая на данном этапе принимается за эталонную, при этом вектор параметров $b_i^{\text{HC}}(t)$ определяется из условия

$$b_i^{\text{HC}}(t) = \arg \min_{B_i^{\text{HC}}} \left\| \delta_i^{\text{HC}}(t) - (x^{\text{И}}(t) - \hat{x}(t)) \right\|, \quad (3)$$

где B_i^{HC} – множество допустимых значений параметров i -й НС;

$\| \cdot \|$ – норма в пространстве состояний БЛА.

Этап 2. На данном этапе БЛА реализует априори заданную последовательность типовых режимов полета $\{s_j(\tau), j \in \overline{1, M}, \tau \in [t_j, t_j + \Delta t_j]\}$, где j – условный номер типового режима полета, M – количество типовых режимов, t_j и Δt_j – соответственно момент начала и продолжительность j -го типового режима. Каждый временной интервал типового режима полета БЛА делится на две части: $\Delta t_j = \Delta' t_j + \Delta'' t_j$. В течение $\Delta' t_j$ первой части временного интервала типового режима осуществляется обучение всех НС, в течение второй части $\Delta'' t_j$ про-

водятся их тестирование и сравнительный анализ точности реализуемых ими моделей погрешностей БИНС. По результатам сравнительного анализа определяется НС, наиболее точно воспроизводящая модель погрешностей БИНС:

$$i^*(j) = \arg \min_{i \in \overline{1, N}} \int_{t_j + \Delta t_j}^{t_j + \Delta t_j} \left\| f_i^{\text{НС}}(\mathbf{b}_i^{\text{НС}}(\tau), \mathbf{x}^{\text{И}}(\tau), s_j(t), \tau) - (\mathbf{x}^{\text{И}}(\tau) - \hat{\mathbf{x}}(\tau)) \right\| d\tau \quad \forall j \in \overline{1, M}. \quad (4)$$

Этап 3. Анализируется качество обеспечения ИИСНС навигационной информацией от спутников СРНС. Если качество спутникового навигационного обеспечения соответствует заданным требованиям, то ИИСНС БЛА работает в штатном режиме на основе интеграции спутниковой навигационной информации и параметров состояния объекта, определяемых БИНС. В противном случае канал НАП СРНС отключается, и БЛА переводится в режим автономного функционирования на основе навигационных измерений БИНС и их коррекции с помощью нейросетевых моделей погрешностей.

Этап 4. На этапе автономного функционирования БЛА сформированные устройством управления СУД сигналы $s(t)$, характеризующие текущий режим полета объекта, обрабатываются управляющими органами СУД и одновременно подаются в ИИСНС, где определяются тип режима $j \in \overline{1, M}$, к которому относится текущий режим полета $s(t)$, и условный номер $i^*(j)$ нейросетевой модели, наиболее точно описывающей погрешности БИНС в данном типовом режиме полета. Оценка текущего состояния БЛА формируется по вектору состояния, измеренному БИНС, и моделируемой выбранной НС погрешности в соответствии с выражением

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}^{\text{И}}(t) - \delta_{i^*(j)}^{\text{НС}}. \quad (5)$$

При изменении режима полета определяется новое значение его условного номера j и осуществляется переход к другой нейросетевой модели погрешности БИНС, характеризующейся наиболее высокой точностью аппроксимации.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ИИСНС БЛА С НЕЙРОСЕТЕВЫМ АППРОКСИМАТОРОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ БИНС

На рис. 2 представлена функциональная структура ИИСНС БЛА с нейросетевым аппроксиматором погрешностей БИНС.

Данная архитектура представляет один из возможных вариантов реализации предложенного метода, когда нейроподобные сети аппроксимируют погрешности БИНС в форме моделей вида (2), на вход которых подается формируемый БИНС вектор состояния $\mathbf{x}^{\text{И}}(t)$. В общем случае на входы НС, входящих в состав банка нейросетевых моделей, могут подаваться векторы кажущегося ускорения $\mathbf{a}(t)$ и абсолютной угловой скорости $\boldsymbol{\omega}(t)$ БЛА, измеряемые инерциальными датчиками БИНС, или вектор $\mathbf{d}(t)$ псевдодальностей и псевдоскоростей, формируемый на этапе обучения НС штатно функционирующей НАП СРНС, а на этапе моделирования погрешности – по результатам работы входящего в состав НАП фильтра Калмана, работающего в режиме предсказания. При этом входные векторы нейросетевых моделей могут быть как одинаковыми для всех НС банка моделей, так и различными.

Общим для всего множества возможных архитектур является включение в состав входных данных НС вектора управляющих сигналов $s(t)$, характеризующих режим полета БЛА, и выбор номера $i^*(j)$ наиболее точной модели по условному номеру типового режима полета.

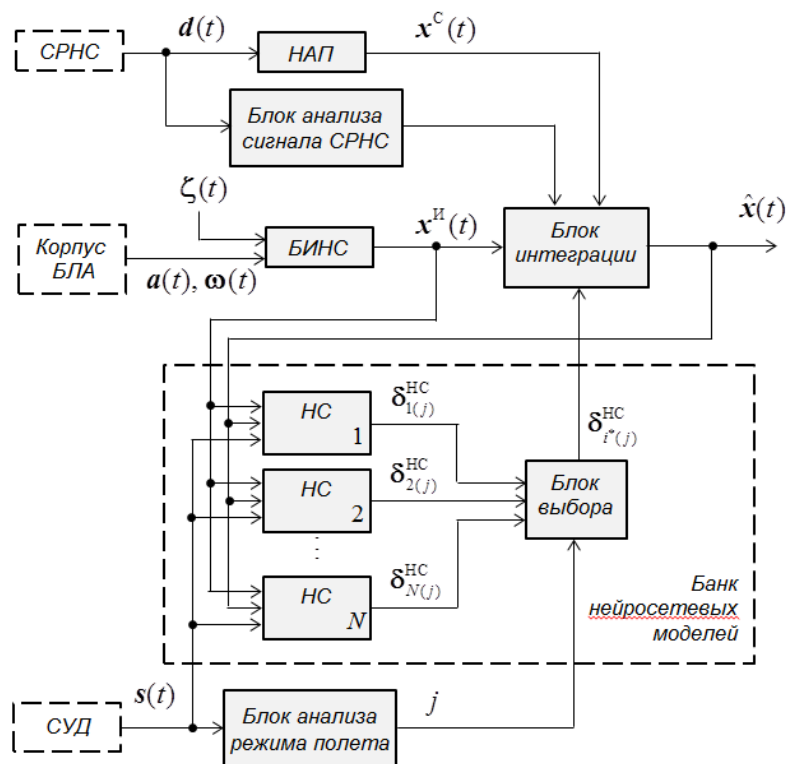


Рис. 2. Функциональная структура ИИСНС БЛА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе дополнительного введения функционального замыкания нейросетевого аппроксиматора погрешностей БИНС контуром, несущим информацию о режимах полета БЛА, предложенный метод реализует более полный по сравнению с известными подходами учет основных факторов, определяющих величины и характер изменения ошибок навигационных измерений, и тем самым обеспечивает возможность увеличения длительности интервала автономного функционирования ИИСНС в условиях подавления каналов спутниковой навигации средствами противоборствующей стороны.

Метод рассмотрен в приложении к задаче навигационного обеспечения БЛА, хотя может быть использован и при создании ИИСНС других подвижных объектов – наземных транспортных средств, надводных кораблей, самолетов и космических аппаратов, функционирующих в условиях пропадания сигналов спутникового радионавигационного поля.

За рамками содержания настоящей статьи остался ряд важных вопросов:

- проведение математического моделирования и численных исследований показателей качества предлагаемого метода;
- обоснование вариантов построения интегрированных навигационных систем, реализованных по сильносвязанной и глубокоинтегрированной схемам комплексирования БИНС, НАП СРНС и других источников навигационной информации (радиобаровысотометров, радиолокационных, лазерных или оптико-электронных средств наблюдения подстилающей поверхности);
- определение рационального состава и параметрических границ типовых режимов полета БЛА;
- исследование влияния погрешностей формирования управляющих воздействий, определяющих режим полета БЛА.

Разработка данных вопросов является целью дальнейших исследований в рассматриваемой предметной области.

Список используемых источников

1. *Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б., Чередников И.Ю.* Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения тактической радиолокационной разведки // Военная мысль. – 2016. – № 3. – С. 24–28.
2. Применение разведывательно-ударных групп беспилотных летательных аппаратов малого класса по объектам аэродромных участков дорог / А.В. Ананьев [и др.] // Военная мысль. – 2020. – № 1. – С. 85–97.
3. *Макаренко С.И.* Противодействие беспилотным летательным аппаратам. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
4. *Тикшаев В.Н., Барвиненко В.В.* Проблема борьбы с беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. – 2021. – № 1. – С. 125–132.
5. *Степанов А.* Зарубежные комплексы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам // Зарубежное военное обозрение. – 2021. – № 3. – С. 60–132.
6. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.
7. *Моисеев В.С.* Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами. – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования». – 768 с. – (Современная прикладная математика и информатика).
8. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
9. *Кузнецов А.Г., Портнов Б.И., Измайлов Е.А.* Современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы двух классов точности // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. – 2014. – № 8. – С. 24–32.
10. *Аль Битар Н, Гаврилов А.И., Хадаф В.* Методы на основе искусственного интеллекта для повышения точности интегрированной навигационной системы при отсутствии сигнала ГНСС. Аналитический обзор // Гироскопия и навигация. – 2019. – № 4 (107). – С. 3–28.
11. *Ефимов В.В., Пасталака В.В.* Повышение автономности интегрированной навигационной системы космического аппарата на основе нейросетевого подхода // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – № 1. – С. 12–19.

С.О. Бурлаков*,
доктор технических наук, профессор;

С.С. Кузнецов*;

Д.В. Леванов**;

К.Ю. Цветков**,

доктор технических наук, профессор;

А.Г. Шадрин**,

кандидат технических наук

*ВАС имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург.

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

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ РАДИОЛИНИИ ПРИВЯЗКИ ЛЕТНО-ПОДЪЕМНОГО СРЕДСТВА НА МАРШРУТЕ ПОЛЕТА

В статье рассматривается линия привязки с летно-подъемным средством как совокупность линий спутниковой и радиорелейной связи. Предлагается оценивать экранирование нескольких зон Френеля. Представлена методика оценки коэффициента готовности на маршруте полета, которая позволяет оценивать коэффициент готовности на коротком интервале времени, соизмеримом с длительностью сеанса связи, и ставить задачу на выбор рационального режима ее работы. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: летно-подъемное средство, маршрут полета, линия привязки, интервал наблюдения, затухание сигнала, вероятность ошибки бита, коэффициент готовности.

ВВЕДЕНИЕ

Использование летно-подъемных средств (ЛПС) для разведки, связи, управления, огневого поражения становится все более востребованным. Во время полета ЛПС возможно пропадание связи между ЛПС и наземным пунктом (НП) из-за погодных условий и предметов местности. Вследствие специфики решаемых задач интервалы отсутствия связи не должны быть длительными, что определяет специфику оценки коэффициента готовности радиолинии привязки (РЛП) и постановку задачи выбора режима ее работы во время полета ЛПС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Степень удовлетворения РЛП, которая по своей сути является радиорелейным интервалом, предъявляемым требованиям оценивается коэффициентом готовности. Согласно руководящим документам при оценке радиорелейной линии $T_{св}=24$ ч. Указанный интервал наблюдения неприемлем для РЛП во время полета, так как при решении задачи выбора и перестройки режима работы РЛП необходимо прогнозировать изменение качества связи. С учетом изменения высоты, скорости полета ЛПС, метеорологических условий, типа подстилающей поверхности точность прогноза будет резко уменьшаться с увеличением его глубины. Исходя из этого с учетом динамики информационного обмена интервал наблюдения целесообразно установить равным 2 мин, что составляет среднюю продолжительность телефонного разговора.

При полете ЛПС условия распространения радиоволн, значение отношения сигнал/шум (SNR) h^2 на входе приемника, вероятность ошибки приема бита $p_{ош}$ будут меняться. Подход к определению интервалов готовности и неготовности линии связи при передаче данных (пакетного трафика) определен в работе [1]. При определении событий ES (errored second), SES

(severely errored second), периодов неготовности и готовности интервал наблюдения составляет 10 с, при отсутствии связи в течение которого сетевое соединение не разорвется. Исходя из этого целесообразно оценивать временные интервалы неготовности РЛП отрезками (слотами) длительностью $T_{сл}=10$ с. Количество слотов $N_{сл} = T_{св}/T_{сл}$. Условие $p_{ош} > p_{ош}^*$ свидетельствует о неготовности слота $T_{нп}=T_{сл}=10$ с.

При таком подходе коэффициент готовности РЛП будет оцениваться дискретно с шагом $\Delta K_{г} = T_{сл}/T_{св}$ и будет принимать значения $K_{г} = [1, 1 - T_{сл}/T_{св}, 1 - nT_{сл}/T_{св}]$, где $n = 0, \dots, N_{сл}$.

Таким образом, подход к определению и повышению коэффициента готовности РЛП предполагает такую последовательность операций (рис. 1):

1) оценка суммарного затухания радиосигнала и вероятности ошибки бита на каждом слоте, оценка коэффициента готовности РЛП на длительности наблюдения $K_{г}(T_{св})$, определение интервалов (слотов) неготовности (длительность операции $\Delta T_{оц}$);

2) выбор рационального режима работы РЛП для каждого слота (длительность операции $\Delta T_{выб}$);

3) доведение до приемника НП данных о новом режиме работы (длительность операции $\Delta T_{дов}$);

4) перестройка РЛП (передатчика ЛПС и приемника НП) в новый режим работы (длительность операции $\Delta T_{пер}$).

Так как во время перестройки режима работы РЛП связь прекращается, то эту операцию целесообразно выполнять в слоте неготовности РЛП.

На рисунке показано, что в моменты $t_0, t_1, t_4 - t_9, t_{11}, t_{12}$ с целью повышения коэффициента готовности РЛП перестройка режима работы РЛП не требуется.

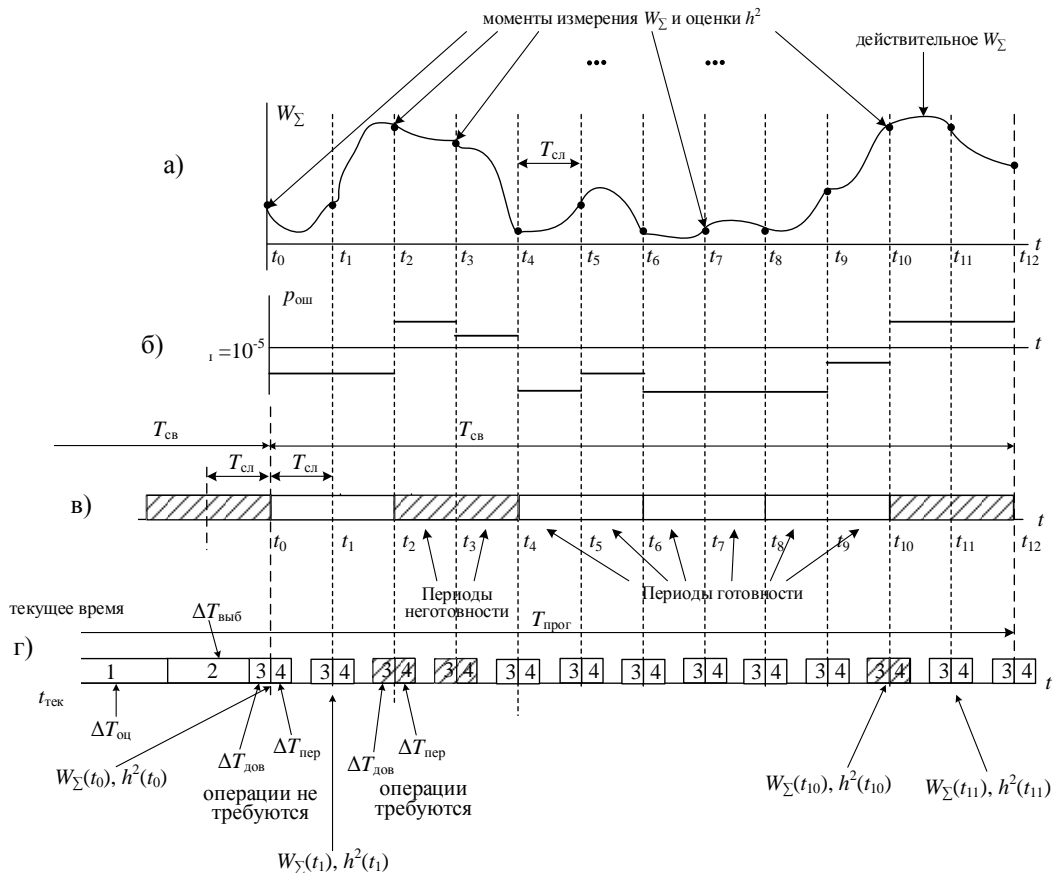


Рис. 1. К постановке задачи выбора режима работы радиосвязи: а – изменение суммарного затухания радиосигнала; б – вероятность ошибки бита, вычисленная на слоте; в – периоды (слоты) готовности и неготовности РЛП; г – последовательность операций по повышению коэффициента готовности РЛП

Задача управления режимом работы РЛП формулируется следующим образом. По исходным данным, полученным в текущий момент времени $t_{\text{тек}}$ на глубину прогнозирования $T_{\text{прог}} = \Delta T_{\text{оц}} + \Delta T_{\text{выб}} + \Delta T_{\text{дов}} + T_{\text{св}}$, определить коэффициент готовности РЛП на интервале времени $T_{\text{св}}$. В случае неудовлетворения предъявляемому требованию $K_{\Gamma}(T_{\text{св}}) < K_{\Gamma}^*(T_{\text{св}})$ определить слоты неготовности РЛП [1]. Для этих слотов определить рациональный режим работы РЛП.

Целью методики является оценка отношения сигнал/шум h^2 и вероятности ошибки $p_{\text{ош}}$ на входе приемника корреспондента на длительности i -го слота $T_{\text{сли}}$, определение факта готовности РЛП на $T_{\text{сли}}$ согласно условию [1]

$$\begin{cases} p_{\text{ош}}(t_i) > p_{\text{ош}}^* \Rightarrow T_{\text{сли}} \equiv T_{\text{нг}} \\ p_{\text{ош}}(t_i) < p_{\text{ош}}^* \Rightarrow T_{\text{сли}} \equiv T_{\Gamma} \end{cases}, \quad (1)$$

а также оценка коэффициента готовности РЛП на длительности связи $T_{\text{св}}$ [2]

$$K_{\Gamma} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N T_{\text{нг}i}}{T_{\text{св}}}. \quad (2)$$

Согласно специфике функционирования РЛП с ЛПС ее энергетическая модель будет являться совокупностью энергетических моделей линии спутниковой связи [3] и наземной линии радиорелейной связи, которая актуальна при малых углах места или при экранировании зоны, существенной для распространения радиоволн.

Кроме ослабления сигнала в свободном пространстве в РЛП имеют место дополнительные затухания, характерные для спутниковой связи.

Будем считать, что известны величины, входящие в основное уравнение радиосвязи: номиналы частот, высота летательного аппарата (ЛПС), коэффициенты усиления земных и бортовых антенн, КПД фидерных трактов. Также будем считать известными параметры сигнала-кодированной конструкции, прежде всего модуляцию и кодирование. Задача расчета состоит в вычислении отношения SNR на конце линии связи при заданных значениях мощностей земного и бортового передатчиков либо в определении мощностей этих передатчиков по требуемому значению SNR.

Дополнительные потери обусловлены влиянием факторов, указанных в работе [3],

$$W_{\text{доп}} = W_{\text{а}} + W_{\text{д}} + W_{\text{н}} + W_{\text{п}} + W_{\text{дп}} + W_{\text{ф}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{а}}$ – затухание, обусловленное поглощением радиоволн в атмосфере;

$W_{\text{д}}$ – затухание в гидрометеорах;

$W_{\text{н}}$ – рефракционные потери наведения антенн;

$W_{\text{п}}$ – потери из-за несогласованности поляризации антенн;

$W_{\text{дп}}$ – потери за счет деполяризации электромагнитной волны;

$W_{\text{ф}}$ – потери вследствие фазовой дисперсии сигнала.

РАСЧЕТ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА В РАДИОЛИНИИ ЗА СЧЕТ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА МАРШРУТЕ ПОЛЕТА

Расчет преследует следующие цели:

1. Определить факт наличия прямого луча в точке приема. При его отсутствии временной слот является интервалом неготовности, и задача выбора рационального режима работы РЛП не решается.

2. Вычислить затухание сигнала за счет рельефа $W_{\text{р}}$ с учетом экранирования объектами местности зоны, существенной для распространения радиоволн $S_1/3$, где S_1 – площадь первой зоны Френеля (рис. 2). Задача решается один раз за $T_{\text{сл}}/2$.

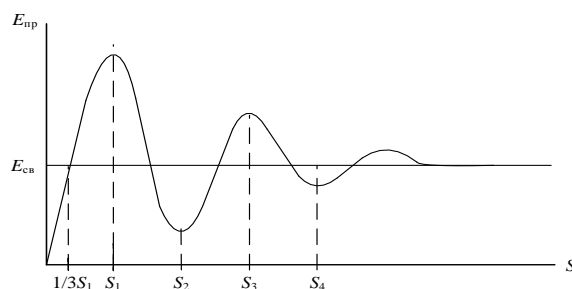


Рис. 2. Зоны Френеля

Очевидно, что возможно экранирование препятствием не только зоны, существенной для распространения радиоволн (ЗСРВ), но и зон Френеля с большими номерами. Это приводит как к увеличению мощности сигнала в точке приема (при экранировании четных зон), так и к ее уменьшению (при экранировании нечетных зон), что показано на рис. 3.

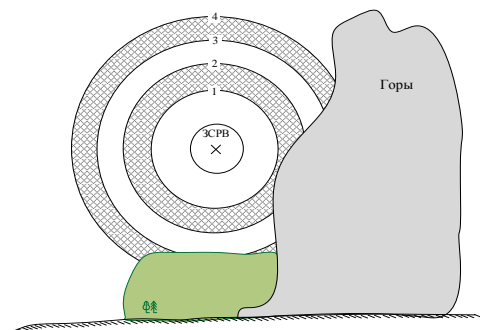


Рис. 3. Экранирование зон Френеля объектами местности

При оценке геометрических размеров РЛП необходимо учитывать, что они зависят от размера зоны обслуживания ЛПС. Радиус этой зоны будет увеличиваться с увеличением высоты полета ЛПС. Предельная дальность радиосвязи прямой видимости [4]

$$R_{\text{пред}} = \sqrt{(h_{\text{НП}} + R_3)^2 - R_3^2} + \sqrt{(h_{\text{ЛПС}} + R_3)^2 - R_3^2}, \quad (4)$$

где R_3 – радиус Земли, при этом $R_3 = 6370$;

$h_{\text{НП}}, h_{\text{ЛПС}}$ – высоты подъема антенны наземного пункта (НП) и полета ЛПС над Землей соответственно.

Под предельной дальностью понимается расстояние между ЛПС и НП, при котором линия, соединяющая антенны, касается земли.

Учитывая, что $R_3 \gg h_{\text{НП}}, h_{\text{ЛПС}}$, выражение (4) для случая положительной рефракции электромагнитной волны принимает вид [4]

$$R_{\text{пред}}, \text{ км} = 4,12 \left(\sqrt{h_{\text{НП}}, \text{ м}} + \sqrt{h_{\text{ЛПС}}, \text{ м}} \right). \quad (5)$$

Определим предельную дальность связи при различных высотах подъема антенны НП и высоте полета ЛПС (табл. 1).

Таблица 1

Предельная дальность связи ЛПС-НП, км

Высота подъема антенны НП, м	Высота полета ЛПС, м			
	3000	5000	8000	10000
0	225,7	291,3	368,5	412
5	234,9	300,5	377,7	421,2
15	241,6	307,3	384,5	428
20	244,1	309,8	368,9	430,4

Как видно из табл. 1, дальность связи в большей степени зависит от высоты полета ЛПС. От высоты подъема антенны НП, в большей степени, зависит степень экранирования РЛП объектами рельефа, что рассмотрено ниже.

Известно [4], что на формирование поля в точке приема влияет зона пространства, существенная для распространения радиоволн, которая представляет собой эллипсоид вращения. Для получения напряженности электромагнитного поля E_0 в точке приема равной ослаблению в свободном пространстве необходима свободная от экранирования зона радиусом [4]

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} R_{\text{св}} \lambda k (1-k)}, \quad (6)$$

где λ – длина волны;

$R_{\text{св}}$ – длина РЛП;

k – относительная координата точки РЛП, $k = R/R_{\text{св}}$;

R – расстояние до точки.

Известно, что сигналы в четных зонах Френеля приходят в точку приема противофазно основному сигналу, а в нечетных зонах – синфазно. Таким образом, благоприятным с точки зрения распространения сигнала будет экранирование четных зон Френеля. Однако на практике может происходить одновременное экранирование как четных, так и нечетных зон (см. рис. 2).

Таким образом, при экранировании той или иной зоны Френеля необходимо пересчитывать затухание в свободном пространстве с учетом понижающего (для четных зон) или повышающего (для нечетных зон) коэффициентов.

В статье сделаны следующие допущения: если экранировано более 50% зоны Френеля, то она считается перекрытой полностью; если на трассе РЛП отсутствует прямая видимость, то расчет затухания сигнала не проводится, а временной слот относится к интервалу неготовности.

Радиус зон Френеля для высоты полета ЛПС – 8 км и высоты подъема антенны НП – 20 м для двух длин волн (частотой 2,4 ГГц и 600 МГц) представлен в табл. 2.

Таблица 2

**Радиус зон Френеля для двух длин волн ($\lambda_1=0,15$ м, $\lambda_2=0,5$ м)
при $h_{\text{ЛПС}}=8$ км $h_{\text{НП}}=20$ м**

H (при $\lambda=0,15$ м и $\lambda=0,5$ м)		k				
		0,1 (0,9)	0,2 (0,8)	0,3 (0,7)	0,4 (0,6)	0,5
H_0 , м	$\lambda=0,15$ м	35,5	47,3	54,2	58,1	59,2
	$\lambda=0,5$ м	64,8	86,4	98,9	105,8	108,1
H_1 , м	$\lambda=0,15$ м	61,5	82	94	100,4	102,5
	$\lambda=0,5$ м	112,3	149,7	171,5	183,3	187,1
H_2 , м	$\lambda=0,15$ м	87	116	132,8	142	145
	$\lambda=0,5$ м	158,7	211,7	242,5	259,2	264,6
H_3 , м	$\lambda=0,15$ м	106,5	142	162,7	173,9	177,5
	$\lambda=0,5$ м	194,4	259,2	297	317,5	324
H_4 , м	$\lambda=0,15$ м	123	164	187,8	200,8	205
	$\lambda=0,5$ м	224,5	299,3	343	366,6	374,2

Если известна величина просвета H – расстояние от точки профиля местности до линии, соединяющей фазовые центры приемной и передающей антенн, то интервал считается: открытым при $H \geq H_0$; полуоткрытым при $H_0 > H \geq 0$; закрытым при $H < 0$.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ РАДИОЛИНИИ ПРИВЯЗКИ

Исходные данные методики:

1. Параметры НП: широта $B_{\text{НП}}$, долгота $L_{\text{НП}}$; высота подъема антенны $h_{\text{НП}}$.
2. Параметры ЛПС на текущее время и глубину прогнозирования: координаты $B_{\text{ЛПС}}$ (широта), $L_{\text{ЛПС}}$ (долгота); курс δ_k ; высота полета $h_{\text{ЛПС}}$; скорость полета V .
3. Энергетические параметры РЛП: высота дождя h_d , интенсивность дождя ϵ , продолжительность выпадения осадков; мощность излучаемого сигнала P_i ; модуляция M_i ; кодирование K_i ; требуемая скорость передачи C^* ; коэффициенты усиления антенн НП и ЛПС $G_{\text{НП}}$, $G_{\text{ЛПС}}$; длина волны λ .
4. Параметры рельефа: матрица высот рельефа $h_p(B, L)$; матрица высот леса $h_l(B, L)$.

На интервале наблюдения (слота связи) 10 с характеристики ЛПС: курс, скорость и высота полета предполагаются постоянными.

Методика оценки коэффициента готовности включает в себя следующие этапы:

1. Получить координаты ЛПС в соответствии с полетным заданием на момент начала каждого слота, входящего в интервал связи $T_{\text{св}}$.
2. По известным координатам НП и полученному массиву координат ЛПС для каждого слота путем решения обратной геодезической задачи определить дальность связи $R_{\text{св}}$.
3. По данным геоинформационной системы (ГИС) сформировать массив высот рельефа местности и леса между ЛПС и НП – $h_p(k)$ и $h_l(k)$ соответственно, где k – относительная координата линии прямой видимости, $k=R_{\text{тек}}/R_{\text{св}}$.
4. Определить просвет $H(k)$ и радиус $H_0(k)$ зоны, существенной для распространения радиоволн, в точках k интервала [1]:

$$H(k) = g(k) - [y(k) + h_p(k) + h_l(k)], \quad (7)$$

где $g(k)$ – высота от плоской Земли до линии, соединяющей центры антенн ЛПС и НП, которая определяется как

$$g(k) = h_{\text{ЛПС}}(k) - k[h_{\text{ЛПС}}(k) - h_{\text{НП}}(k)];$$

$y(k)$ – линия, учитывающая кривизну Земли, определяется как функция от k по выражению

$$y(k) = R_{\text{св}}^2 k \left(\frac{1-k}{17} \right).$$

При этом $H_0(k)$ определяется согласно формуле (6).

5. Определить тип интервала.
6. Для полуоткрытого интервала определить количество и тип препятствий и рассчитать затухание, обусловленное рельефом местности и местными предметами W_p .
7. Определить суммарное затухание радиосигнала РЛП W_{Σ} .
8. Определить уровень сигнала на входе приемника $P_{\text{вх}}$.
9. Определить мощность уровня шума на входе приемника $P_{\text{ш}}$.
10. Определить отношение сигнал/шум на входе приемника h^2 .
11. Зная сигнально-кодую конструкцию, определить вероятность ошибки в ЛП на длительности слота.
12. В соответствии с подходом к определению состояния SES [1] принять решение о состоянии готовности или неготовности слотов на длительности $T_{\text{св}}$.
13. Сформировать массив энергетических параметров РЛП на длительности $T_{\text{св}}$ по слотам. В массив входят: номер слота i ; затухание в РЛП $W_{\Sigma i}$; мощность передаваемого сигнала P_i ; модуляция M_i ; вид и параметры кода K_i ; состояние готовности или неготовности.
14. Рассчитать коэффициент готовности на временном интервале $T_{\text{св}}$, в соответствии с выражением (2) и сравнить его с требуемым значением.

Методика реализуется по алгоритму, представленному на рис. 4.

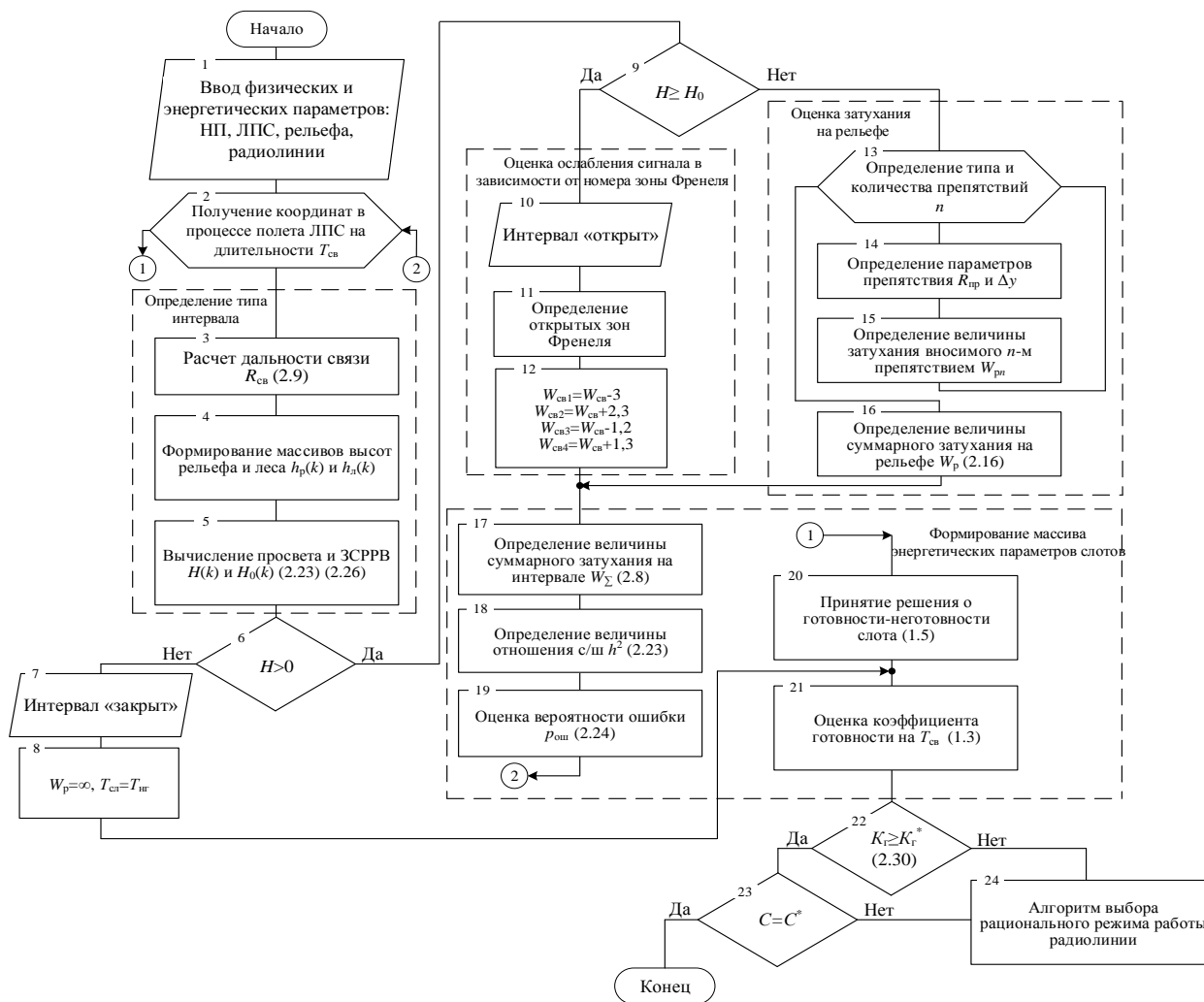


Рис. 4. Алгоритм оценки коэффициента готовности РЛП

ПРИМЕР ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ РАДИОЛИНИИ ПРИВЯЗКИ

Рассмотрим применение разработанной методики. Примем, что на начало расчета установлен следующий режим работы РЛП: вид модуляции *BPSK* без кодирования, выходная мощность $P=7$ дБ, имеется возможность ее регулировки от 4 до 14 дБ.

Коэффициенты усиления антенн и затухания в фидерах ЛПС и НП $G_{\text{ЛПС}}=13$ дБ, $W_{\text{фЛПС}}=5$ дБ, $G_{\text{НП}}=23$ дБ, $W_{\text{фНП}}=7$ дБ соответственно. Маршрут ЛПС показан на рис. 5.

Вероятности ошибки бита оценивается на $T_{\text{св}}$ в моменты начала временных слотов $T_{\text{сл}}=10$ с. Таким образом, на $T_{\text{св}}$ помещается $n=12$ слотов. Интервал неготовности будет находиться в пределах

$$T_{\text{нр}}, c \in [0; 120 | (t_{i+1} - t_i) = 10],$$

где t_{i+1} , t_i – время начала $(i+1)$ -го и i -го слотов соответственно.

Значение коэффициента готовности будет изменяться дискретно с шагом $\Delta K_r = T_{\text{сл}} / T_{\text{св}} = 0,08$ и принимать значения из множества $K_r = \{1; 1 - 0,08; \dots; 1 - 0,08n\}$.

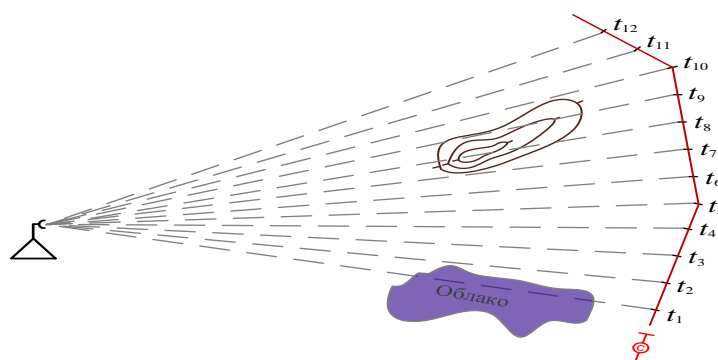


Рис. 5. Маршрут ЛПС (пример)

Расчеты затухания радиоволн выполняются в моменты времени $t_1...t_{12}$. Маршрут ЛПС выбран таким образом, что дальность связи $R_{св}$ изменяется незначительно от 280 км. Требуемая вероятность ошибки бита $p_{ош}=10^{-5}$. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты оценки готовности РЛП на длительности временных слотов

№ слота, i	$W'_{св}$, дБ	W_a , дБ	W_d , дБ	W_p , дБ	W_{Σ} , дБ	$P_{вх}$, дБ	$P_{ш}$, дБ	h^2 , дБ	$p_{ош}$	Готовность
1	144	2,1	2,6	0	148,7	-113,7	-121	7,3	10^{-4}	нет
2	144	1,5	0	0	145,5	-110,5	-121	10,5	10^{-5}	да
3	144	1,5	0	0	145,5	-110,5	-121	10,5	10^{-5}	да
4	144	1,5	0	0	145,5	-110,5	-121	10,5	10^{-5}	да
5	144	1,5	0	0	145,5	-110,5	-121	10,5	10^{-5}	да
6	143,8	1,5	0	0	144,3	-109,3	-121	11,7	10^{-6}	да
7	141	1,5	0	0	142,5	-107,5	-121	13,5	10^{-6}	да
8	-	-	-	∞	-	-	-	-	-	нет
9	144	1,5	0	6,7	155,2	-120,2	-121	3,8	10^{-3}	нет
10	141	1,5	0	0	142,5	-107,5	-121	13,5	10^{-6}	да
11	144	1,5	0	0	145,5	-110,5	-121	10,5	10^{-5}	да
12	144	1,5	0	0	145,5	-110,5	-121	10,5	10^{-5}	да

Из анализа таблицы видно, что на трех слотах (1, 8, 9) требования к вероятности ошибки не выполняются. Эти слоты являются слотами неготовности. Коэффициент готовности РЛП $K_{Г}=1-3 \cdot 0,08=0,76$.

Перестраивать режим работы РЛП на слоте 8 не имеет смысла, так как в этот временной интервал отсутствует прямая видимость между ЛПС и НП. Если удастся перестроить режим работы РЛП на слотах 1 и 9, то коэффициент готовности РЛП примет максимальное значение $K_{Г}=1-0,08=0,92$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено рассматривать РЛП как совокупность линий спутниковой и радиорелейной связи. Ее отличие от наземного интервала состоит в том, что большую часть времени полета интервал является открытым. Поэтому необходимо рассматривать экранирование не только зоны, существенной для распространения, но и зоны Френеля более высоких порядков.

Представлена методика оценки коэффициента готовности и определения периодов неготовности РЛП на маршруте полета ЛПС, которая позволяет оценивать коэффициент готовности на коротком интервале времени, соизмеримом с длительностью сеанса связи, и ставить задачу на выбор рационального режима работы РЛП.

Предложенная методика предполагает, что коэффициент готовности изменяется дискретно с шагом ΔK_r и зависит от количества слотов неготовности. Представленный пример показывает, как оценить диапазон значений коэффициента готовности РЛП и на каких слотах необходимо менять режим его работы.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 53363-2009. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета [Digital radio-relay links. Quality parameters. Calculation methods]: введ. 01.01.2010. – М.: Стандартинформ, 2020.
2. Справочник по радиорелейной связи. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Бурлаков С.О., Климов И.С., Цветков К.Ю. Распределение частот ретранслятора связи при работе земных станций с парциальными каналами // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 672. – С. 88–91.
4. Кантор Л.Я. Спутниковая связь и вещание: справочник. – 3-е изд. – М.: Радио и связь, 1997.
5. Цветков К.Ю., Осташев И.Т., Косяков Е.Н. Радиорелейные и спутниковые системы связи специального назначения. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 447 с.

В.В. Вознюк,
кандидат технических наук, доцент;
А.В. Галандзовский,
кандидат технических наук;
Д.А. Комлык

ВЫВОД УТОЧНЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАДИОКАНАЛОВ С ШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ

Представлен вывод уточненных энергетических соотношений для радиолиний связи с широкополосными сигналами. Для более точного расчета основных энергетических параметров радиолиний связи с широкополосными сигналами осуществлен учет коэффициента широкополосности сигнала в виде отношения ширины полосы спектра этого сигнала к его центральной или несущей частоте. Такой коэффициент позволяет скорректировать ошибку в расчете мощности рассматриваемых типов сигналов, возникающую при использовании известных энергетических соотношений.

Ключевые слова: широкополосный сигнал, коэффициент широкополосности, энергетическое соотношение, радиолиния связи.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно разрабатываются и модернизируются разнородные по своему назначению радиоэлектронные средства связи, навигации и радиолокации, которые для достижения высоких потребительских свойств переходят к использованию широкополосных сигналов, причем как с использованием несущей частоты (радиосигналов), так и без нее (видеосигналов) [1, 2]. В основе обоснования требований к таким средствам лежит оценка дальности их надежного функционирования. При этом при расчетах дальности как для узкополосных, так и для широкополосных сигналов используется одно и то же энергетическое соотношение, выведенное в свое время применительно к узкополосным типам сигналов [3, 4]. Анализ данных выражений показывает, что в их составе содержатся частотно-зависимые параметры и коэффициенты, которые могут существенно изменять свои значения для различных частот в спектре широкополосных сигналов. Очевидно, что игнорирование данного факта при расчете энергетических параметров радиолиний с широкополосными сигналами может приводить к ошибочным оценкам важных параметров при проектировании и эксплуатации перспективных радиоэлектронных средств.

Таким образом, целью данного исследования является вывод уточненных соотношений для энергетических расчетов применительно к радиолиниям, в которых предполагаются использование не только узкополосных, но и широкополосных сигналов различного типа и оценка потенциальной погрешности вычислений при использовании известных энергетических соотношений.

Для достижения поставленной цели вводится понятие коэффициента широкополосности сигналов, который определяется как отношение ширины спектра таких сигналов к левой граничной частоте их спектра (первого типа) или к несущей частоте сигнала (второго типа). Очевидно, что искомые энергетические соотношения зависят от введенных коэффициентов широкополосности. Данные коэффициенты широкополосности первого и второго типа могут быть также использованы для уточнения критериев узкополосности или широкополосности сигналов, основываясь на сравнении погрешности вычислений с использованием традиционных и модифицированных соотношений расчета энергетических параметров радиолиний.

ОСНОВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАДИОЛИНИЙ СВЯЗИ С УЗКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ

С целью вывода основных энергетических соотношений для радиолиний с широкополосными сигналами будет рассмотрен некоторый идеальный случай распространения радиоволн, когда влияние рельефа поверхности Земли не учитывается, а трассы прямолинейны. Такие условия, например, характерны для космических радиолиний связи в отдельные периоды времени.

Энергетические соотношения, полученные в условиях свободного пространства, являются исходными для расчета радиолиний в любых других условиях реальной обстановки. Кроме того, известно [4], что такие соотношения выведены и верны только для класса узкополосных излучений. Энергия указанных излучений сосредоточена на частоте несущего колебания f_n , которой соответствует длина волны

$$\lambda_n = c/f_n, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, м/с.

Приведем известные выражения [5, 6] для расчета действующего напряжения $U_{\text{ПРМ}}$ на входе приемного устройства при условии согласования волнового сопротивления фидера приемной антенны с входным сопротивлением приемника на дальности связи R :

$$U_{\text{ПРМ}}^{(\lambda_n)} = \frac{\lambda_n}{4\pi R} \cdot \sqrt{P_{\text{ПРД}} W_F G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \eta_{\text{ПРД}} \eta_{\text{ПРМ}} g_{\text{ПРД}}(\alpha_1, \theta_1) g_{\text{ПРМ}}(\alpha_2, \theta_2) \mu_{\text{ПОЛ}} \mu_{\text{Ч}} V(R)}, \quad (2)$$

где

$P_{\text{ПРД}}$ – мощность передатчика, Вт;

W_F – волновое сопротивление фидера, Ом;

$G_{\text{ПРД}}, G_{\text{ПРМ}}$ – коэффициенты усиления (по мощности) передающей и приемной антенн;

$\eta_{\text{ПРД}}, \eta_{\text{ПРМ}}$ – коэффициенты полезного действия передающего и приемного антенно-фидерных трактов;

$g_{\text{ПРД}}(\alpha_1, \theta_1), g_{\text{ПРМ}}(\alpha_2, \theta_2)$ – нормированные диаграммы направленностей передающей и приемной антенн соответственно;

$\mu_{\text{ПОЛ}}, \mu_{\text{Ч}}$ – коэффициенты дополнительных потерь, учитывающие рассогласованность приемника и передатчика по поляризации и частоте соответственно;

$V(R)$ – коэффициент дополнительных потерь при распространении в реальной среде.

Анализ выражения (2) показывает, что даже в условиях идеального согласования частотных параметров передатчика и приемника, при которых можно принять $\mu_{\text{Ч}} \approx 1$, оно не может быть применено для адекватного расчета действующего напряжения, а соответственно, и для мощности, излучений на входе приемного устройства применительно к сигналам с широким спектром, так как содержит ряд частотно-зависимых параметров и коэффициентов, таких как $\lambda_n, G_{\text{ПРД}}, G_{\text{ПРМ}}, \eta_{\text{ПРД}}, \eta_{\text{ПРМ}}$. Следовательно, разные спектральные составляющие таких сигналов будут распространяться с разными ослаблениями.

Так, в частности, известно [7], что

$$\begin{aligned} G_{\text{ПРД}} &\approx \frac{4\pi A_{\text{ПРД}}}{\lambda_n^2} = \frac{4\pi A_{\text{ПРД}} f_n^2}{c^2}, \\ G_{\text{ПРМ}} &\approx \frac{4\pi A_{\text{ПРМ}}}{\lambda_n^2} = \frac{4\pi A_{\text{ПРМ}} f_n^2}{c^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $A_{\text{ПРД}}$, $A_{\text{ПРМ}}$ – действующие площади передающей и приемной антенны соответственно (для параболических антенн численно равны площади сечения параболоида с углом раскрыва, соответствующим углу раскрыва реальной антенны, и с заданным фокусным расстоянием), м^2 .

Коэффициенты $\eta_{\text{ПРД}}$, $\eta_{\text{ПРМ}}$ также зависят от частоты, но аналитически это не всегда можно записать (обычно приводят их табличные данные) и при этом обладают слабо выраженной волатильностью. С учетом такого характера их частотной зависимости в дальнейшем будем считать данные коэффициенты условно постоянными.

Выражение (2) с учетом (1) и (3) и при условии согласования антенного фидера $W_F=1$ можно записать в другом виде

$$U_{\text{ПРМ}}^{(\lambda_n)} = \frac{f_n}{cR} \cdot \sqrt{P_{\text{ПРД}}} \cdot \Phi, \quad (4)$$

где $\Phi = \sqrt{A_{\text{ПРД}} A_{\text{ПРМ}} \eta_{\text{ПРД}} \eta_{\text{ПРМ}} g_{\text{ПРД}}(\alpha_1, \theta_1) g_{\text{ПРМ}}(\alpha_2, \theta_2) \mu_{\text{ПОЛ}} \mu_{\text{Ч}} V(R)}$.

Выражения (2) и (4) позволяют записать уравнения для расчета мощности сигнала на входе приемника:

$$P_{\text{ПРМ}}^{(\lambda_n)} = \frac{P_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \eta_{\text{ПРД}} \eta_{\text{ПРМ}} g_{\text{ПРД}}(\alpha_1, \theta_1) g_{\text{ПРМ}}(\alpha_2, \theta_2) \mu_{\text{ПОЛ}} \mu_{\text{Ч}} V(R) \lambda_n^2}{16\pi^2 R^2} \quad (5)$$

или

$$P_{\text{ПРМ}}^{(f_n)} = \frac{P_{\text{ПРД}} A_{\text{ПРД}} A_{\text{ПРМ}} \eta_{\text{ПРД}} \eta_{\text{ПРМ}} g_{\text{ПРД}}(\alpha_1, \theta_1) g_{\text{ПРМ}}(\alpha_2, \theta_2) \mu_{\text{ПОЛ}} \mu_{\text{Ч}} V(R) f_n^2}{c^2 R^2} = \left(\frac{\Phi}{cR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} f_n^2. \quad (6)$$

Данные выражения являются частотно-зависимыми и справедливы только для узкополосных сигналов.

ВЫВОД ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ РАДИОЛИНИЙ СВЯЗИ С ШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ

Для вывода энергетических соотношений применительно к радиолиниям с широкополосными сигналами функцию изменения напряжения в передатчике обозначим как $U_c(t)$. Данную функцию можно представить в виде разложения в ряд Фурье временной зависимости напряжения сигнала на выходе антенны передатчика в интервале времени T :

$$U_c(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t) = \sum_{k=0}^{\infty} u_k(\omega_1, t), \quad (7)$$

где $u_k(\omega_1, t) = a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)$ – k -я гармоника рассматриваемого сигнала;

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U_c(t) dt; \quad a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U_c(t) \cos(k\omega_1 t) dt; \quad b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U_c(t) \sin(k\omega_1 t) dt; \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{T}.$$

Очевидно, что каждая гармоника в представленном разложении может передаваться в канале как независимый сигнал, для которого выражения (2), (4)–(6) будут строго выполняться в силу выполнения требований к узкополосности излучаемого однотонального колебания. Таким образом, с учетом выражения (4) для каждой k -й гармоники будет справедливо следующее соотношение:

$$u_{\text{ПРМ}/k}(\omega_1, t) = \frac{\Phi}{2\pi cR} \cdot u_k(\omega_1, t) k\omega_1. \quad (8)$$

Тогда в приемном устройстве передаваемый широкополосный сигнал может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ПРМ/С}}(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} u_{\text{ПРМ/С}}(k\omega_1, t) = \frac{\Phi}{2\pi cR} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} u_k(\omega_1, t) k\omega_1 = \\
 &= \frac{\Phi}{2\pi cR} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t) k\omega_1 = \frac{\Phi}{cTR} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t) k. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Мощность данного сигнала определяется выражением

$$P_{\text{ПРМ/С}} = \frac{E_C}{T} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U_{\text{ПРМ/С}}(t)^2 dt, \quad (10)$$

где $E_C = 2 \int_{-T/2}^{T/2} U_{\text{ПРМ/С}}(t)^2 dt$ – энергия принятого сигнала за интервал времени наблюдения T .

Коэффициент 2 означает, что вклад в энергию сигнала вносят в равной мере и положительные, и отрицательные частоты [8].

Подставляя выражение (9) в (10), интегрируя и учитывая ортогональность тригонометрических функций на несовпадающих гармониках, получим следующее соотношение для расчета мощности, справедливое не только для узкополосного сигнала, но и широкополосного:

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} = \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 \sum_{k=0}^{\infty} k^2 \cdot \left(a_k^2 + b_k^2 + \frac{\sin(2\pi k)}{2\pi k} (a_k^2 - b_k^2) \right). \quad (11)$$

Учитывая тот факт, что спектр широкополосного сигнала располагается преимущественно в полосе между крайней левой $f_{\text{л}}$ ($f_{\text{л}}$ – первая гармоника широкополосного сигнала с относительно высокой мощностью) и крайней правой $f_{\text{п}}$ ($f_{\text{п}}$ – последняя гармоника широкополосного сигнала с относительно высокой мощностью) частотами, его ширина ΔF будет составлять $\Delta F = f_{\text{п}} - f_{\text{л}}$, а количество гармонических составляющих спектра широкополосного сигнала N будет следующим: $N = \Delta F \cdot T$. При этом номер первой гармоники $N_{\text{л}}$ с относительно высокой мощностью в спектре широкополосного сигнала рассчитывается как $N_{\text{л}} = N_1 = \left(f_{\text{л}} - \frac{\Delta F}{2} \right) \cdot T = f_{\text{л}} T$.

В указанном случае выражение (11) может быть представлено в следующем виде:

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} = \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 \sum_{k=N_1}^{N_1+N} k^2 \left(a_k^2 + b_k^2 + \frac{\sin 2\pi k}{2\pi k} a_k^2 - b_k^2 \right) \quad (12)$$

или иначе

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} = \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 \sum_{k=0}^N (N_1 + k)^2 \left(a_{N_1+k}^2 + b_{N_1+k}^2 + \frac{\sin 2\pi (N_1 + k)}{2\pi (N_1 + k)} a_{N_1+k}^2 - b_{N_1+k}^2 \right). \quad (13)$$

Далее принимается, что величина N_1 имеет достаточно большие численные значения ($N_1 \gg 1$), чтобы считать выражение $\frac{\sin(2\pi (N_1 + k))}{2\pi (N_1 + k)} (a_{N_1+k}^2 - b_{N_1+k}^2) \approx 0$ малой величиной, значе-

нием которой можно пренебречь. Справедливость данного предположения для широкополосных сигналов на несущей частоте не вызывает сомнений. Применительно к видеосигналам, с учетом невозможности излучения энергии на нулевых или околонулевых частотах, данное предположение также может иметь место. Тогда выражение (13) может быть упрощено:

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} = \left(\frac{\Phi N_1}{cTR} \right)^2 \sum_{k=0}^N \left(1 + \frac{k}{N_1} \right)^2 a_{N_1+k}^2 + b_{N_1+k}^2. \quad (14)$$

Очевидно, что выражение (14) можно разложить на три составляющие:

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} = P_{\text{ПРМ}}^{(1)} + P_{\text{ПРМ}}^{(2)} + P_{\text{ПРМ}}^{(3)}, \quad (15)$$

$$\text{где } P_{\text{ПРМ}}^{(1)} = N_1^2 \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 \sum_{k=0}^N a_{N_1+k}^2 + b_{N_1+k}^2 ; P_{\text{ПРМ}}^{(2)} = 2N_1 \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 \sum_{k=0}^N k \cdot a_{N_1+k}^2 + b_{N_1+k}^2 ;$$

$$P_{\text{ПРМ}}^{(3)} = \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 \sum_{k=0}^N k^2 \cdot a_{N_1+k}^2 + b_{N_1+k}^2 .$$

Для широкополосных сигналов с равномерным распределением энергии по частотам численные значения величин $s_k = a_{N_1+k}^2 + b_{N_1+k}^2$ будут примерно равны между собой, т. е. $s_0 \approx s_k$. Тогда каждое слагаемое выражения (15) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_{\text{ПРМ}}^{(1)} &= \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 N_1^2 \cdot N \cdot s_0, \\ P_{\text{ПРМ}}^{(2)} &= 2N_1 \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 s_0 \sum_{k=0}^N k = \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 N_1(N+1)N \cdot s_0, \\ P_{\text{ПРМ}}^{(3)} &= \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 s_0 \sum_{k=0}^N k^2 = \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 \cdot \frac{N+1}{6} \cdot \frac{2N+1}{3} N \cdot s_0. \end{aligned} \quad (16)$$

Так как в общем случае N принимают большие значения, тогда можно сделать следующие допущения: $N+1 \approx N$, $2N+1 \approx 2N$. При этом очевидно, что сумма всех гармоник широкополосного сигнала с относительно высокой мощностью будет равна исходной мощности передаваемого сигнала $P_{\text{ПРД}} = N \cdot s_0$. Кроме того, учтем, что $N_1 = f_{\text{л}} T$. Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} P_{\text{ПРМ}}^{(1)} &\approx \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} f_{\text{л}}^2 T^2 = \left(\frac{\Phi}{cR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} f_{\text{л}}^2, \\ P_{\text{ПРМ}}^{(2)} &\approx \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} N_1 N = \left(\frac{\Phi}{cR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} \frac{f_{\text{л}} \cdot T \cdot \Delta F \cdot T}{T^2} = \left(\frac{\Phi}{cR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} \cdot f_{\text{л}} \cdot \Delta F, \\ P_{\text{ПРМ}}^{(3)} &\approx \left(\frac{\Phi}{cTR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} \frac{N \cdot 2N}{6} = \left(\frac{\Phi}{cR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} \frac{\Delta F \cdot T \cdot 2\Delta F \cdot T}{T^2 \cdot 6} = \left(\frac{\Phi}{cR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} \cdot \frac{\Delta F^2}{3}. \end{aligned} \quad (17)$$

Суммируя все три приведенных выше составляющих мощности, итоговое энергетическое соотношение для широкополосного сигнала преобразуется к следующему виду:

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} \approx \left(\frac{\Phi}{cR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} \left(f_{\text{л}}^2 + f_{\text{л}} \cdot \Delta F + \frac{\Delta F^2}{3} \right). \quad (18)$$

Введя коэффициент широкополосности первого типа $\rho_1 = \frac{\Delta F}{f_{\text{л}}}$ (отношение ширины спектра сигнала к крайней левой частоте сигнала) и учитывая, что $P_{\text{ПРМ}}^{(f_{\text{л}})} = \left(\frac{\Phi}{cR} \right)^2 P_{\text{ПРД}} f_{\text{л}}^2$ в соответствии с выражением (6), получим финальное искомое выражение в таком виде:

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} = P_{\text{ПРМ}}^{(f_{\text{л}})} \left(1 + \rho_1 + \frac{\rho_1^2}{3} \right). \quad (19)$$

Для коэффициента широкополосности второго типа $\rho_2 = \frac{\Delta F}{f_{\text{н}}}$ (отношение ширины спектра сигнала к несущей или центральной частоте сигнала) выражение (19) должно быть трансформировано путем подстановки вместо коэффициента ρ_1 его аналога, выраженного

через коэффициент ρ_2 . Для этого учтем, что $f_{\text{л}} = f_{\text{н}} - \frac{\Delta F}{2}$ и, соответственно, получим сле-

дующие зависимости: $\rho_1 = \frac{2\rho_2}{2-\rho_2}$, а $P_{\text{ПРМ}}^{(f_{\text{л}})} = P_{\text{ПРМ}}^{(f_{\text{н}})} \cdot \left(\frac{f_{\text{л}}}{f_{\text{н}}}\right)^2 = P_{\text{ПРМ}}^{(f_{\text{н}})} \cdot \left(1 - \frac{\rho_2}{2}\right)^2$.

Подставим полученные соотношения в выражение (19), в результате получим

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} = P_{\text{ПРМ}}^{(f_{\text{н}})} \cdot \left(1 - \frac{\rho_2}{2}\right)^2 \left[1 + \frac{2\rho_2}{2-\rho_2} + \frac{\left(\frac{2\rho_2}{2-\rho_2}\right)^2}{3} \right]. \quad (20)$$

Упростим данное выражение, раскрыв скобки и приведя подобные слагаемые, в результате чего получим искомое выражение в финальном виде

$$P_{\text{ПРМ}}^{\text{ш}} = P_{\text{ПРМ}}^{(f_{\text{н}})} \cdot \left(1 + \frac{\rho_2^2}{12}\right). \quad (21)$$

Выражения (19) и (21) позволяют определить относительные ошибки вычислений энергетических параметров радиолиний с широкополосными сигналами, допускаемые при использовании известного выражения (6), характерного для узкополосных сигналов. Кроме того, они также позволяют провести сравнительный анализ новых полученных в работе соотношений расчета энергетических параметров радиолиний, характерных для широкополосных сигналов с известными параметрами.

Относительные ошибки вычислений могут быть получены на основании присутствующих в выражениях (19) и (21) функциональных дополнений:

$$\chi_1(\rho_1) = 1 + \rho_1 + \frac{\rho_1^2}{3}, \quad (22)$$

$$\chi_2(\rho_2) = 1 + \frac{\rho_2^2}{12}, \quad (23)$$

которые отсутствуют в известном выражении (6).

Следует отметить, что диапазоны изменения коэффициентов широкополосности ρ_1 и ρ_2 не совпадают. Так, для ρ_2 справедливо неравенство $0 \leq \rho_2 \leq 2$, так как ширина спектра ΔF не может быть больше значения несущей частоты $f_{\text{н}}$ больше чем в два раза. Тогда для ρ_1 , с учетом найденной ранее зависимости $\rho_1 = \frac{2\rho_2}{2-\rho_2}$, диапазон возможных значений составит $0 \leq \rho_1 \leq \infty$.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости относительных погрешностей (22) и (23), где в качестве аргументов использованы величина ρ_1 и ρ_2 для соответствующих диапазонов их возможных значений.

Как следует из анализа рис. 1 и 2, по мере роста ширины спектра передаваемого в радиолинии сигнала величины относительных ошибок энергетических расчетов, выполненных по формуле (6), по сравнению с полученными соотношениями (19) и (21) все больше будут отличаться от 1, что будет приводить к росту абсолютных погрешностей вычислений.

Если ввести допустимую относительную погрешность использования выражения (6) $\frac{\delta_{\%}}{100\%}$, то получим предельно допустимое значение коэффициента широкополосности второго типа, допустимого для использования выражения (6), а, другими словами, – критерий узкополосности сигнала, определяемый в соответствии со следующим правилом:

$$\rho_2 \leq 0,346\sqrt{\delta_{\%}}. \quad (24)$$

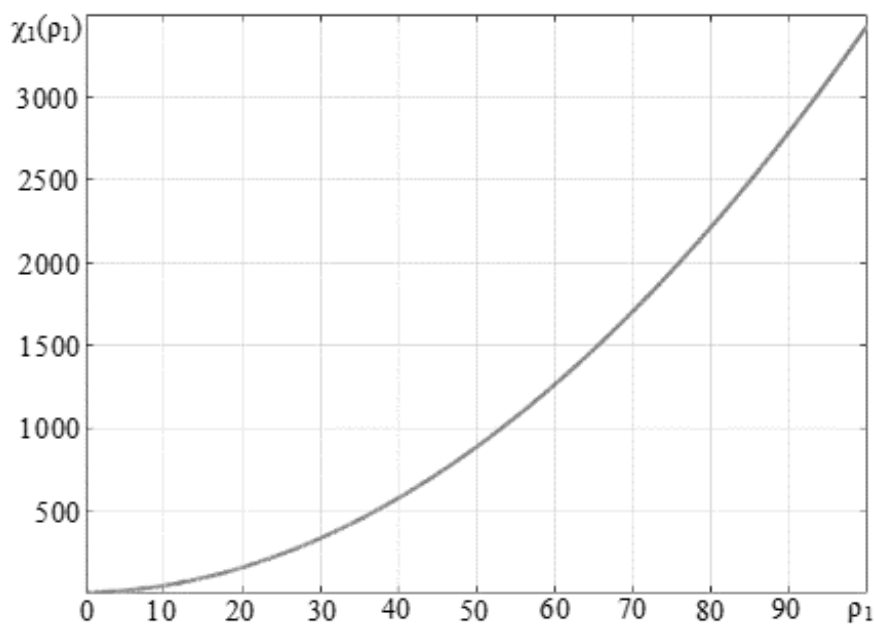


Рис. 1. Зависимости $\chi_1(\rho_1)$ от относительной величины широкополосности сигнала ρ_1

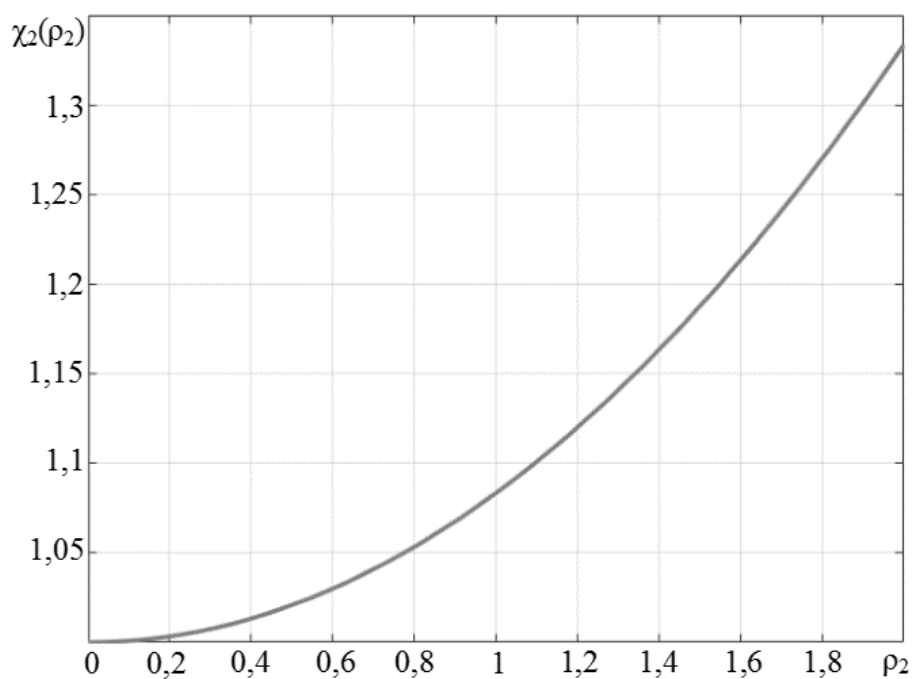


Рис. 2. Зависимости $\chi_2(\rho_2)$ от относительной величины широкополосности сигнала ρ_2

Отсюда следует, что допустимым значением ширины спектра сигнала, пригодной для использования выражения (6) на несущей (центральной) частоте f_H , будет следующая величина:

$$\Delta F \leq 0,346\sqrt{\delta_{\%}} f_H. \quad (25)$$

Таким образом, выражения (19) и (21) являются законченной формой искомым энергетических соотношений для определения энергетических характеристик как узкополосных, так и широкополосных сигналов в реальных радиоприемниках в идеальных условиях. Данные формулы также могут выступать некоторыми базисными соотношениями для расчета радиоприемников в любых других условиях реальной обстановки, так как к ним применимы любые обоснованные модификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученные ранее энергетические соотношения (2), (4)–(6), выведенные применительно к условиям распространения радиоволн в свободном пространстве, являются верными только для класса узкополосных излучений, энергия которых сосредоточена на частоте несущего колебания или на средней частоте в спектре сигнала f_n , которой соответствует длина

$$\lambda_n = c / f_n.$$

2. По мере роста ширины спектра передаваемого в радиоприемнике сигнала результаты энергетических расчетов, выполненных по выведенному в рамках данной статьи выражению (19) и по (21), все больше будут отличаться (в большую сторону) от аналогичных оценок, выполненных по известному выражению (6). При этом рост относительной ошибки расчета мощности принимаемого широкополосного сигнала имеет характер квадратичной функции от параметра широкополосности этого сигнала первого типа $\rho_1 = \frac{\Delta F}{f_n}$ и второго типа $\rho_2 = \frac{\Delta F}{f_n}$.

3. Допустимое значение ширины спектра сигнала для использования выражения (6) выбирается исходя из установленной погрешности расчета в соответствии с выражением (25).

4. Полученные в работе выражения (19) и (21) являются законченными уточненными формами искомым энергетических соотношений для передачи как узкополосных, так и широкополосных сигналов в реальных радиоприемниках в идеальных условиях. Данные формулы также могут выступать как некоторые базисные соотношения для расчета радиоприемников в любых других условиях реальной обстановки.

Список используемых источников

1. *Паришуткин А.В., Бучинский Д.И.* Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях искажений служебной части кадров нестационарными помехами // Информатика и автоматизация. – 2020. – Т. 19, № 5. – С. 967–990.

2. *Маслаков П.А., Пилков А.В., Комлык Д.А.* Моделирование канала связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях воздействия непреднамеренных нестационарных помех // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – Вып. № 1 (60). – С. 57–62.

3. Особенности обработки информационных пакетов фазомодулированных оптимальных дискретных сигналов в системах спутниковой связи / М.С Ворона [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – Т. № 18, № 6. – С. 24–31.

4. *Паришуткин А.В., Галандзовский А.В.* Радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 211 с.

5. Транкинговые системы связи ГКМ-ДКМ диапазонов с мобильной базовой станцией / А.Н. Юрьев [и др.] // Сборник докладов Международной научно-технической конференции / ФГУП «Омский научно-исследовательский институт приборостроения». – Омск: ФГУП «ОНИИП», ОмГТУ, 2011. – С. 82–89.

6. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн: учебник для вузов. – М.: Связь, 1972. – 336 с.
7. Технологические основы создания крупногабаритных трансформируемых антенн для радиотехнических комплексов орбитального базирования / А.В. Наговицын [и др.] // Вестник Российского нового университета: науч. журн. – 2019. – Вып. № 1. – С. 55– 61.
8. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 462 с.

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

МЕТОД РАСШИРЕНИЯ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА В АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ С ПОДАВЛЕНИЕМ ПОМЕХ ПО ГЛАВНОМУ ЛЕПЕСТКУ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

В статье рассматриваются вопросы повышения помехозащищенности радиоканалов на основе применения адаптивной антенной решетки (ААР) с оптимизацией вектора весовых коэффициентов (ВВК) компенсационного канала по схеме Хоуэллса – Эпплбаума. Приведены аналитические выражения для расчета ВВК и диаграммы направленности ААР, предложены способы расширения зоны защиты полезного сигнала. Методом математического моделирования произведен анализ характеристик антенной решетки в условиях воздействия нескольких помех. Техническим результатом предложенных решений является повышение эффективности защиты от подавления полезных сигналов и потери полезной информации в главном луче антенной решетки за счет расширения зоны защиты полезных сигналов.

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, вектор весовых коэффициентов, подавление помех в антенной решетке, диаграмма направленности, алгоритм Хоуэллса – Эпплбаума.

ВВЕДЕНИЕ

Статья относится к области радиотехники, и результаты исследования, приведенные в ней, могут быть использована для повышения помехоустойчивости систем радиолокации, радиосвязи и радионавигации за счет оптимальной пространственной обработки сигналов в приемных антенных решетках и обеспечения радиосвязи в сложной сигнально-помеховой обстановке.

Первоначально преимущественным направлением разработки ААР было подавление сосредоточенных по углу прихода помех в области боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) [1–3]. За последние годы предприняты серьезные усилия и успешно проведены исследования по поиску адаптивных методов не только подавления помех по главному лепестку ДН антенной решетки (АР), но и формирования при этом зоны защиты полезного сигнала. Известны адаптивные способы и реализующие их устройства компенсации помех, исключаящие возможность частичного подавления полезного сигнала по главному лепестку ДН, которые используют ограничения, вводимые непосредственно в контур управления с помощью пространственно-матричного фильтра или алгоритма минимума среднеквадратической ошибки [1]. Однако указанные методы обеспечивают слишком узкую зону защиты в направлении прихода полезного сигнала, требуют знания уровня сигнала и имеют высокую чувствительность к аппаратным ошибкам реализации. К другой группе относятся адаптивные алгоритмы, в которых ограничения на форму диаграммы направленности вводятся с использованием пилот-сигналов [1]. В рамках данного способа требуется иметь большой динамический диапазон элементов системы компенсации, а также производить фильтрацию пилот-сигналов на выходе, что является существенными недостатками.

К другим эффективным методам подавления помех в области главного лепестка относятся компенсационные методы построения ААР, рассмотренные в работах [3–7, 10]. Однако реализующие их устройства обладают существенным недостатком: при воздействии помех по

главному лучу АР происходит подавление не только помех, но и полезных сигналов, что приводит к искажению или потере полезной информации [6]. Это объясняется тем, что упомянутые устройства имеют разностные ДН с «острым» нулем только в очень узком секторе углов (в одном направлении). Вследствие этого уровень сигналов в разностных каналах АР в пределах главного луча достаточно велик, что приводит к срабатыванию автокомпенсаторов ААР и подавлению полезных сигналов в области главного луча [6].

Целью работы являются выбор и обоснование аппаратных методов расширения зоны защиты полезного сигнала от подавления по главному лепестку диаграммы направленности, а также исследование пространственно-селективных характеристик разработанного алгоритма адаптации.

В статье анализируются основные критерии эффективности многоканального пространственного фильтра на основе АР с адаптивным компенсатором помех по схеме Хоуэллса – Эпплбаума, получено аналитическое решение для оптимального весового вектора компенсационного канала. Кроме того, предложены три метода расширения зоны защиты полезного сигнала, имеющие невысокую вычислительную сложность и важное практическое приложение. По результатам компьютерного моделирования производится сравнение эффективности адаптивной пространственной селекции сигнала на основе традиционного и предложенных компенсационных методов в различных помеховых ситуациях.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве устройства пространственной селекции (УПС) сигналов и подавления помех предлагается использовать адаптивную антенную решетку с оптимизацией вектора весовых коэффициентов компенсационного канала по схеме Хоуэллса – Эпплбаума [5, 6].

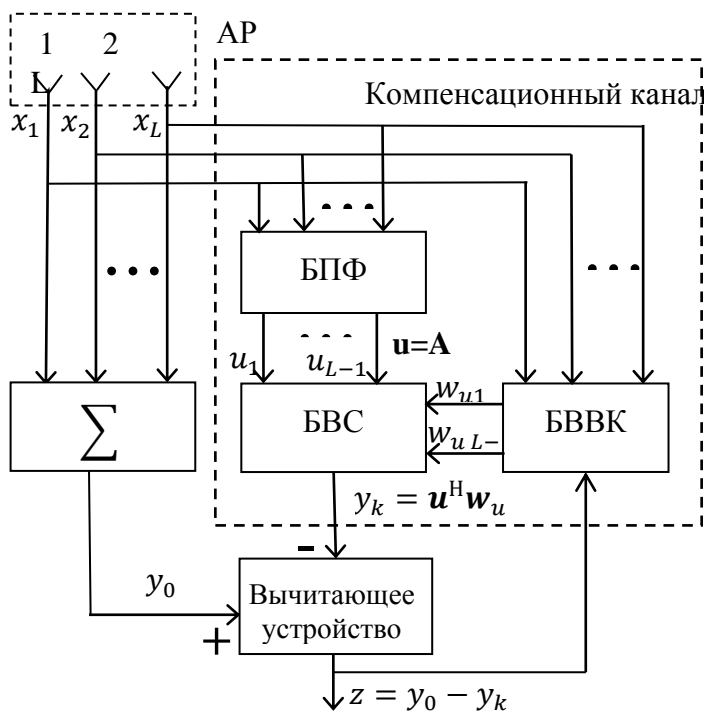


Рис. 1. Структурная схема УПС с оптимизацией ВВК по схеме Хоуэллса – Эпплбаума

Структурная схема УПС данного типа представлена на рис. 1, где введены следующие обозначения: АР – антенная решетка, состоящая из L элементов; БПФ – блок предварительной фильтрации; БВК – блок вычисления оптимальных весовых коэффициентов; Σ – сумматор АР основного канала; БВС – блок взвешенного суммирования; y_0 – напряжение на выходе основного канала АР; y_k – напряжение на выходе компенсационного канала; z – выходное напряжение УПС; $(\dots)^H$ – операция эрмитова сопряжения.

УПС компенсационного типа содержит основной (неадаптивный) и компенсационный (адаптивный) каналы обработки сигналов. В компенсаторе помех из сигнала основного канала y_0 вычитается выходной сигнал y_k компенсационного канала, который формируется с учетом зна-

чений оптимальных весовых коэффициентов, вычисляемых автоматически по схеме Хоуэллса – Эпплбаума в адаптивном процессоре. Компенсационный приемный канал имеет разностную диаграмму направленности [4]. Поэтому на его выходе полезный сигнал отсутствует, что позволяет подавлять помехи без ослабления полезного сигнала [7].

Рассмотрим линейную эквидистантную антенную решетку, состоящую из L приемных элементов. Вектор напряжений \mathbf{x} на выходе элементов АР представляет собой аддитивную смесь векторов сигнала \mathbf{x}_c , помех \mathbf{x}_{pi} и собственного шума $\mathbf{x}_ш$:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_c + \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_{pi} + \mathbf{x}_ш, \quad (1)$$

где N – число помех.

Обозначим $P_c, P_{pi}, P_ш$ – мощности сигнала, помехи и шума, приведенные к выходу одного элемента антенной решетки. Помех может быть несколько. В статье для примера ограничимся тремя. Тогда относительные уровни сигнала q_c , помех q_{pi} и шума $q_ш$ определяются выражениями: $q_c = P_c/P_ш$, $q_{pi} = P_{pi}/P_ш$ ($i = 1, 2, 3$), $q_ш = P_ш/P_ш = 1$.

С учетом введенных обозначений векторы сигнала, помех и шума на выходах элементов АР можно записать в виде

$$\mathbf{x}_c = \sqrt{q_c} \mathbf{h}_c, \quad \mathbf{x}_{pi} = \sqrt{q_{pi}} \mathbf{h}_{pi} \quad (i = 1, 2, 3), \quad \mathbf{x}_ш = \sqrt{q_ш} \mathbf{X}_ш = \mathbf{X}_ш, \quad (2)$$

где $\mathbf{h}_c, \mathbf{h}_{pi}$ – фазоры сигнала и помех;

$\mathbf{X}_ш$ – вектор комплексных амплитуд напряжений собственных шумов на выходе элементов АР.

Для линейной эквидистантной АР фазоры сигнала \mathbf{h}_c и помех \mathbf{h}_{pi} , определяющие угловое положение источников полезного сигнала и помех, имеют вид [2, 8, 9]:

$$\mathbf{h}_c = [1, e^{-j\varphi_c}, \dots, e^{-j(L-1)\varphi_c}]^T; \quad \mathbf{h}_{pi} = [1, e^{-j\varphi_{pi}}, \dots, e^{-j(L-1)\varphi_{pi}}]^T, \quad (3)$$

где φ_c – фазовые набегии сигнала в соседних элементах АР, $\varphi_c = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_c$;

φ_{pi} – фазовые набегии i -й помехи в соседних элементах АР, $\varphi_{pi} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_{pi}$;

θ_c, θ_{pi} – углы прихода сигнала и помех относительно перпендикуляра к линии расположения элементов АР;

d – расстояние между соседними элементами АР;

$(\dots)^T$ – операция транспонирования.

Примем, что напряжения белого шума в элементах АР являются независимыми и одинаковыми по уровню, тогда L -мерный вектор шума $\mathbf{x}_ш$ в формуле (2) составит

$$\mathbf{x}_ш = \sqrt{q_ш} \mathbf{X}_ш = \mathbf{1} = (1 \ 1 \ \dots \ 1)^T. \quad (4)$$

Антенная решетка АР и сумматор Σ (рис. 1), составляющие основной канал УПС, формируют выходной сигнал y_0 , согласованный с направлением прихода сигнала.

Элементы схемы АР, БПФ, БВБК и БВС (рис. 1) образуют адаптивный компенсационный канал. Сигнал \mathbf{x} с выхода элементов АР поступает на многоканальный пространственный фильтр БПФ, селективные свойства которого определяются видом матрицы преобразования \mathbf{A} . В стандартном блоке БПФ, выполненном по схеме поэлементного вычитания сигналов, матрица преобразования \mathbf{A} выбирается диагональной, используется однократно и имеет вид [5, 6]

$$\mathbf{A}_{\text{одн}} = \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{(L-1) \times L}. \quad (5)$$

Согласно равенству (5) число каналов на выходе БПФ на единицу меньше числа входных каналов, поэтому на его выходе формируется напряжение размерности $(L - 1)$

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad (6)$$

ковариационная матрица которого определяется выражением

$$\mathbf{R}_u = \mathbf{A}\mathbf{R}_x\mathbf{A}^T. \quad (7)$$

На выходе БВС формируется компенсирующий сигнал

$$y_k = \mathbf{w}_u^H \mathbf{u} = \mathbf{u}^H \mathbf{w}_u \quad (8)$$

в соответствии с весовыми коэффициентами $\mathbf{w}_u = (w_{u1}, w_{u2}, \dots, w_{uL-1})^T$, оптимальные значения которых $\mathbf{w}_{u \text{opt}}$ автоматически вычисляются в адаптивном процессоре, выполненном по схеме Хоуэллса – Эпплбаума.

Для сигнала, приходящего под углом $\theta_c = 0$, направлением защиты главного лепестка ДН является перпендикуляр к линии расположения элементов АР. В этом случае фазор сигнала представляет собой вектор из единиц: $\mathbf{h}_c = \mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)^T$, а выходной сигнал УПС

$$z = y_0 - y_k = \mathbf{x}^H \mathbf{1} - \mathbf{u}^H \mathbf{w}_u. \quad (9)$$

СХЕМА МЕТОДА РАСШИРЕНИЯ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ

Решение для оптимального ВВК. Для текущей сигнально-помеховой обстановки существует оптимальный ВВК $\mathbf{w}_{u \text{opt}}$ компенсационного канала, обеспечивающий максимальное подавление помех и наилучшее качество приема полезного сигнала. При его расчете будем считать, что собственные шумы элементов АР имеют одинаковую мощность $P_{\text{ш}}$, взаимно не коррелированы, не коррелированы с сигналом и помехами. Поэтому при векторе шума (4) корреляционная матрица вектора относительных значений шумов элементов АР представляет собой квадратную матрицу \mathbf{I} с единицами по главной диагонали $\langle \mathbf{x}_{\text{ш}} \mathbf{x}_{\text{ш}}^H \rangle = \mathbf{I}$.

Вся информация о сигнально-помеховой обстановке на выходах элементов АР содержится в ковариационной матрице \mathbf{R}_x вектора входного сигнала \mathbf{x} (1), которая в отсутствие взаимной корреляции сигнала и помех с учетом принятых допущений находится по формуле

$$\mathbf{R}_x = \langle \mathbf{x}\mathbf{x}^H \rangle = q_c \mathbf{h}_c \mathbf{h}_c^H + \left(\sum_{i=1}^N q_{\text{ш}i} \mathbf{h}_{\text{ш}i} \mathbf{h}_{\text{ш}i}^H + \mathbf{I} \right) = \mathbf{R}_c + \mathbf{M}, \quad (10)$$

где $\langle \dots \rangle$ – операция статического усреднения;
 \mathbf{R}_c – ковариационная матрица полезного сигнала, $\mathbf{R}_c = q_c \mathbf{h}_c \mathbf{h}_c^H$;
 \mathbf{M} – ковариационная матрица смеси помех и шума,

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N q_{\text{ш}i} \mathbf{h}_{\text{ш}i} \mathbf{h}_{\text{ш}i}^H + \mathbf{I}.$$

На выходе компенсационного канала за счет работы блока БПФ (см. рис. 1) полезный сигнал отсутствует [4, 6, 7]. Это позволяет ограничиться анализом исключительно уровня поме-

хи и в качестве критерия оптимальности БВК принять критерий минимума средней мощности, так как мощность полезного сигнала не зависит от значений адаптивного ВВК \mathbf{w}_u компенсационного канала.

Средняя мощность P_z выходного сигнала z (10) УПС определяется по формуле

$$P_z = \langle \mathbf{z}^H \mathbf{z} \rangle = \langle (\mathbf{x}^H \mathbf{1} - \mathbf{u}^H \mathbf{w}_u)^H (\mathbf{x}^H \mathbf{1} - \mathbf{u}^H \mathbf{w}_u) \rangle = \langle \mathbf{1}^H \mathbf{x} \mathbf{x}^H \mathbf{1} - 2 \mathbf{w}_u^H \mathbf{A} \mathbf{x} \mathbf{x}^H \mathbf{1} + \mathbf{w}_u^H \mathbf{A} \mathbf{x} \mathbf{x}^H \mathbf{A}^H \mathbf{w}_u \rangle = \mathbf{1}^H \mathbf{R}_x \mathbf{1} - 2 \mathbf{w}_u^H \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{1} + \mathbf{w}_u^H \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{A}^T \mathbf{w}_u. \quad (11)$$

Критерий минимума средней мощности P_z [4, 7] означает минимизацию средней выходной мощности помех и шумов, так как мощность полезного сигнала на выходе основного канала УПС не зависит от сигнала y_k компенсационного канала, в котором отсутствует полезный сигнал.

Оптимальный ВВК $\mathbf{w}_{u \text{ opt}}$ компенсационного канала найдем из условия равенства нулю градиента средней мощности P_z (11) по вектору \mathbf{w}_u^H :

$$\nabla_{\mathbf{w}_u^H} (P_z) = 0.$$

Поскольку

$$\nabla_{\mathbf{w}_u^H} (P_z) = -2 \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{1} + 2 \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{A}^T \mathbf{w}_u = 0,$$

оптимальное значение ВВК в матричной форме с учетом формулы (7) приобретает вид

$$\mathbf{w}_{u \text{ opt}} = (\mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{1} = \mathbf{R}_u^{-1} \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{1}. \quad (12)$$

Используя уравнение выходного сигнала z (9)

$$z = \mathbf{x}^H \mathbf{1} - \mathbf{u}^H \mathbf{w}_{u \text{ opt}} = \mathbf{1}^H \mathbf{x} - \mathbf{w}_{u \text{ opt}}^H \mathbf{A} \mathbf{x} = (\mathbf{1}^H - \mathbf{A}^H \mathbf{w}_{u \text{ opt}}) \mathbf{x} = \mathbf{w}_{\text{УПС}} \mathbf{x}, \quad (13)$$

получаем формулу приведенного ВВК устройства УПС компенсационного типа

$$\mathbf{w}_{\text{УПС}} = (\mathbf{1} - \mathbf{A}^H \mathbf{w}_{u \text{ opt}}). \quad (14)$$

Отсюда нормированная ДН всего УПС с линейной L элементной АР может быть вычислена по формуле

$$S_{\text{ВЫХ}} = \mathbf{h}_C^H \mathbf{w}_{\text{УПС}} / L. \quad (15)$$

Выходное отношение сигнал/(помеха + шум) определяется отношением мощности полезного сигнала $P_{C \text{ ВЫХ}}$ к мощности помех и шума $P_{(\text{п+ш})\text{ВЫХ}}$ на выходе УПС:

$$\mu_{\text{ВЫХ}} = \frac{P_{C \text{ ВЫХ}}}{P_{(\text{п+ш})\text{ВЫХ}}} = \frac{\mathbf{w}_{\text{УПС}}^H \mathbf{R}_C \mathbf{w}_{\text{УПС}}}{\mathbf{w}_{\text{УПС}}^H \mathbf{M} \mathbf{w}_{\text{УПС}}}. \quad (16)$$

Выбор метода расширения зоны защиты. Существующие способы расширения зоны защиты от подавления полезных сигналов в главном луче ДН основаны на выборе оптимальной матрицы преобразования \mathbf{A} (5) в блоке БПФ (см. рис. 1), которая определяет его структуру, значение оптимального ВВК $\mathbf{w}_{u \text{ opt}}$ (12), и, следовательно, количество подавляемых помех, основные селективные свойства и эффективность синтезируемого УПС.

В статье рассматриваются два способа расширения зоны защиты.

1) Для расширения зоны защиты главного лепестка ДН в блоке БПФ при формировании матрицы преобразования \mathbf{A} двухдиагональный матричный оператор \mathbf{A}_1 (5) будем использовать дважды [6]

$$\mathbf{A}_{\text{дв}} = \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1 \text{ с множителем } \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{(L-2) \times (L-1)} \quad (17)$$

или трижды –

$$\mathbf{A}_{\text{тр}} = \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1, \quad (18)$$

где матрица \mathbf{A}_3 размерностью $(L-3) \times (L-2)$ имеет вид, подобный матрице \mathbf{A}_2 .

Следует отметить, что каждое добавление в виде множителя матрицы \mathbf{A} уменьшает степень свободы ААР на единицу.

2) В качестве второго метода авторами предлагается решение [5], использующее фазор расширения зоны защиты при формировании матрицы преобразования $\mathbf{A}_{\Delta\varphi}$ блока БПФ:

$$\mathbf{A}_{\Delta\varphi} = \mathbf{A}_5 \mathbf{A}_4. \quad (19)$$

При использовании этого метода во вторую диагональ матрицы \mathbf{A}_4 вводится фазор расширения зоны защиты $e^{j\Delta\varphi}$ с угловой добавкой плюс $\Delta\varphi$, а во вторую диагональ матрицы \mathbf{A}_5 – фазор $e^{-j\Delta\varphi}$ с угловой добавкой минус $\Delta\varphi$. Матрицы \mathbf{A}_4 и \mathbf{A}_5 приобретают вид:

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & -e^{j\Delta\varphi} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -e^{j\Delta\varphi} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -e^{j\Delta\varphi} \end{bmatrix}_{(L-1) \times L}, \quad \mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} 1 & -e^{-j\Delta\varphi} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -e^{-j\Delta\varphi} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -e^{-j\Delta\varphi} \end{bmatrix}_{(L-2) \times (L-1)},$$

где $\Delta\varphi$ – ширина зоны защиты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Условия проведения эксперимента. В соответствии с приведенными математическими алгоритмами адаптации в среде *MatLab* был создан программный комплекс, позволяющий сравнивать между собой влияние на вид ДН, диаграммы уровней и показатели эффективности УПС четырех вариантов расширения зоны защиты полезного сигнала: однократного $\mathbf{A}_{\text{одн}}$ (5), двукратного $\mathbf{A}_{\text{дв}}$ (17), трехкратного $\mathbf{A}_{\text{тр}}$ (18) использования двухдиагональной матрицы преобразования \mathbf{A} (5) и с помощью матрицы преобразования $\mathbf{A}_{\Delta\varphi}$ (19) на основе фазора расширения.

Моделировалась линейная эквидистантная АР с числом элементов $L=8$ и расстоянием между соседними элементами $d = \lambda/2$, при одновременном воздействии сигнала и двух или трех помех. Полезный сигнал приходит перпендикулярно линии расположения элементов АР с направления $\theta_c = 0$. Для обеспечения большей информативности проводимых исследований выбрано два характерных случая (рис. 2):

а) углы прихода первой $\theta_{п1} = -20^\circ$ и второй помехи $\theta_{п2} = 20^\circ$ соответствуют максимумам боковых лепестков ДН основного канала;

б) 1-я помеха при $\theta_{п1} = -7^\circ$ попадает в главный лепесток, а 2-я помеха при $\theta_{п2} = 20^\circ$ – в максимум бокового лепестка ДН.

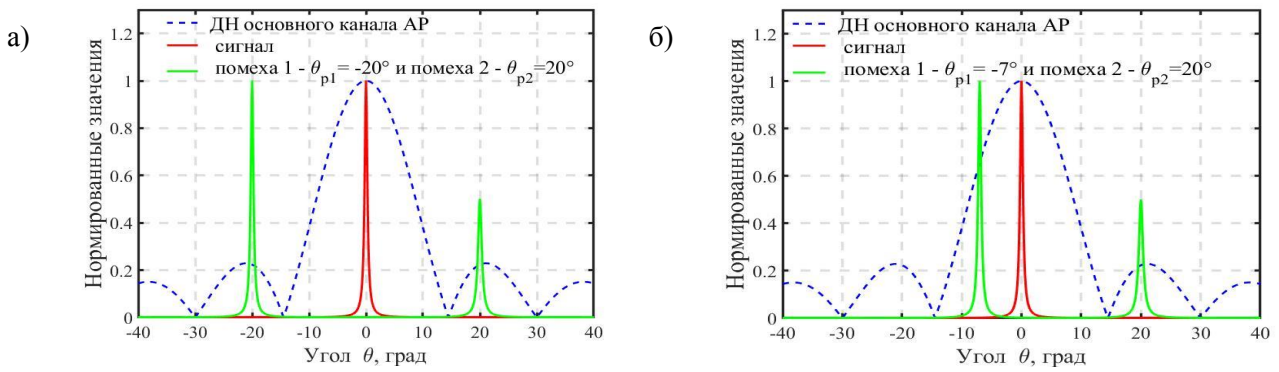


Рис. 2. Два фиксированных направления прихода помех:
 а – обе помехи попадают в боковые лепестки ДН; б – 1-я помеха в области главного лепестка ДН основного канала, 2-я помеха в максимуме бокового лепестка ДН

Вид диаграмм направленности. В ААР подавление помехового сигнала достигается за счет формирования нулей ДН в направлении источников помех [1, 8, 9]. Графики на рис. 3 показывают характер изменения вида нормированных ДН УПС в зависимости от направления прихода помех и от выбранного метода расширения зоны защиты полезного сигнала. Уровни сигнала, первой и второй помех на входе АР соответственно равны: $q_c=100$, $q_{п1} = 100$, $q_{п2} = 50$. Синяя кривая, показывающая вид нормированной ДН стандартной АР основного канала, служит опорным графиком для сравнения полученных результатов.

Из анализа графиков на рис. 3,а становится понятным, что при совпадении углов прихода первой и второй помех с положением максимума первых боковых лепестков ДН стандартной АР, вид матрицы преобразования A практически не сказывается на форме ДН УПС, за исключением матрицы $A_{\Delta\varphi}$ (19). В направлении помех $\theta_{п1} = -20^\circ$ и $\theta_{п2}=20^\circ$ формируются «нули» ДН, обеспечивающие их подавление. Фиолетовый график показывает, что в этом случае наиболее резкие изменения ДН происходят в УПС с матрицей преобразования $A_{\Delta\varphi}$ (19), фазор расширения зоны защиты $e^{\mp j\Delta\varphi}$ которой ограничен углами $\Delta\varphi < 3^\circ$. При превышении этих значений возникают недопустимые искажения ДН, ухудшающие эффективность применения УПС.

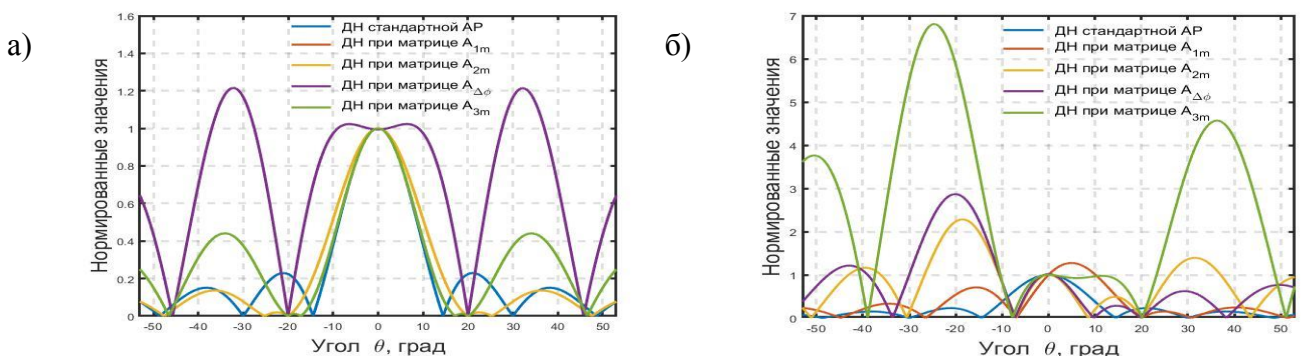


Рис. 3. Зависимость нормированного значения ДН УПС от вида матрицы преобразования:

а – при $\theta_{п1} = -20^\circ$; $\theta_{п2}=20^\circ$; б – при $\theta_{п1} = -7^\circ$; $\theta_{п2}=20^\circ$

Анализ графиков на рис. 3,б показывает, что при попадании первой помехи в главный лепесток ДН ($\theta_{п1} = -7^\circ$) условия работы УПС значительно усложняются, и вид матрицы преоб-

разования \mathbf{A} оказывает существенное влияние на вид диаграммы направленности. В направлении помех по-прежнему формируются «нули» ДН. Однако при трехкратной матрице $\mathbf{A}_{тр}$ (18) главный лепесток ДН УПС (зеленая кривая на графике) расширяется, боковые лепестки ДН резко возрастают, что значительно снижает степень подавления помех.

На рис. 4 представлены результаты моделирования зависимости ширины диаграммы уровней сигнала на выходе УПС от вида матрицы преобразования \mathbf{A} БПФ при сканировании ДН антенны в секторе углов $\theta_a = [-40^\circ, 40^\circ]$ для двух случаев прихода помехи, показанных на рис. 2, а и б. В качестве диаграммы уровней $E_z(\theta_a)$ использовался уровень выходной мощности P_z (11), нормированный к максимальному значению полезного сигнала $P_{с\max}$: $E_z = P_z/P_{с\max} = P_z/L^2 q_c$. Диаграмму уровней можно назвать динамической диаграммой направленности АР, показывающей величину нормированных энергетических составляющих сигнала и помех на выходе УПС при сканировании ДН антенны.

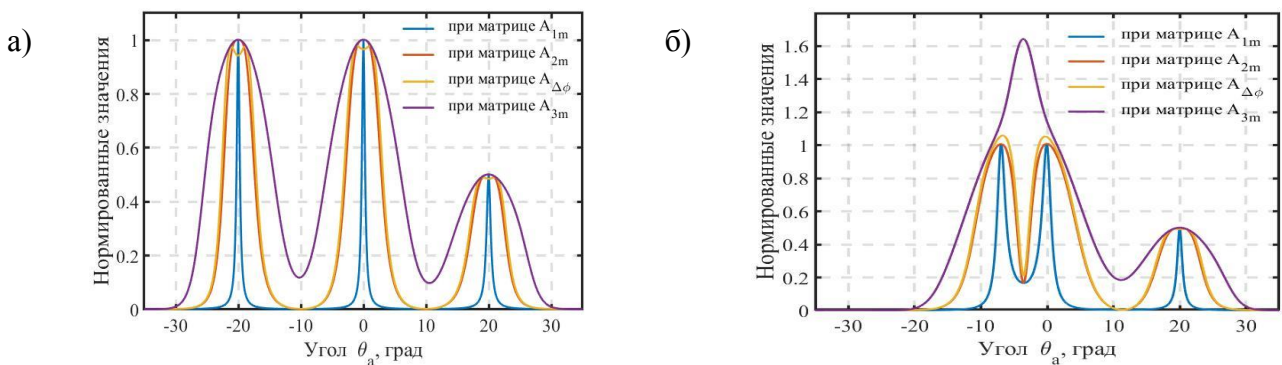


Рис. 4. Зависимость диаграммы уровней на выходе УПС при расширении сектора защиты от вида матрицы преобразования:

а – при $\theta_{п1} = -20^\circ$, $\theta_{п2} = 20^\circ$; б – при $\theta_{п1} = -7^\circ$, $\theta_{п2} = 20^\circ$

Графики рис. 4, а соответствуют воздействию помех в область боковых лепестков ДН основного канала (см. рис. 2, а). При сканировании ДН УПС по углу в пределах верхней полушеры $\theta_a = [-40^\circ, 40^\circ]$ диаграмма уровней $E_z(\theta_a)$ при матрице преобразования $\mathbf{A}_{одн}$ (5) имеет узкие острые пики (синяя кривая) как в направлениях прихода сигнала, так и помех. Малая ширина пиков $E_z(\theta_a)$ указывает на то, что при выставлении главного лепестка ДН на сигнал требуется высокая точность юстировки АР, которая не приемлема для информационно-связных радиотехнических систем. Согласно графикам на рис. 4, а применение матриц преобразования $\mathbf{A}_{дв}$ (17), $\mathbf{A}_{тр}$ (18) и $\mathbf{A}_{\Delta\phi}$ (19) приводит к расширению зоны защиты полезного сигнала по главному лепестку ДН в несколько раз.

На рис. 4, б показано, что при воздействии первой помехи $\theta_{п1} = -7^\circ$ в область главного лепестка ДН частотная избирательность УПС резко изменяется. Согласно фиолетовому графику при матрице преобразования $\mathbf{A}_{тр}$ (18) алгоритм адаптации по схеме Хоуэллса – Эпплбаума перестает различать сигнал и помеху, пытаясь обеспечить их одновременный оптимальный прием, коэффициент подавления помехи и соотношение сигнал/помеха при этом на выходе УПС резко уменьшаются. Следовательно, в сложной помеховой обстановке чрезмерное расширение зоны защиты главного лепестка и применение матрицы преобразования $\mathbf{A}_{тр}$ недопустимы. При этом матрицы $\mathbf{A}_{одн}$, $\mathbf{A}_{дв}$ и $\mathbf{A}_{\Delta\phi}$ по-прежнему обеспечивают селекцию сигнала из помех.

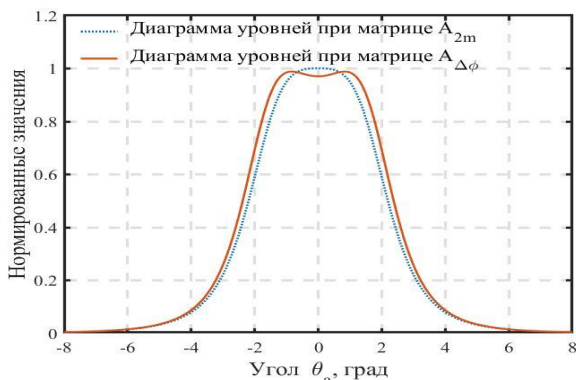


Рис. 5. Сравнение диаграммы уровней выходного сигнала УПС с матрицами преобразования $A_{дв}$ и $A_{\Delta\phi}$ при $\theta_{п1} = -20^\circ$, $\theta_{п2} = 20^\circ$

Графики диаграммы уровней на рис. 5 показывают результат сравнения двух равнозначных по схмотехническим затратам методов расширения зоны защиты $A_{дв}$ и $A_{\Delta\phi}$, основанных на двукратном применении матриц преобразования. Согласно красному графику, применение предложенного авторами метода $A_{\Delta\phi}$ не обеспечивает значительного выигрыша в расширении зоны защиты, однако более плоская и широкая вершина диаграммы уровней и прямоугольный характер ДН (рис. 3,а) отдают ему преимущество при использовании в схеме помехоустойчивого дискриминатора ААР.

Зависимость отношения $C/(П+Ш)$ от

методов расширения зоны защиты полезного сигнала. Эффективность адаптивных АР компенсационного типа в большинстве случаев оценивается величиной коэффициента подавления помехи, который определяется как отношение средней мощности помехи на основном входе к средней мощности помехи на выходе компенсатора [4, 7]. К сожалению, данный показатель наглядно демонстрирует только степень подавления помех, которая обеспечивается изменением формы ДН ААР и формированием нулей в направлении на источник помех, но не отражает влияние адаптации на уровень мощности выходного полезного сигнала. Поэтому целесообразно результирующую эффективность приема полезного сигнала оценивать величиной отношения сигнал/(помеха + шум) $\mu_{вых}$ (16) на выходе УПС.

На рис. 6 представлены графики зависимости отношения $\mu_{вых}$ (16) на выходе УПС от ширины зоны защиты главного лепестка ДН основного канала, определяемой матрицами преобразования: $A_{одн}$ (5), $A_{дв}$ (17), $A_{тр}$ (18) и $A_{\Delta\phi}$ (19), для следующих условий: направление прихода сигнала $\theta_{др} = 0^\circ$, направления первой и второй помех фиксированы и соответствуют рис. 2, а третья помеха сканирует в диапазоне углов $\theta_{п3} = [-90^\circ, 90^\circ]$, $q_c = 50$; $q_{п1} = q_{п2} = 250$; мощность сканирующей помехи $q_{п3} = 200$; параметры АР: $L = 8$, $d = 5$ см, $\lambda = 10$ см. При данных условиях отношение $C/(П+Ш)$ на входе АР УПС составляет 0,071.

На рис. 6,а показан случай, когда первая и вторая помехи приходят с фиксированных направлений $\theta_{п1} = -20^\circ$, $\theta_{п2} = 20^\circ$, а третья помеха сканирует в диапазоне углов $\theta_{п3} = [-40^\circ, 40^\circ]$. Видно, что в области боковых лепестков ДН УПС обеспечивает высокое подавление помех, величина отношения $C/(П+Ш)$ имеет приблизительно постоянное значение ($\mu_{вых} > 200$) и слабо зависит от метода расширения.

Матрица преобразования $A_{\Delta\phi}$ проигрывает матрице $A_{дв}$ в районе боковых лепестков, а в области основного лепестка обе матрицы обеспечивают одинаковое отношение $C/(П+Ш)$, и графики сливаются. Минимальное значение отношения $\mu_{вых} = 0.21$ имеет при совпадении углов прихода сканирующей помехи и сигнала, вследствие отсутствия подавления помех в области максимума главного лепестка ДН. Причем ширина области подавления строго определяется шириной зоны защиты основного сигнала.

Для сравнения нижний график характеризует низкую помехоустойчивость стандартной АР: в области боковых лепестков ДН на выходе основного канала УПС отношение $\mu_{вых} = 1.8$, а во всей области главного лепестка оно уменьшается до 0,2, т. е. полезный сигнал подавлен.

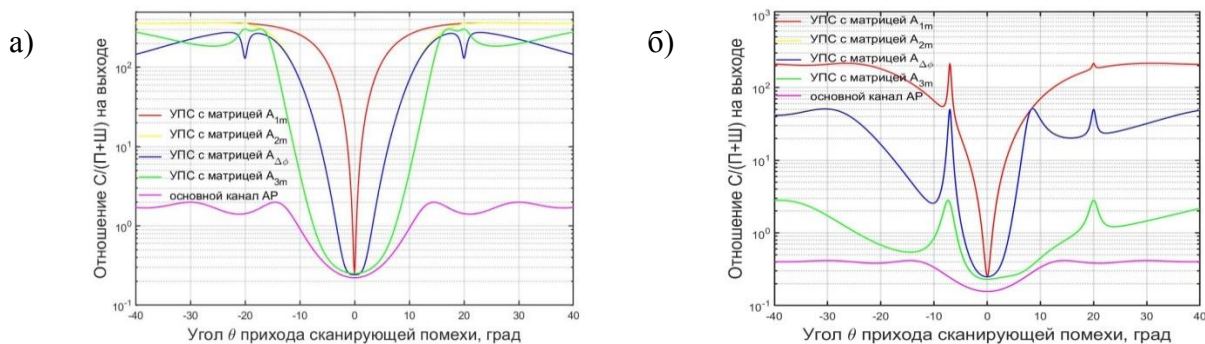


Рис. 6. Влияние ширины зоны защиты основного лепестка ДН на отношение сигнал/(помеха + шум) на выходе УПС:

а – при $\theta_{п1} = -20^\circ, \theta_{п2} = 20^\circ$; б – при $\theta_{п1} = -7^\circ, \theta_{п2} = 20^\circ$

Как показывают графики на рис. 6, б картина резко меняется при воздействии стационарной первой помехи $\theta_{п1} = -7^\circ$ в область главного лепестка ДН основного канала. Согласно нижнему графику, полезный сигнал основного канала без принятия специальных мер будет подавлен, так как во всем диапазоне углов отношение $\mu_{\text{вых}} < 0,4$. Как и следовало ожидать, четко проявилась зависимость размера зоны подавления УПС от ширины зоны защиты полезного сигнала. Локальный максимум отношения $C/(П+Ш)$ имеет место в направлении стационарных помех за счет формирования «нулей» ДН. За счет лучших избирательных свойств БПФ выигрыш в помехоустойчивости среди всех рассматриваемых методов расширения зон защиты обеспечивает матрица преобразования $A_{\text{одн}}$, так как отношение $\mu_{\text{вых}} < 1$ только в области углов $\theta_{п3} = [-1,0^\circ; 1,0^\circ]$, что составляет 11% от ширины ДН $[-8,7^\circ; 8,7^\circ]$ основного канала по уровню 0,5. Применение матриц преобразования $A_{\text{дв}}$ и $A_{\Delta\phi}$ дает примерно одинаковые результаты, подавление полезного сигнала происходит только в зоне $\theta_{п3} = [-4,2^\circ; 4,6^\circ]$ (49% от ширины ДН основного канала). Зеленая кривая показывает, что при близкорасположенной по направлению помехи к сигналу применение матрицы $A_{\text{тр}}$ нецелесообразно, так как подавление сигнала в УПС ($\mu_{\text{вых}} < 1$) осуществляется в области $\theta_{п3} = [-7,1^\circ; 17,2^\circ]$ большей ширины ДН АР. То, что это произойдет и пространственный фильтр перестанет селективировать сигнал из помех, подтверждало «поведение» фиолетовой кривой диаграммы уровней на рис. 4, б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение компенсационного метода построения адаптивной АР позволяет обеспечить селекцию сигнала в сложной помеховой обстановке даже в тех случаях, когда он подавлен на выходе АР основного канала. Вид матрицы преобразования БПФ существенно влияет на характеристики реализованного пространственного фильтра, расширяя зону защиты полезного сигнала и изменяя степень подавления помех в области главного лепестка ДН УПС.

2. Применение предложенных способов расширяет зону защиты с 12% от ширины ДН основного канала по уровню 0,5 при традиционной матрице преобразования $A_{\text{одн}}$ (5) БПФ до 49% при двукратном $A_{\text{дв}}$ (17) и $A_{\Delta\phi}$ (19) использовании матрицы преобразования, что позволяет на практике снизить требования к точности юстировки антенной системы и уменьшить потери полезной информации в главном луче антенной решетки.

3. В сложной помеховой обстановке целесообразнее использовать двукратные матрицы преобразования $A_{\text{дв}}$, $A_{\Delta\phi}$, которые обладают высокими пространственными селективными свойствами, подавляют помехи во всей области боковых лепестков и в 98% основного ле-

пестка ДН УПС. Использование трехкратной матрицы преобразования $A_{тр}$ при попадании помехи в область главного лепестка ДН недопустимо в связи с ее низкими селективными свойствами.

4. Применение предложенного авторами метода с матрицей преобразования $A_{дф}$, имеющей отличие в содержании диагональных элементов, не обеспечивает существенного выигрыша в расширении зоны защиты и показателях эффективности по сравнению с двукратной матрицей преобразования $A_{дв}$. Однако формирование более плоской и широкой вершины диаграммы уровней дает методу с матрицей преобразования $A_{дф}$ преимущество при использовании в схеме помехоустойчивого дискриминатора ААР.

Список используемых источников

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
2. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. – М.: Наука, 1991. – 200 с.
3. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения / Б. Уидроу [и др.] // ТИИЭР. – 1975. – Т. 63, № 12. – С. 69–98.
4. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Сорокин И.С. Регуляризованная оценка весового вектора адаптивного компенсатора помехи // Известия вузов. Радиофизика. – 2015. – Т. 58, № 12. – С. 1083–1093.
5. Попов А.С. Пространственная селекция помех при разнесенном приеме сигналов // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 1. – С. 39–44.
6. Пат. 1840427 СССР, МКП Н01Q 3/26 (2006/1). Адаптивная антенная решетка / Григорьевский А.В., Ермолаев В.Т., Лузгин Л.С.; заявитель и патентообладатель Нижегород. науч.-исслед. ин-т радиотехники. – № 3135340/09; заявл. 20.02.1986; опублик. 20.03.2007, Бюл. № 8. – 20 с.
7. Грибов П.С., Шатилов А.Ю. Повышение эффективности пространственно-временной компенсации помех в радионавигационных приемниках за счет предварительной пространственной обработки сигналов от антенной решетки // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, № 9(14). – С. 25–33.
8. Попов А.С., Пименов В.Ф. Моделирование характеристик антенной решетки, оптимальной по критерию минимума среднеквадратического отклонения, при взаимной корреляции сигнала и помех // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 9. – С. 704–714.
9. 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. – 2019. – Вып. 666. – С. 77–83.
10. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.

М.В. Куликов,

кандидат технических наук

Военная академия связи имени С.М. Будённого, г. Санкт-Петербург;

М.П. Сагалаев

ООО «СТЦ», г. Санкт-Петербург

СПОСОБЫ РАДИОМАСКИРОВКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Представлены результаты геолокации земной станции спутниковой связи, функционирующей в обычных условиях. Предлагаются способы преднамеренной защиты (маскировки) земных станций спутниковой связи от систем определения местоположения источников радиоизлучений, основанные на излучении синхронно с основным сигналом сдвинутых копий этого сигнала на спутники-ретрансляторы и на излучении синхронно с основным сигналом шумоподобных сигналов с высокой разрешающей способностью по времени в направлениях основного и зеркальных спутников-ретрансляторов. Приведены результаты реализации разработанных способов радиомаскировки спутниковых станций, подтвержденные математическим моделированием и натурными экспериментами.

Ключевые слова: спутниковая геолокация, спутник-ретранслятор, определение местоположения, радиомаскировка, спутниковая станция.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время операторы систем спутниковой связи (ССС), использующие спутники-ретрансляторы на геостационарной орбите (ГСО), сталкиваются с воздействием радиопомех или несанкционированным использованием земными станциями (ЗС) их частотно-временного ресурса [1]. С целью локализации нелегитимных ЗС органами контроля за использованием спутниковых ресурсов применяются системы спутниковой геолокации (ССГ) [2]. Термин спутниковая геолокация означает определение местоположения (ОМП) источников радиоизлучений (ИРИ), наземного и воздушного базирования по сигналам, принятым со спутников-ретрансляторов (СР), которые функционируют в режиме «без обработки на борту» и расположены на ГСО [2].

МУЛЬТИСПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ГЕОЛОКАЦИИ

Широкое распространение получили мультиспутниковые системы геолокации (МССГ), использующие два или более СР при ОМП ИРИ. Для функционирования МССГ основным требованием является наличие как минимум двух СР, которые имеют одинаковые частоты восходящей линии связи, поляризацию антенной системы и зону покрытия (так называемые «зеркальные» спутники). Кроме того, МССГ требуют знания точного положения и скоростей движения всех задействованных в позиционировании СР.

При мультиспутниковой архитектуре ССГ определение местоположения ИРИ осуществляется на основе использования разностно-временных и разностно-доплеровских измерений или их комбинаций [3, 4]. В работах [2–4] приведены результаты анализа параметров, а именно координат СР на ГСО, временной задержки сигналов с СР, фазовых измерений, снижающих точность геолокации при использовании указанных методов определения. Однако в них не рассматриваются способы, препятствующие успешной геолокации. Одним из таких способов является использование земной станцией дополнительных радиоизлучений, которые исключают деструктивное воздействие на сигналы линий спутниковой связи, но снижают эффективность работы ССГ.

Для служб радиоконтроля за спутниковым ресурсом и для операторов спутниковой связи представляет особый интерес исследование преднамеренной защиты от спутниковой геолокации («антигеолокация») и возможность снижения эффективности работы ССГ.

Схема мультиспутниковой системы геолокации при приеме сигналов трех СР представлена на рис. 1.

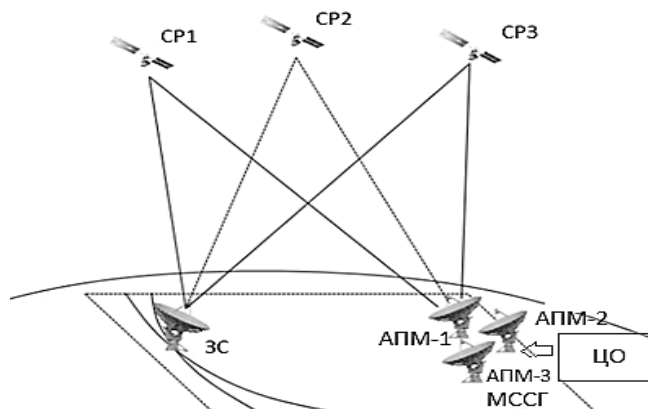


Рис. 1. Схема ССГ для трех СР

Для ОМП земной станции ССС применяется разностно-дальномерный метод (РДМ). В данной схеме СР 1 будет являться «основным» СР, так как он обеспечивает ретрансляцию сигнала по основному лепестку диаграммы направленности (ДН) антенной системы ЗС. Второй и третий СР – «зеркальными», находятся на некотором расстоянии от СР 1 и способны передавать то же радиоизлучение по боковому лепестку ДН, но с большим затуханием и с другой частотой переноса. В результате корреляционной обработки сигналов, принятых ССГ, которая состоит из нескольких антенно-программных модулей (АПМ) и центра обработки (ЦО), определяется разница во времени прихода $\Delta\tau$ между сигналами, соответствующего разности хода трасс прохождения сигнала через основной и зеркальные СР:

$$\Delta\tau = \frac{(R_{зс-ср1} + R_{ср1-ссг}) - (R_{зс-ср2} + R_{ср2-ссг})}{c}, \quad (1)$$

где c – скорость света.

По РДМ на поверхности Земли можно построить линию положения постоянных разностей, которая в общем случае является гиперболой на поверхности Земли. ОМП ЗС осуществляется путем поиска точек пересечения линий положения, полученных в результате корреляционной обработки сигналов с нескольких зеркальных СР.

По данной схеме была создана модель в системе *Matlab*. Проверка адекватности созданной модели ССГ осуществлялась на основе обработки записей сигналов, полученных в результате реального сеанса связи ЗС с известными координатами (г. Санкт-Петербург) с основного (Ямал 202) и одного зеркального (Экспресс АМ7) СР на частоте 3936 МГц. Взаимная корреляционная функция (ВКФ) при этом

$$r(\tau) = \int_0^T S_1(t)S_2(t+\tau)dt, \quad (2)$$

где T – время наблюдения.

Вид взаимной корреляционной функции, полученный при обработке основного и зеркального сигналов, представлен на рис. 2. По оси Y на графике показано значение нормированного коэффициента корреляции к среднему уровню шума в полосе излучения, по оси X – временная задержка сигналов относительно друг друга.

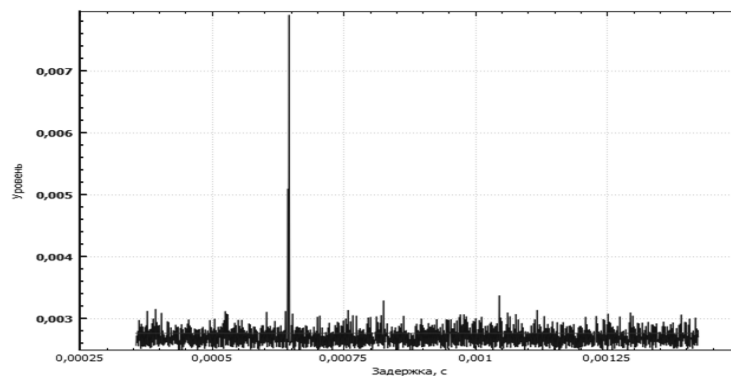


Рис. 2. Вид ВКФ основного и зеркального сигналов

Корреляционная функция имеет один максимум на временной задержке, которая соответствует разности хода излученного ЗС сигнала через основной и зеркальный СР и по которой может быть построена единственная линия положения, проходящая через истинные координаты ЗС.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАДИОМАСКИРОВКЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

1-й способ. ОМП ЗС ССС усложняется при излучении синхронно с основным сигналом маломощных (ниже уровня шума) сдвинутых копий этого сигнала на зеркальные спутники. Автокорреляционная функция таких сигналов представляет собой набор как истинных, так и ложных корреляционных пиков. Данный способ не скрывает истинную позицию ЗС, а «маскирует» ее в группе других, ложных позиций. Для реализации такого способа необходима управляемая линия задержки и несколько передающих трактов для каждого из зеркальных спутников [5].

2-й способ. Наряду с передачей задержанных копий сигнала, предлагается более простой с точки зрения реализации способ антигеолокации – излучение синхронно с основным сигналом шумоподобных сигналов с высокой разрешающей способностью по времени в направлениях основного и зеркальных СР. При этом, с одной стороны, в целях скрытности сигнал должен находиться под шумами приемо-передающих транспондеров СР, с другой стороны, уровень излучения должен быть достаточным, чтобы в результате геолокации появились несколько ложных корреляционных пиков, по уровню как превосходящих истинный корреляционный пик, так и находящихся ниже его. Преимущество такого способа состоит в том, что нет необходимости формировать сдвинутые копии защищаемого сигнала. Это уменьшает сложность реализации аппаратуры антигеолокации. Кроме того, такая аппаратура может устанавливаться в другом географическом месте, отличном от положения защищаемой ЗС ССС. Недостатком такого способа является принципиальная возможность демодулирования защищаемого сигнала и после обратного формирования на основе битового потока отсчетов комплексной огибающей сигнала получение истинного корреляционного пика.

Таким образом, рассмотренные два способа предотвращения геолокации не требуют изменения существующего оборудования ЗС систем спутниковой связи, поэтому их моделирование, практическая реализация и дальнейшее сравнение представляют особый интерес.

Для исследования 1-го способа преднамеренной защиты от спутниковой геолокации (алгоритма антигеолокации) использовалось моделирование маломощного радиоизлучения на зеркальные СР, сформированного из нескольких сдвинутых копий основного сигнала. В результате приема ССГ такого вида радиоизлучения полученная взаимная корреляционная

функция основного и зеркальных сигналов имеет уже несколько локальных максимумов (рис. 3). По измеренным временным задержкам на выходе устройства корреляционной обработки строятся соответствующие линии положения (рис. 4). Использование случайной задержки между копиями основного сигнала приводит к случайным разностям хода между сигналами, принятыми с СР2 и СР3, и, соответственно, к случайным смещениям ложных линий положения относительно истинной линии. Вследствие появления большого числа ложных линий положения осуществляется получение набора координат местоположения как истинной ЗС, так и ложных (несуществующих) ЗС, что очевидно значительно снижает эффективность работы ССГ.

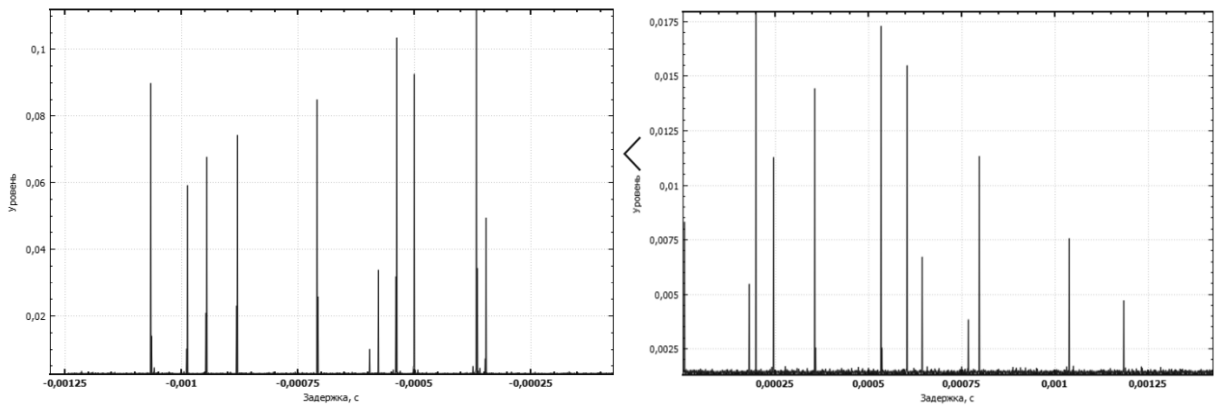


Рис. 3. Вид ВКФ основного и зеркального сигналов



Рис. 4. Линии положения, полученные по результатам корреляционного анализа

Практический эксперимент проводился с использованием действующего оборудования, защищаемым сигналом являлся сигнал, излучаемый земной станцией с известными координатами (г. К*). В блок формирования сигналов станции была записана группа сдвинутых по времени копий сигнала, которые были синхронно с основным сигналом излучены на зеркальный СР. Пики взаимной корреляционной функции и линии положения, полученные в результате обработки сигналов с обоих СР, представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

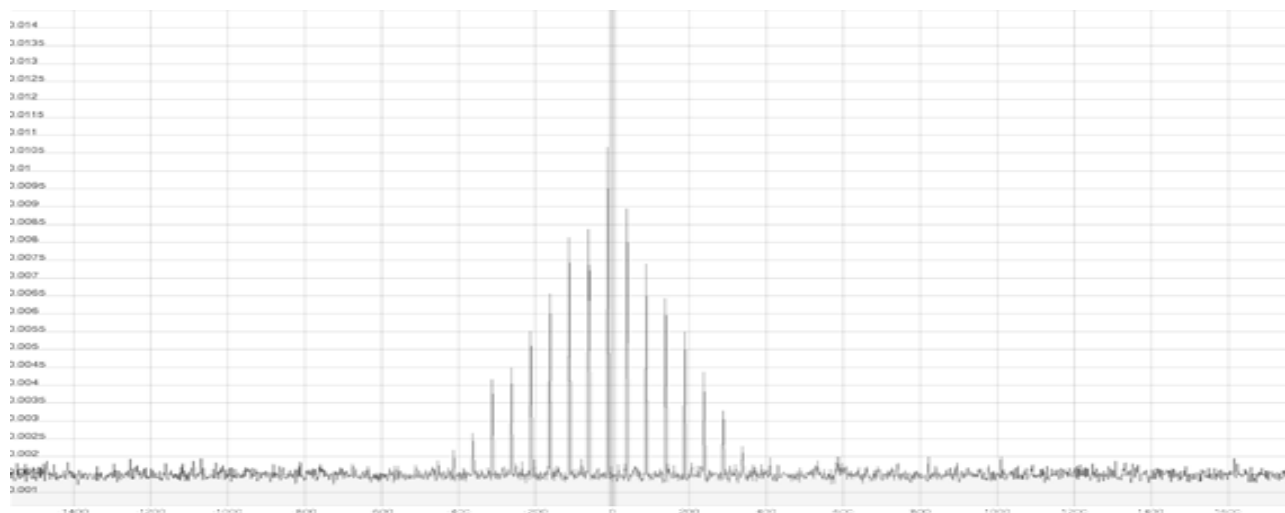


Рис. 5. ВКФ основного и зеркальных сигналов

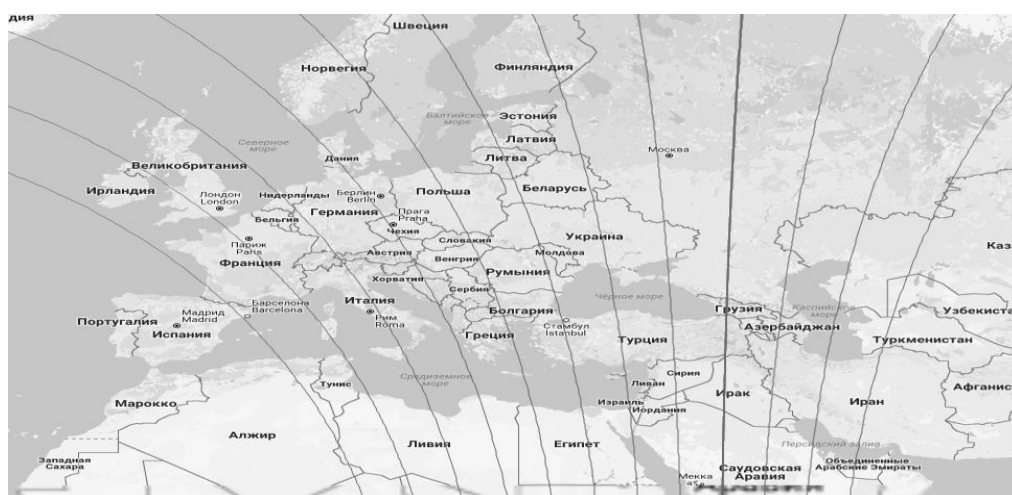


Рис. 6. Линии положения, полученные по результатам корреляционного анализа

Проведенный эксперимент подтвердил результаты моделирования, а также показал снижение эффективности работы ССГ при излучении сдвинутых копий основного сигнала.

Исследование способа антигеолокации на основе радиоизлучения шумоподобных сигналов с высокой разрешающей способностью по времени проводился с ЗС, структура передаваемого сигнала которой заранее не известна. В эксперименте участвовала ЗС с известными координатами, расположенная в г. Н*. В основной и зеркальные спутники совместно с основным сигналом излучались сигналы со сдвинутыми по времени псевдослучайными последовательностями (ПСП). Вид взаимной корреляционной функции защищаемого и мешающего геолокации излучаемого сигнала с ПСП представлен на рис. 7.

Результаты практического эксперимента также дают большое количество ложных пиков корреляции, и, следовательно, показывают, что данным способом можно замаскировать истинную позицию ЗС в группе других, ложных позиций.

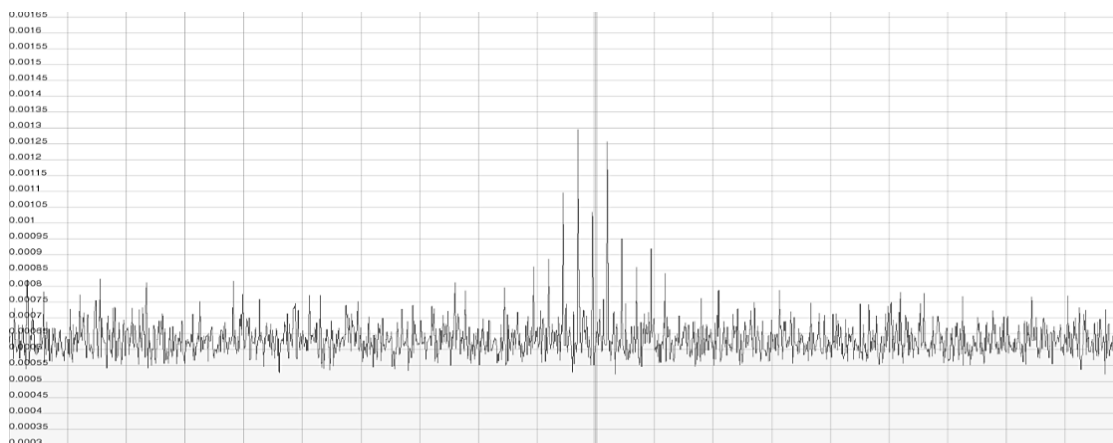


Рис. 7. Вид ВКФ основного и зеркального сигналов

ВЫВОД

На основании проведенного анализа возможных способов активной радиомаскировки, а также результатов проведенных практических экспериментов можно сделать вывод, что задача затруднения определения местоположения ЗС ССС средствами геолокации может успешно решаться. Разработка устройств, реализующих приведенные способы радиомаскировки, может являться актуальной практической задачей.

Список используемых источников

1. Верзунов Г.В., Корвяков П.В., Мозучев В.И. Спутниковая связь: радиопеленгация земных станций // Технологии и средства связи. – 2009. – С. 98–102.
2. Волков Р.В., Севидов В.В., Чемаров А.О. Точность геолокации разностно-дальномерным методом с использованием спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2014. – № 9. – С. 12–19.
3. Севидов В.В., Чемаров А.О. Определение координат спутников-ретрансляторов в разностно-дальномерной системе геолокации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 3. – С. 41–47.
4. Kamyshnikova A.S., Sukhotin V.V. Determination of the radio transmitter coordinates in satellite communication systems // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2016. – С. 1–3.
5. Пат. РФ № 2707878. Способ и устройство активной радиомаскировки местоположения земной станции / Кистанов П.А., Мандрика Г.В., Наумов А.С., Сагалаев М.П., Смирнов П.Л., Титов А.А., Царик О.В. – Опубл. 14.06.2019.

В.В. Лисицкий,
кандидат технических наук;
Б.Б. Панков

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Представлена методика оценивания качества функционирования информационно-измерительных систем реального времени в условиях нестабильности их энергетических параметров с применением математического аппарата теории порядковых статистик. На основе сравнительного анализа алгоритмов выборочного среднего и выборочной медианы получены зависимости ошибки оценки энергетического потенциала от различных свойств распределений измеряемых параметров. Показано, что при увеличении неравноточности измерений алгоритм выборочной медианы имеет преимущества по сравнению с выборочным средним.

Ключевые слова: энергетический потенциал, эффективная площадь рассеяния, мощность передатчика, шум приемника, информационно-измерительная система, мажоритарное преобразование, алгоритм выборочной медианы.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость контроля энергетических параметров информационно-измерительных систем реального времени обусловлена особенностями их применения при обнаружении и сопровождении космических объектов (КО). Вследствие скоротечности протекающих процессов, а также высоких требований к достоверности принимаемых решений возникает необходимость обеспечения высокой степени автоматизации процессов обработки информации на всех уровнях информационно-измерительной системы – от приема отраженных сигналов до выдачи параметров сформированной траектории на вышестоящие пункты управления [1]. Для эффективной работы алгоритмов экстраполяции и построения траекторий КО следует непрерывно сопровождать его в течение времени, не меньшем, чем заданное в техническом задании. Это возможно только при условии стабильности энергетических параметров измерительной системы.

Основной характеристикой энергетических возможностей измерительной системы является ее энергетический потенциал, который существенно зависит от трех параметров – мощности передатчика, шума приемника и эффективной площади рассеяния космического объекта (ЭПР КО). Измерения указанных параметров в каждый момент времени имеют случайную составляющую с различными статистическими характеристиками [2]. Для контроля энергетического потенциала в настоящее время применяется метод осреднения результатов измерений, полученных в ходе проводок эталонных космических объектов – калибровочных сфер [3]. Периодичность такого контроля зависит от наличия эталона в зоне ответственности конкретной измерительной системы и в среднем составляет один-два часа. Этого недостаточно для оперативного оценивания текущих энергетических возможностей систем реального времени. Также при наличии систематических или случайных погрешностей измерений метод осреднения результатов полностью воспроизводит их в величине ошибки оценки измеряемой величины. Необходимой оперативности контроля энергетического потенциала можно добиться, проводя измерения сигнала, отраженного от космических объектов сложной формы, находящихся в зоне ответственности. При этом для получения адекватной оценки необходимо учитывать нестабильность параметров, которые существенно влияют на энергетический потенциал. Повышение точности и надежности получаемой оценки возможно за счет приме-

нения эффективных методов статистической обработки результатов измерений, одним из которых является мажоритарное преобразование, или алгоритм выборочной медианы.

УЧЕТ СЛУЧАЙНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Основными этапами разработанной методики являются:

1. Проведение измерения отношения сигнал/шум на выходе устройства первичной обработки информационно-измерительной системы.
2. Проведение тестов функционального контроля для определения мощности излучения и уровня шума приемника.
3. Вычисление значения энергетического потенциала в каждом измерении.
4. Статистическая обработка измерений с применением алгоритма выборочной медианы.
5. Вычисление оценки энергетического потенциала в серии измерений.
6. Вычисление поправочных коэффициентов к измеряемым параметрам.

Для реализации алгоритма выборочной медианы необходимо сформировать вариационный ряд из измерений x_i неизвестной величины Π_c энергетического потенциала. Затем элементы вариационного ряда упорядочиваются в порядке возрастания, и из сформированной последовательности выбирается средний член, если количество измерений нечетно, или два средних члена усредняются, если количество измерений четно. Расположенные в порядке возрастания элементы вариационного ряда называются порядковыми статистиками $x_{(i)}$. Оценка $\bar{\Pi}_c$ энергетического потенциала представляет собой нелинейную функцию $x_{(i)}$:

$$\bar{\Pi}_c = f(x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(N)}) \quad (1)$$

Преимущество такой нелинейной оценки заключается в том, что значение имеет только положение измерения в вариационном ряду, а не принадлежность конкретному прибору.

Для определения свойств ошибки оценки энергетического потенциала, получаемой по алгоритму выборочной медианы, рассмотрим параметры законов распределений при измерении мощности передатчика $P_{и}$, мощности шума приемника $P_{ш}$ и эффективной площади рассеяния КО $\sigma_{эф}$.

Для общего случая, когда измерения x_i неравноточны и законы распределения погрешностей n_i всех трех измеряемых величин различны, плотность вероятности $f_{(2)}(x)$ ошибки оценки энергетического потенциала по алгоритму выборочной медианы имеет вид [4]:

$$\begin{aligned} f_{(2)}(x) = & f_1(x)\{F_2(x)[1 - F_3(x)] + F_3(x)[1 - F_2(x)]\} + \\ & + f_2(x)\{F_1(x)[1 - F_3(x)] + F_3(x)[1 - F_1(x)]\} + \\ & + f_3(x)\{F_1(x)[1 - F_2(x)] + F_2(x)[1 - F_1(x)]\}. \end{aligned} \quad (2)$$

В формуле (2) учитываются функции и плотности распределений погрешностей каждой измеряемой величины, так как при формировании медианы все результаты измерений являются равноправными.

Рассмотрим две составляющие погрешности измерений: систематическую, равную математическому ожиданию m_i , и чисто случайную n_i^0 , с нулевым математическим ожиданием. Каждая из этих компонент по-разному влияет на параметры ошибки оценки.

Предположим, что погрешности n_i имеют нормальное распределение, их дисперсии одинаковы: $\sigma_i^2 = \sigma^2$, $i = 1, 2, 3$. Математические ожидания измерений двух величин равны нулю, а третий прибор дает систематическую составляющую $m_2 = m_3 = 0, m_1 \neq 0$. Наличие систематической составляющей вызывает постоянный сдвиг в ошибке оценки, который равен математическому ожиданию $m_{(2)}$ выборочной медианы $n_{(2)}$:

$$m_{(2)} = \sigma \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \Phi \left(\frac{m_1}{\sqrt{3}\sigma} \right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{m_1^2}{4\sigma^2}} \Phi \left(\frac{m_1}{2\sqrt{3}\sigma} \right) + \frac{m_1}{\sigma} \left[1 + \Phi \left(\frac{m_1}{2\sigma} \right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{m_1}{\sigma} T \left(\frac{m_1}{\sigma} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

где $T(x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{(y-x)^2}{2} \right] \right\} \left[1 + \Phi \left(\frac{y}{\sqrt{2}} \right) \right]^2 dy$; $T(\infty) = \sqrt{2\pi}$; $T(0) = \frac{\sqrt{2\pi}}{3}$; $T(-\infty) = 0$.

Функция $T(x)$ представлена графиком на рис. 1.

Оптимальная оценка для несмещенных равноточных измерений равна выборочному среднему, а при наличии смещения одного из измерений будет иметь систематическую составляющую смещения, равную $\bar{m} = m_1/3$.

Для исследования качества получаемых оценок были построены зависимости относительного математического ожидания выборочной медианы $m_{(2)}/\sigma$ (кривая 1 на рис. 2) и относительного математического ожидания выборочного среднего \bar{m}/σ (кривая 2) от относительного смещения измерений одного из параметров m_1/σ .

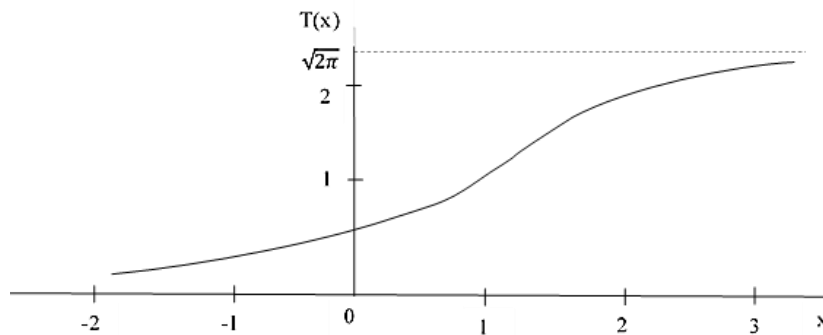


Рис. 1. График функции $T(x)$

Видно, что с увеличением смещения m_1 систематические составляющие ошибок у выборочной медианы и выборочного среднего возрастают, однако возрастание происходит по-разному. Для оценки по выборочному среднему характерно неограниченное возрастание величины \bar{m} при возрастании m_1 , в то время как систематическая составляющая ошибки оценки по выборочной медиане остается ограниченной во всем диапазоне возможных значений m_1 и при $m_1 \rightarrow \infty$ стремится к конечному пределу, равному $\sigma/\sqrt{\pi}$.

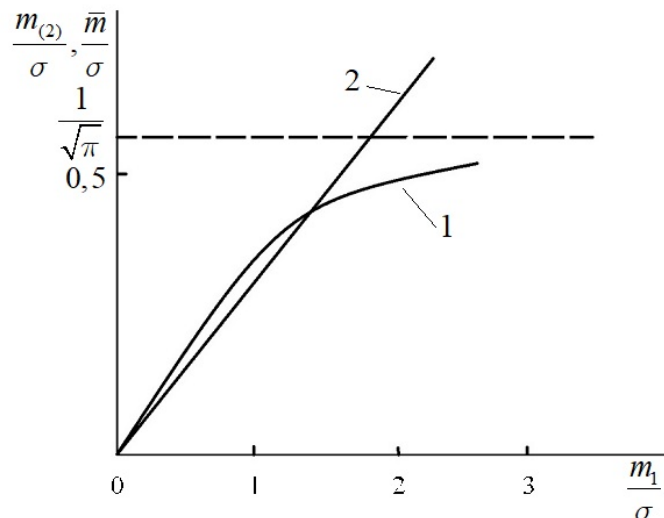


Рис. 2. Зависимость $m_{(2)}/\sigma$ (кривая 1) и \bar{m}/σ (кривая 2) от m_1/σ

Таким образом, чем больше смещение измерений одного из параметров, тем выше качество оценки по алгоритму выборочной медианы.

Дисперсия σ^2 ошибки оценки по выборочному среднему не зависит от систематических составляющих погрешностей и равна $\overline{\sigma^2} = \sigma^2/3 = 0,33\sigma^2$. Алгоритм выборочной медианы при отсутствии смещения и равноточных измерениях дает следующую дисперсию ошибки оценки

$$\sigma_{(2)}^2 = \frac{\pi - \sqrt{3}}{\pi} \sigma^2 \simeq 0,449\sigma^2 \quad (4)$$

В случае наличия смещения в одном из измерений $m_1 \neq 0, m_2 = m_3 = 0$ дисперсия ошибки выборочной медианы составит

$$\sigma_{(2)}^2 = \sigma^2 \left\{ 1 + \frac{m_1^2}{\sigma^2} \left[1 + \Phi\left(\frac{m_1}{2\sigma}\right) \right] \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{m_1^2}{\sigma^2} T\left(\frac{m_1}{\sigma}\right) - \frac{2m_1}{\sigma\sqrt{\pi}} e^{-\frac{m_1^2}{4\sigma^2}} \Phi\left(\frac{m_1}{2\sqrt{3}\sigma}\right) - \frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{-\frac{m_1^2}{3\sigma^2}} \right\} - m_{(2)}^2. \quad (5)$$

При увеличении систематической составляющей m_1 дисперсия ошибки возрастает, однако остается ограниченной и в пределе при $m_1 \rightarrow \infty$ стремится к конечной величине, которая составит

$$\sigma_{(2)}^2 = \frac{\pi - 1}{\pi} \sigma^2 \simeq 0,682\sigma^2. \quad (6)$$

График зависимости относительной дисперсии ошибки по алгоритму выборочной медианы от относительного смещения изображен на рис. 3. Таким образом, относительная дисперсия ошибки изменяется в сравнительно узких пределах $0,449 \leq \sigma_{(2)}^2 / \sigma^2 < 0,682$, при этом дисперсия ошибки оценки по выборочной медиане всегда больше, чем у оценки по выборочному среднему.

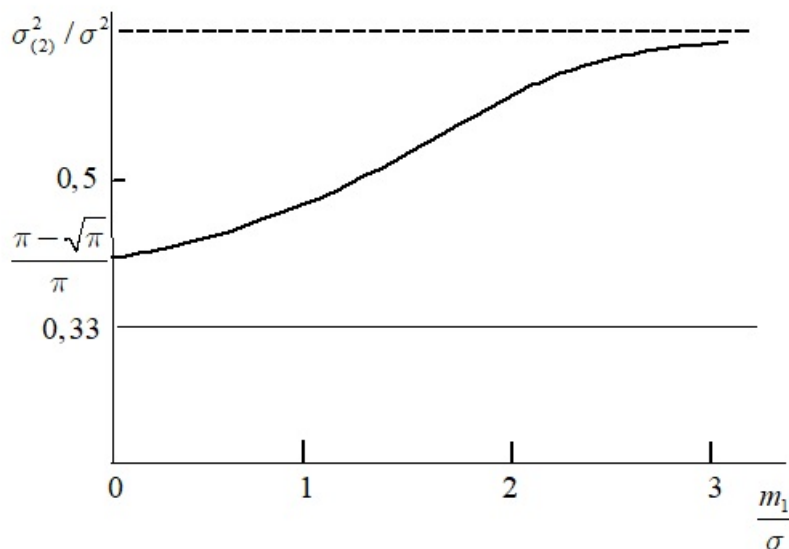


Рис. 3. Зависимость относительной дисперсии ошибки от относительной составляющей ошибки m_1 / σ

Из сопоставления кривых на рис. 2 и 3 следует, что алгоритм выборочной медианы позволяет ограничить влияние систематической погрешности измерений на ошибку оценки, при этом несущественно проигрывая в величине дисперсии.

Если математические ожидания погрешностей измерений равны нулю, а все дисперсии различны: $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2$, то выборочная медиана дает несмещенную оценку и $m_{(2)} = 0$. Введем обозначения, которые характеризуют степень неравноточности измерений: $\sigma_2 / \sigma_1 = \delta_1$; $\sigma_3 / \sigma_1 = \delta_2$; $A = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_1^2 \delta_2^2}$. Тогда дисперсия оценки по алгоритму выборочной медианы $\sigma_{(2)}^2$ будет такой:

$$\sigma_{(2)}^2 = \sigma_1^2 \left\{ \frac{1}{2} (1 + \delta_1^2 + \delta_2^2) - \frac{1}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{1}{A} + \frac{A^2 + \delta_1^2 \delta_2^2}{A(1 + A^2)} \right] - \frac{\delta_1^2}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{\delta_1^2}{A} + \frac{\delta_1^2 (A + \delta_2^2)}{A(A^2 + \delta_1^4)} \right] - \frac{\delta_2^2}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{\delta_2^2}{A} + \frac{\delta_2^2 (A + \delta_1^2)}{A(A^2 + \delta_2^4)} \right] \right\}. \quad (7)$$

Нетрудно видеть, что относительная дисперсия ошибки выборочной медианы $\mu^2 = \sigma_{(2)}^2 / \sigma_1^2$ является симметричной функцией величин δ_1 и δ_2 .

Непосредственно из выражения (7) можно сделать определенные выводы. Если уровень дисперсии одного прибора значительно выше, например: $\sigma_3 \gg \sigma_1, \sigma_2$, то путем предельного перехода в выражение (7) при $\delta_2 \rightarrow \infty$ получим следующее значение дисперсии ошибки:

$$\sigma_{(2)}^2 = 0,5(\sigma_1^2 + \sigma_2^2). \quad (8)$$

Условие $\delta_2 \rightarrow \infty$ может означать существенное ухудшение точности одного из измерений. Таким образом, алгоритм выборочной медианы обеспечивает надежную оценку искомой величины, автоматически исключая влияние неточных измерений.

Аналогично в случае существенной неравноточности измерений, когда $\sigma_1 \ll \sigma_2 \ll \sigma_3$, точность оценки по выборочной медиане определяется точностью «среднего» измерения, т. е. дисперсия ошибки $\sigma_{(2)}^2$ имеет порядок σ_2^2 . В данном случае формула (7) дает $\sigma_{(2)}^2 \simeq \sigma_2^2 / 2$.

Сравним точность оценки, найденной при помощи алгоритма выбора медианы, с точностью, которую дает выборочное среднее. При простом осреднении результатов измерений дисперсия ошибки $\bar{\sigma}_2 = 1/9 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$, а относительная дисперсия выборочного среднего $\nu^2 = \bar{\sigma}_2^2 / \sigma_1^2$ запишется в виде $\nu^2 = 1/9 (1 + \delta_1^2 + \delta_2^2)$. Отсюда следует, что при возрастании погрешности одного из измерений, линейно возрастает и дисперсия ошибки выборочного среднего. В этом случае оценка по выборочной медиане обладает значительно большей точностью. С другой стороны, при равноточных измерениях, когда $\delta_1 = \delta_2 = 1$, выборочная медиана дает менее точную оценку по сравнению с выборочным средним.

Таким образом, относительное качество указанных двух оценок зависит от степени неравноточности результатов измерений. Для сравнения качества оценок в плоскости параметров (δ_1, δ_2) построены два семейства кривых при различных значениях относительной дисперсии выборочного среднего ν и выборочной медианы μ (рис. 4).

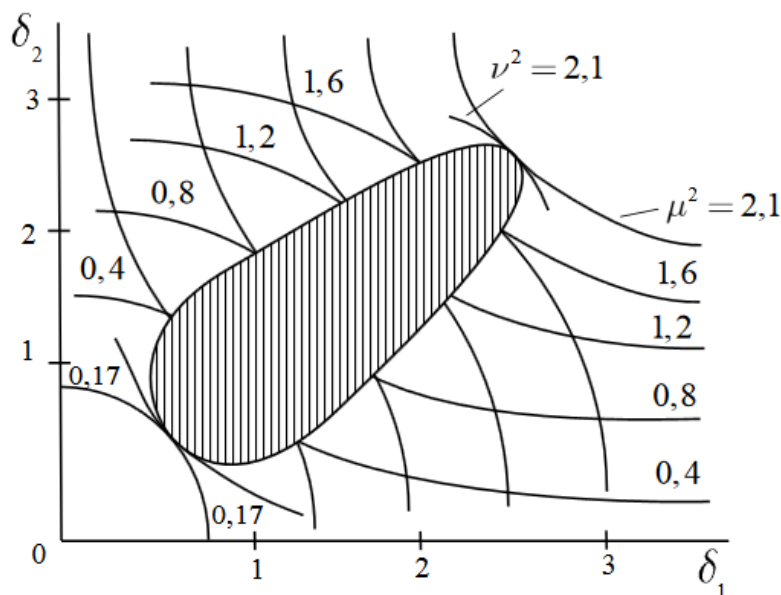


Рис. 4. Сравнение относительных дисперсий ошибки оценки выборочного среднего и выборочной медианы от степени неравноточности измерений параметров

В плоскости относительных дисперсий ошибки оценки выборочного среднего и выборочной медианы существует область (на рис. 4 она заштрихована), внутри которой оценка по выборочному среднему точнее выборочной медианы. При значениях параметров δ_1 и δ_2 , лежащих вне этой области, выбор медианы дает более точную оценку. Как видно из анализа рис. 4, оценка по выборочной медиане проигрывает в точности оценке по выборочному среднему в сравнительно небольшой области значений параметров δ_1 и δ_2 , соответствующей относительно невысокой степени неравноточности результатов измерений. Например, уже при $\delta_1 = 0,5$ и $\delta_2 = 1,5$ выборочная медиана обеспечивает более высокую точность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена методика контроля энергетических параметров информационно-измерительных систем реального времени с применением математического аппарата теории порядковых статистик. Показано, что при возрастании степени неравноточности измерений точность оценки с использованием алгоритма выборочной медианы имеет преимущества по сравнению с выборочным средним, существенно ослабляя влияние неравноточности на величину ошибки оценки.

Высокое качество оценки достигается благодаря ограничению влияния появления погрешностей высокого уровня у части результатов измерений, что характерно для рассматриваемого случая нестабильности энергетического потенциала. Алгоритм выборочной медианы в случае наличия смещения в измерениях ограничивает значение относительного математического ожидания на уровне 0,564 сверху при изменении относительной дисперсии оценки в пределах $0,449 \leq \sigma_{(2)}^2 / \sigma^2 < 0,682$, в то время как оценка, полученная простым осреднением, имеет относительную дисперсию $0,33\sigma^2$ и полностью воспроизводит смещение в величине ошибки оценки.

Список используемых источников

1. Создание и эксплуатация радиолокационных станций дальнего обнаружения / С.Ф. Боев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. – 2020. – № 5. – С. 35–48. – Doi: 10.21778/2218-5453-2020-5-35-48.
2. *Ступин Д.Д., Перлов А.Ю., Маврин А.В.* Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5 [разд. III: Радиотехника и связь]. – С. 143–155. – Doi: 10.23683/2311-3103-2018-3-143-155.
3. Испытания РЛС (оценка характеристик) / А.И. Леонов [и др.]. – М. : Радио и связь, 1990. – 208 с.
4. *Гильбо Е.П., Челпанов И.Б.* Обработка сигналов на основе упорядоченного выбора (мажоритарное и близкое к нему преобразования). – М. : Сов. радио, 1975. – 344 с.

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

МОДЕЛЬ ОБУЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА БОРТУ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрены вопросы машинного обучения на примере бортовой интеллектуальной системы сбора и обработки метеорологической информации для беспилотных летательных аппаратов. Предложена модель обучения на основе байесовского подхода.

Ключевые слова: интеллектуальная система, искусственный интеллект, модели машинного обучения, метеорологическая информация

ВВЕДЕНИЕ

В результате проведенных в работе [1] исследований моделей представления метеорологической информации в интеллектуальной системе автоматического управления (ИСАУ) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) были разработаны примеры фреймовых моделей и фреймов представления метеорологической информации с допущением адаптивности БЛА и способности в случае определения неблагоприятных метеорологических условий менять программу полета. Этот функционал ИСАУ возложен на ее подсистему – интеллектуальную систему сбора и обработки метеорологической информации на борту БЛА (ИСМИ).

Кроме того, была обоснована реализуемость ИСМИ в составе ИСАУ в связи с тем, что датчики атмосферного давления, температуры и влажности воздуха стали миниатюрными и недорогими, а технологии искусственного интеллекта позволяют спроектировать ИСМИ как часть ИСАУ, изменяющей параметры движения БЛА в зависимости от степени воздействия на них атмосферы.

Известно, что одной из центральных проблем в области разработки интеллектуальных систем является проблема приобретения знаний [2, 3]. Формализация знаний экспертов в той или иной области оказалась крайне трудоемкой операцией. Проблемы машинного обучения, выдвинутые на первый план в результате необходимости автоматизации процесса приобретения знаний, потребовали рассмотрения в условиях неопределенности вопросов представления нечетких, неполных и недостоверных знаний.

Цель публикации статьи – предложить модель обучения интеллектуальной системы сбора и обработки метеорологической информации, входящей в состав ИСАУ БЛА.

МОДЕЛЬ ОБУЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА

В ИС, как и в психологии, под понятием «обучение» подразумевают способность к приобретению ранее неизвестных умений и навыков [4].

При полете в реальной атмосфере метеорологические условия, в которых функционирует ИСАУ БЛА, преимущественно являются неопределенными. В этих условиях ИСАУ может принимать решения только после формирования собственных вероятностных теорий об

окружающих ее условиях в процессе обучения на основании опыта. Для этого необходимо правильно сформулировать задачу обучения в виде процесса вероятностного вывода [2].

Для машинного обучения самым распространенным последовательным способом математических рассуждений в условиях неопределенности является байесовский подход.

Если сформулировать обобщенное мнение о машинном обучении, то можно сказать, что любые модели машинного обучения решают одну и ту же задачу. Они всегда содержат две основных составляющих. Во-первых, это набор гипотез, вид которых зависит от выбранного подхода, например набор весов нейронов для нейронной сети, или всевозможных решающих деревьев. Во-вторых, это наборы обучающих данных. Решение задачи всегда сводится к одному – определить, какая из выбранных моделей обучения наиболее адекватна обучающим данным. Для получения точного численного критерия для решения этой задачи необходимо применять байесовский подход [5].

При таком подходе решения принимаются на основе вычисления вероятности каждой гипотезы. То есть принятие решений происходит не с применением наиболее вероятной из них, а на основе всех взвешенных по вероятностям гипотез. Таким образом, обучение сводится к вероятностному выводу.

Продемонстрируем основной принцип байесовского обучения на уже известном из работы [1] примере. Пусть дан БЛА, осуществляющий мониторинг поверхности Земли с помощью оптической системы. Встречающаяся на его траектории полета низкая облачность в таком случае будет отрицательно влиять на качество ее функционирования. Если имеются данные об атмосферном давлении (P_a , гПа) на высоте полета и относительной влажности воздуха (f , %) на протяжении маршрута, ИСМИ БЛА будет в состоянии определять условия полета с помощью принципов косвенного определения наличия облачности, используемых в метеорологии. Их суть состоит в следующем.

Если

$$f_i \in \{f_1, f_2, \dots, f_n\}; P_a^i \in \{P_a^1, P_a^2, \dots, P_a^n\},$$

где n – число участков коррекции маршрута, то

при $i + 1$, где $\{f_{i-1} < f_i \wedge P_a^{i-1} > P_a^i | f_i \geq 85\%\} \Rightarrow$ полет проходит в облаках;

при $i + 1$, где $\{f_{i-1} > f_i | f_i \geq 85\%\} \Rightarrow$ БЛА выходит из облаков;

при $i + 1$, где $\{f_{i-1} > f_i \wedge P_a^{i-1} < P_a^i | f_i < 85\%\} \Rightarrow$ полет проходит вне облаков.

Если при перемещении между участками коррекции f увеличивается, но при этом остается $\geq 85\%$, а P_a уменьшается, то ИС БЛА диагностирует полет в облаках.

Если f уменьшается, но при этом остается $\geq 85\%$, то ИС БЛА диагностирует выход из облаков.

Если f уменьшается и принимает значения $< 85\%$, а P_a увеличивается, то ИС БЛА диагностирует полет вне облаков.

Теперь пусть ИСМИ БЛА необходимо сделать вывод об условиях полета на заданной высоте: в облаках или вне облаков. К данному выводу интеллектуальная система должна прийти на основе десяти циклов измерений атмосферного давления и относительной влажности воздуха с интервалом 10 сек, при этом БЛА за 100 сек пролетит 20 км по траектории.

Пусть известны априорные вероятности условий полета БЛА: в облаках – $P(\theta)$; вне облаков – $P(\varphi) = 1 - P(\theta)$. Набор данных, полученных по результатам 10 циклов измерений, обозначим как D .

Тогда формула Байеса в терминах рассматриваемого примера примет вид [6]

$$P(\theta|D) = \frac{P(\theta) \cdot P(D|\theta)}{\int P(D|\theta) \cdot P(\theta) d\theta} = \frac{P(\theta) \cdot P(D|\theta)}{P(D)}, \quad (1)$$

где $P(\theta|D)$ – апостериорная вероятность условий полета «в облаках»;

$P(D|\theta)$ – отношение правдоподобия, характеризующее данные измерений;

$P(D)$ – вероятность данных измерений (полная вероятность).

В байесовском обучении после нахождения апостериорных вероятностей $P(\theta|D)$ и $P(\varphi|D)$ определяется максимальная из них [метод MAP (Maximum a Posteriori) – метод максимальной апостериорной вероятности (гипотезы)]

$$\theta_{\text{MAP}} = \operatorname{argmax}_{\theta} P(\theta|D) = \operatorname{argmax}_{\theta} P(D|\theta) \cdot P(\theta).$$

Максимальная апостериорная вероятность условий полета БЛА позволит каждые 20 км полета (или 100 сек) ИСМИ делать вывод об условиях полета «в облаках»/ «вне облаков». Исходя из формулы Байеса видно, как априорная вероятность преобразуется в апостериорную. Важно понимать, что формула (1) применяется итерационно после поступления новых данных измерений, тогда апостериорная вероятность условий полета становится априорной для следующего двадцатикилометрового участка полета или после каждого произведенного измерения.

Остается открытым вопрос, как обучить интеллектуальную систему различать условия полета БЛА и делать выбор в пользу одних из них, причем число сочетаний одних условий, например «в облаках», относительно других из общего числа измерений на участке маршрута различно. ИСАУ необходимо обучить всем возможным сочетаниям условий, т. е. условия полета «в облаках» могут наблюдаться один раз из 10 измерений, два, три и т. д. до десяти из десяти. Для этого используем биномиальный коэффициент из комбинаторики [6]

$$\binom{n}{k} = \begin{cases} \frac{n!}{k!(n-k)!}, & 0 \leq k \leq n. \\ 0, & k > n. \end{cases} \quad (2)$$

В комбинаторике биномиальный коэффициент $\binom{n}{k}$ для неотрицательных целых чисел n и k интерпретируется как количество сочетаний из n по k , т. е. как количество всех подмножеств (выборки) размера k в n -элементном множестве.

Удобной формой представления биномиальных коэффициентов является треугольник Паскаля, в котором каждое число равно сумме двух вышестоящих (рис. 1).

							1										
							1	1									
							1	2	1								
							1	3	3	1							
							1	4	6	4	1						
							1	5	10	10	5	1					
							1	6	15	20	15	6	1				
							1	7	21	35	35	21	7	1			
							1	8	28	56	70	56	28	8	1		
							1	9	36	84	126	126	84	36	9	1	
1							1	10	45	120	210	252	210	120	45	10	1

Рис. 1. Фрагмент треугольника Паскаля

ПРИМЕР ОБУЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИСАУ БЛА

Рассмотрим пример.

Пусть на заданном участке и высоте априорная вероятность полета БЛА в облаках $P(\theta) = 0,75$, тогда вне облаков $P(\varphi) = 0,25$.

ИСМИ БЛА производит 10 измерений атмосферного давления и относительной влажности воздуха с интервалом 10 сек. В результате байесовского обучения этой ИСМИ с использованием выражений (1) и (2) мы получим следующий байесовский классификатор (табл. 1).

Таблица 1

Пример байесовского классификатора для обучения ИСМИ БЛА

Характеристика условий полета при $P(\theta) = 0,75$				
Кол-во условий «в облаках», k	Биномиальный коэффициент при $n = 10$	$P_k(D)$	$P(\theta D)$	$P(\varphi D)$
0	1	0,00	0,00	1,00
1	10	0,10	0,25	0,75
2	45	0,20	0,43	0,57
3	120	0,30	0,56	0,44
4	210	0,40	0,67	0,33
5	252	0,50	0,75	0,25
6	210	0,60	0,82	0,18
7	120	0,70	0,88	0,13
8	45	0,80	0,92	0,08
9	10	0,90	0,96	0,04
10	1	1,00	1,00	0,00

По сути, в данном примере обучение ИСМИ БЛА сводится к загрузке байесовского классификатора в его базу знаний, к которому ИСАУ БЛА будет обращаться во время полета.

Из анализа табл. 1 видно, что высокое значение априорной вероятности полета БЛА в облаках $P(\theta) = 0,75$ уже при трех совпадениях этих условий из десяти позволяет ИСАУ с вероятностью $P(\theta|D) = 0,56$ прийти к выводу, что полет БЛА проходит в облаках.

Таким образом, предложенный подход байесовского обучения ИСМИ можно представить в виде дерева решений, которое схематически отображает процесс принятия решений ИС (рис. 2).

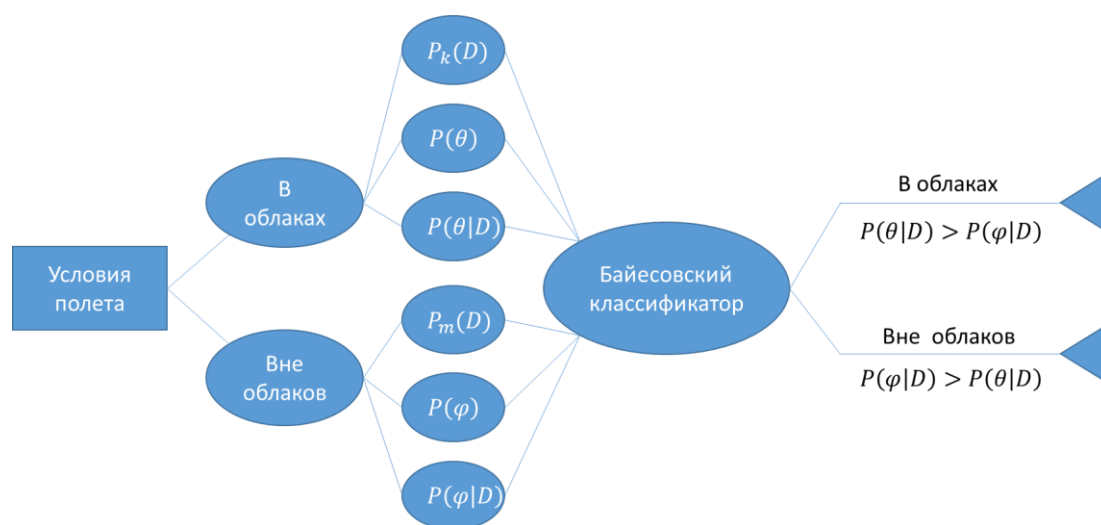


Рис. 2. Дерево решений для обучения ИСМИ БЛА

На основе проведенных рассуждений и результатов исследований, в том числе опубликованных в [1], предложим структурную схему ИСАУ БЛА (рис. 3).

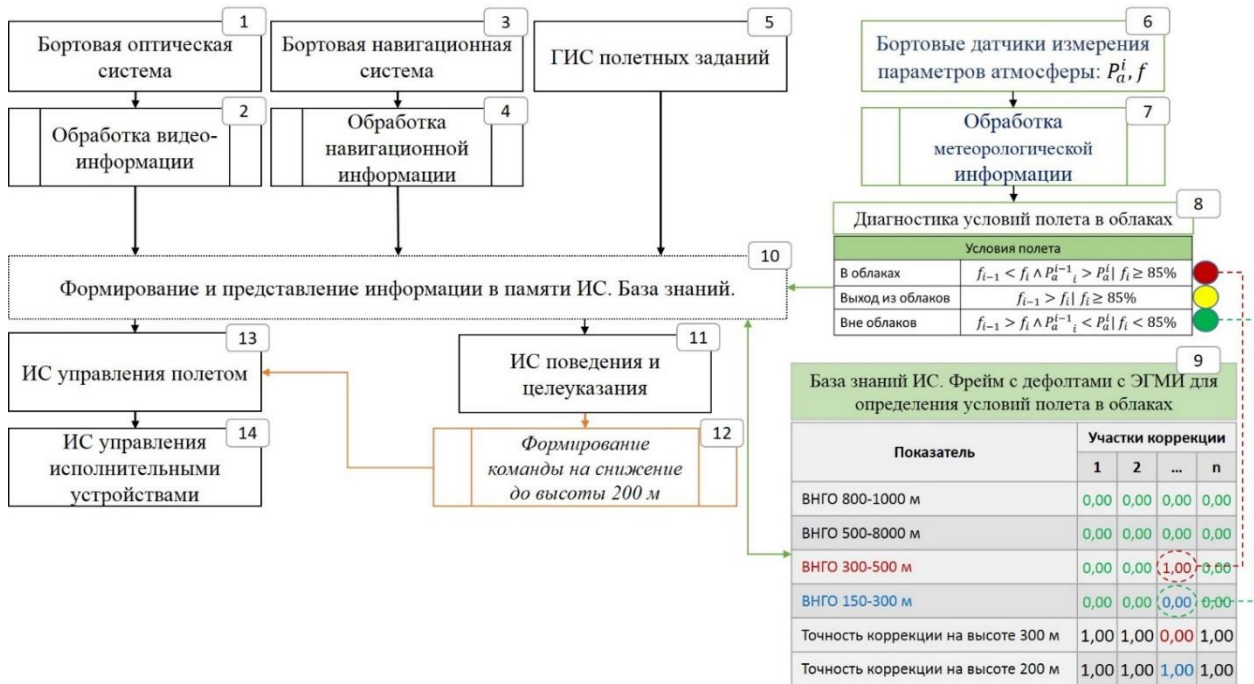


Рис. 3. Структурная схема ИСАУ БЛА

На рис. 3 использованы следующие условные обозначения: ИС – интеллектуальная система; ГИС – геоинформационная система; ЭГМИ – эталонная гидрометеорологическая информация; ВНГО – высота нижней границы облачности.

На рис. 3 отражено возможное поведение ИСАУ БЛА при диагностике облачности на высоте полета. После получения данных от датчиков атмосферного давления и относительной влажности воздуха (блок 6) производится обработка метеорологической информации (блок 7), где по правилам, записанным в базу знаний ИСАУ БЛА, производится определение условий полета (блок 8). Если на каком-либо участке коррекции маршрута БЛА определяются условия полета «в облаках», то в базе знаний для высот 300–500 м для соответствующего метеорологического элемента присваивается значение «1,00», а показатель точности коррекции маршрута изменяется на «0,00» (блок 9). Этот факт инициирует в ИС поведения и целеуказания формирование команды, например на снижение БЛА до высоты 200 м, где значение ЭГМИ равно «0,00» (блоки 11-12). БЛА снижается, производит диагностику метеорологических условий на занятой высоте и при отсутствии облачности продолжает полет по маршруту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана модель обучения интеллектуальной системы сбора и обработки метеорологической информации, входящей в состав ИСАУ БЛА. Продемонстрирован процесс обучения такой модели на основе байесовского подхода. Предложена структурная схема ИСАУ БЛА с датчиками измерения параметров атмосферы на борту.

Заметим, что помимо байесовского подхода для задачи обучения ИСМИ БЛА применимы подходы обучения на основе теории искусственных нейронных сетей. Искусственные нейронные сети способны анализировать входящую информацию и воспроизводить ее из памяти. Они решают задачи классификации, прогнозирования, распознавания, мониторинга и т. п.

Сегодня нейросетевые технологии становятся все более популярными, потому как они просты в применении, но при этом обладают большими возможностями при решении сложных задач. Однако для их надежного функционирования необходимы огромные наборы исходных данных и мощные компьютеры, что в настоящее время не всегда реализуемо при решении, например, таких задач, как та, что рассмотрена в статье. Время быстро устранил указанные недостатки, и применение искусственных нейронных сетей для обучения интеллектуальных систем автоматического управления БЛА станут обычными вопросами исследований ближайшего будущего.

Список используемых источников

1. *Алехин С.Г., Мещеряков С.Е., Шемелов В.А.* Модели представления метеорологической информации в интеллектуальной системе автоматического управления беспилотных летательных аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 8–17.
2. *Потапов А.С.* Технологии искусственного интеллекта: учеб. пособие. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. – 218 с.
3. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс». 2006. – 1408 с.
4. Искусственный интеллект: справочник: в 3 кн. / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – Кн. 2: Модели и методы. – 304 с.
5. *Кэндалл М., Стьюарт А.* Статистические выводы и связи / под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Наука, 1973. – 700 с.
6. Теория статистики с основами теории вероятностей: учеб. пособие / И.И. Елисеева [и др.]; под ред. И.И. Елисейевой. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 446 с.

К.К. Жбанов;
Д.Д. Колесников,
кандидат технических наук;
Д.О. Медяников,
кандидат технических наук;
Д.В. Сергеев,
кандидат технических наук

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНЫ ДЕЛЕНИЯ ОТСЧЕТНЫХ УСТРОЙСТВ ГРАВИМЕТРОВ ГНУ-КВ НА ЭТАЛОННОМ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

В статье приводятся описание и результаты работ по определению цены деления относительных гравиметров наземных узкодиапазонных с кварцевой чувствительной системой класса В (ГНУ-КВ) на эталонном гравиметрическом полигоне (г. Иркутск), выполненные научно-исследовательской группой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

Ключевые слова: эталонирование, цена деления отсчетного устройства, гравиметр.

ВВЕДЕНИЕ

Решение задач, связанных с определением формы и размеров Земли, мониторингом сейсмически опасных и тектонически активных районов, гравиметрической разведкой полезных ископаемых осуществляется посредством гравиметрических методов и средств. Различают абсолютные и относительные гравиметрические определения. При абсолютных определениях измеряют полное значение силы тяжести в каком-либо пункте. При относительном определении измеряется разность значений силы тяжести между двумя пунктами.

Указанные методы на практике реализуются с помощью поверенных измерительных средств – гравиметров, обеспечивающих единство принципа измерений. При наблюдениях с гравиметром разность ускорения силы тяжести получают в условной системе единиц, определяемой отсчетным устройством прибора. Для перевода отсчета в миллигалы необходимо знать цену деления измерительного устройства – постоянную гравиметра. Выполнение исследований, в результате которых определяют постоянную гравиметра, а также ее зависимость от температуры и других внешних факторов, называют *эталонированием гравиметров*.

С целью решения указанных задач в учебном процессе, а также при выполнении НИОКР сотрудниками ВКА имени А.Ф. Можайского с 2019 года осуществляется ежегодная поверка штатных средств измерений – гравиметров ГНУ-КВ на Иркутском гравиметрическом полигоне.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Полигон Иркутский гравиметрический предназначен для измерения разностей ускорения силы тяжести. Особенностью полигона является пространственная стабильность его пунктов.

Полигон состоит из шести *гравиметрических пунктов* (далее по тексту – пунктов): № 1–6. Максимальный перепад значений ускорения силы тяжести на полигоне равен 93,37 мГал. Расстояние от пункта № 1 до пункта № 6 по дорогам составляет не менее 22 км. Каждый пункт полигона представляет собой железобетонный монолит, заглубленный в грунт не ме-

нее чем на 2 м. Верхняя часть пункта имеет размер в поперечном сечении не менее 2×2 м и представляет собой ровную площадку, оборудованную установочными местами для одновременной установки не менее четырех гравиметров. Установочные места – это стальные стержни, вклеенные в монолит эпоксидным клеем, с пластиковыми втулками, препятствующими боковому смещению ножек гравиметра. На каждом пункте полигона установлена информационная табличка, фотография которой показана на рис. 1.



Рис. 1. Информационная табличка гравиметрического пункта

Пункты № 2–6 расположены вдоль трассы Р258 «Байкал» в направлении г. Слюдянка. Такие пункты находятся вдали от мест, населенных людьми, промышленных предприятий и дорог с интенсивным движением транспорта, что обеспечивает низкий уровень сейсмического и техногенного шумов. Внешний вид одного из гравиметрических пунктов представлен на рис. 2.



Рис. 2. Эталонирование гравиметра на эталонном гравиметрическом пункте № 3

В табл. 1 представлены значения приращений ускорения силы тяжести для каждого пункта относительно опорного пункта № 1.

Схема расположения пунктов полигона представлена на рис. 3.

Таблица 1

Значения приращений ускорения силы тяжести на пунктах полигона

Номер пункта	Приращения ускорения силы тяжести, Δg , мГал
1	0
2	-23,468
3	-36,737
4	-45,425
5	-80,637
6	-93,379



Рис. 3. Схема расположения пунктов полигона

Эталонирование гравиметров выполнялось замкнутыми рейсами на пунктах № 2–6 (рис. 3, табл. 2) в соответствии с работой [1].

Таблица 2

Приблизительные значения координат и высот пунктов эталонного гравиметрического полигона

Номер пункта	Широта, ° ' "	Долгота, ° ' "	Геодезическая высота, м
2	52 10 46,13	103 58 58,58	492
3	52 10 19,79	103 56 55,91	565
4	52 09 44,76	103 57 05,62	619
5	52 08 45,66	103 58 01,56	735
6	52 07 50,41	103 58 22,82	793

ОПИСАНИЕ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

Эталонирование гравиметров ГНУ-КВ выполнялось в соответствии с работами [1, 2]. В 2019 году эталонировалось три гравиметра (№ 121, 128, 132), а в 2020 году – четыре гравиметра (№ 121, 128, 130, 152) ГНУ-КВ.

Для осуществления программы эталонирования выполнено 13 рейсов с общим числом измерений разностей ускорения силы тяжести, равным 50. Каждый новый рейс начинался и заканчивался на пункте № 2. Длительность рейсов не превышала 1,5–3 ч. Среднее время наблюдений на одном пункте составляло 5–10 мин. Среднее время переезда между пунктами 10–15 мин. Перевозка гравиметров осуществлялась в мягких гнездах в закрытом транспортно-ровочном футляре. Схема движения на пунктах эталонирования представлена на рис. 4.

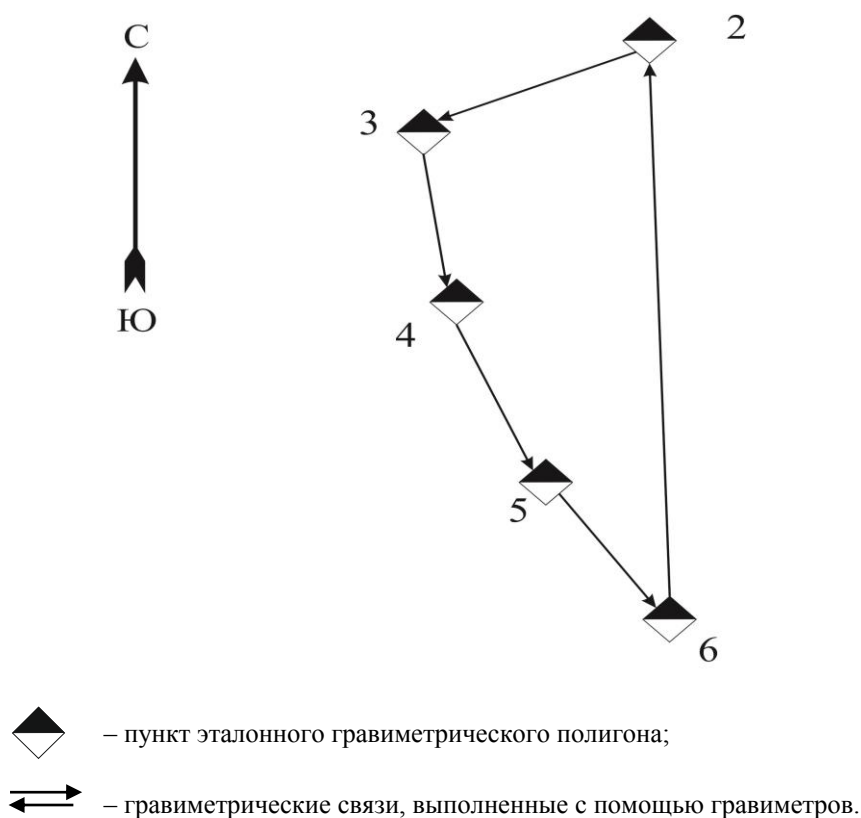


Рис. 4. Схема движения на пунктах эталонирования

На начальном пункте (№ 2) для каждого рейса выполнялась перестройка диапазона для охвата всей отсчетной шкалы оборотов гравиметров в процессе эталонирования. Выставленные при эталонировании значения счетчика регулировки диапазонного устройства приведены в табл. 3.

По окончании полевых наблюдений для каждого прибора вычислена цена деления отсчетного устройства C по формуле [1]

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_{i1}}{n},$$

где C_{i1} – цена оборота счетчика, полученная при измерении между i -м и первым пунктом,

$$C_{i1} = \frac{\Delta g_{i1}}{S_i - S_1},$$

где Δg_{i1} – известная разность значений силы тяжести между i -м и первым пунктом, при этом $\Delta g_{i1} = g_i - g_1$;

$S_i - S_1$ – отсчеты по микрометру на соответствующих i -м и первом пунктах, исправленные поправкой за смещение нуля пункта;

n – число независимых измерений разностей силы тяжести, равное 50.

Таблица 3

Значения счетчика регулировки диапазонного устройства

№ рейса	Номер гравиметра									
	121		128		130		132		152	
	Год работ									
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Значения счетчика										
1	0,377	0,283	0,188	0,290	-	0,175	0,203	-	-	0,301
2	0,766	0,554	0,848	0,476	-	0,356	0,814	-	-	0,586
3	1,131	0,678	1,073	0,642	-	0,432	1,038	-	-	0,700
4	1,317	0,726	1,301	0,838	-	0,622	1,326	-	-	0,971
5	1,525	0,903	1,509	0,998	-	0,893	1,525	-	-	1,068
6	1,971	1,003	2,106	1,201	-	1,157	1,989	-	-	1,162
7	1,951	1,463	2,108	1,847	-	1,495	1,965	-	-	1,725
8	2,426	1,854	2,467	2,747	-	1,847	2,337	-	-	2,384
9	2,575	2,086	2,732	3,456	-	2,225	2,730	-	-	2,973
10	2,658	2,371	2,857	4,056	-	2,524	2,892	-	-	3,968
11	2,793	2,679	3,005	4,834	-	2,911	3,009	-	-	4,706
12	2,904	2,688	3,137	5,402	-	3,053	3,117	-	-	4,836
13	3,612	4,175	3,731	6,162	-	4,257	3,345	-	-	6,121

Результаты определения цены деления отсчетных устройств гравиметров, а также формулярные значения цены деления приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения цены деления отсчетного устройства

С, мГал/об	Номер гравиметра				
	121	128	130	132	152
Формуляр	-5,802	-7,820	-6,113	-6,166	-7,200
2019 г.	-5,761	-7,715	-	-6,086	-
2020 г.	-5,760	-7,720	-6,049	-	-7,135

Сходимость формулярных значений и результатов определения цены деления отсчетных устройств гравиметров в 2019 и 2020 годах подтверждает достоверность полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения полевых наблюдений для каждого гравиметра определена цена деления его отсчетного устройства. По результатам наблюдений получены свидетельства о поверке на каждый гравиметр.

Таким образом, цели исследований достигнуты в полном объеме. Гравиметры ГНУ-КВ 121, 128, 130, 132, 152 пригодны для выполнения гравиметрических работ, что подтверждено документально свидетельствами о поверке.

Список используемых источников

1. Руководство по определению астрономо-геодезических и гравиметрических данных при топогеодезическом обеспечении войск. – М.: РИО ВТС, 1982. – Ч. 2. – 427 с.
2. Государственная система обеспечения единства измерений. Гравиметры наземные. Методика поверки. МИ 1820-87. – М.: НПО «Метрология», 1988. – 31 с.
3. *Огородова Л.В., Шимбириев Б.П., Юзефович А.П.* Гравиметрия. – М.: Недра, 1978. – 325 с.

И.В. Абашева

МОДЕЛЬ СТРУКТУРНО-СЕМАНТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСТОЧНИКОВ НОВОСТНОГО ТЕКСТОВОГО КОНТЕНТА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Проведен анализ особенностей явления лингвистической интерференции в интересах формирования множества информативных признаков, учитывающих особенности написания текстов носителями русского языка. Представлены результаты статистического исследования предполагаемых информативных признаков распознавания негативного контента, распространяемого иноязычными авторами в условиях использования ими элементов маскировки.

Ключевые слова: лингвистическая интерференция, информационное воздействие, негативный контент.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная система средств массовой информации (СМИ) и телекоммуникационная сеть (ТКС) являются неотъемлемым механизмом управления социально-экономической системой в геополитическом пространстве любого государства.

В современном информационном пространстве многие государства используют СМИ для скрытного влияния на подсознание населения с целью изменения его поведения и физиологического состояния в нужном для воздействующей стороны направлении. Создание искусственно накаленной атмосферы, провокация конфликтов, иногда даже беспорядки, вызванные направленным информационным воздействием, становятся серьезными угрозами стабильности ситуации. Противостоять этому можно, только проводя целенаправленную психологическую и воспитательную работу, при параллельном контакте с региональными властями с целью недопущения провокационной работы СМИ и других источников распространения информационных материалов. Важной угрозой является направленное воздействие на моральный дух путем фальсификации фактов, а также усиления социального напряжения.

Современное состояние систем массовых коммуникаций предоставляет возможность доведения информационных сообщений в различных форматах практически до любого человека. Для традиционных типов СМИ, таких как телевидение и радио, какое-либо внешнее воздействие практически исключено, так как для этого необходимо иметь возможность передачи теле- или радиосигнала по выделенной с этой целью частоте на достаточно большую территорию. Кроме технических сложностей, существуют организационные препятствия в виде лицензирования такого вида деятельности, процедуры выделения частот и контроля их использования. При этом для функционирования СМИ в сети Интернет вышеперечисленные преграды либо отсутствуют, либо существенно упрощены: создание и поддержание сайта не требуют столь серьезных финансовых затрат, как для традиционных СМИ, сервер может располагаться в любой точке мира, а регистрация в качестве СМИ требует оформления заявки и оплаты в несколько тысяч рублей. Кроме того, чтобы воздействовать на общественность через СМИ сети Интернет не всегда необходимо иметь собственный сервер. В большинстве случаев воздействие может осуществляться за счет публикации статей на чужих серверах, а также распространения информации посредством социальных сетей и за счет так называемой графы комментариев на страницах общеизвестных СМИ. В последние годы социальные сети всё чаще становятся площадкой для пропаганды противником своих убеждений и идей среди общественности (в первую очередь среди молодежи).

Новостные агентства и отдельные личности, занимающиеся пропагандой, в качестве социальных сетей зачастую используют Twitter, Одноклассники, Вконтакте, Facebook и др. При этом очень проблематично отличить человека, осуществляющего информационное воздействие на неродном языке (в дальнейшем – иноязычного автора) от человека, который не поддерживает правительство, но не стремится расшатывать внутривнутриполитическую ситуацию. Особенно данная задача усложняется в условиях использования маскировки, а именно: маскировки контента под позитивный, маскировки иностранного агента под гражданина атакующего государства.

В соответствии с вышеуказанной проблемой становится актуальной задача распознавания иностранного агента как источника информационного текстового контента в условиях использования им маскировки и различной тональности сообщений.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЯВЛЕНИЯ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ИНТЕРЕСАХ ФОРМИРОВАНИЯ МНОЖЕСТВА ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

Существенное влияние на достижение конечного результата распознавания иностранных агентов как источников текстовых сообщений оказывают выбор и обоснование совокупности информативных признаков, обеспечивающих решение поставленных задач.

Для реализации процесса лингвистического анализа источников текстовых сообщений (СТФ) требуется найти общий информативный признак, в наибольшей степени зависящий от особенностей проявления русского менталитета в процессе написания текстовой информации [6]. Значения признака для информационного контента, созданного русскоязычным автором и иноязычным, должны существенно отличаться. При этом необходимо учитывать, что в процессе анализа СТФ возможно выявление только тех информативных признаков, которые заложены в его структуре и параметрах. Выявление этих признаков может осуществляться на основе анализа моделей СТФ с учетом различий в семантической и синтаксической структуре СТФ [4].

Исходную структурно-аналитическую модель СТФ (рис. 1) можно представить как некоторый дискретный источник, способный порождать текстовые сообщения длиной $m \times k$ символов $s_j \in S_{\langle N \rangle}$ конечного алфавита объема N , при условии, что на множестве элементов алфавита определено распределение вероятностей $\langle p(s_j) \rangle, j = 1(1)N$.



Рис. 1. Структурно-аналитическая модель СТФ

Сообщение данного источника представляет собой случайную последовательность (вектор-строка) $\langle s_j \rangle_{m \times k-1}$, состоящую из элементов этого множества

$$\langle s_j \rangle_h = \langle s_0, s_1, \dots, s_j, \dots, s_{m \times k-1} \rangle. \quad (1)$$

Для потока сообщений выражение (1) примет вид

$$S_{\langle n \rangle} = \left\{ \begin{array}{l} S_{\langle m \times k \rangle}^{(1)} \\ S_{\langle m \times k \rangle}^{(2)} \\ \vdots \\ S_{\langle m \times k \rangle}^{(i)} \\ \vdots \\ S_{\langle h \rangle}^{(n)} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \langle s_0, \dots, s_j, \dots, s_{m \times k - 1} \rangle^{(1)} \\ \langle s_0, \dots, s_j, \dots, s_{m \times k - 1} \rangle^{(2)} \\ \vdots \\ \langle s_0, \dots, s_j, \dots, s_{m \times k - 1} \rangle^{(i)} \\ \vdots \\ \langle s_0, \dots, s_j, \dots, s_{h-1} \rangle^{(n)} \end{array} \right\}; \quad (2)$$

где m – количество букв в слове;
 k – количество слов в предложении;

$$m \times k = h;$$

n – количество информационных источников.

Указанная случайная последовательность полностью определена, когда известна последовательность конечномерных распределений вида

$$\langle p(s_j) \rangle, \langle p(s_j, s_{j+1}) \rangle, \langle p(s_j, s_{j+1}, s_{j+2}) \rangle, \dots, \langle (s_j, s_{j+1}, \dots, s_{j+h-1}, s_{j+h}) \rangle. \quad (3)$$

Последовательность распределений (3) определяет взаимосвязи соседних элементов текстового сообщения. Вместе с тем для априорно неизвестных сообщений данные распределения не определены.

Введенная математическая модель текстового сообщения содержит вероятностные распределения, определяемые частотными характеристиками символов алфавита. Символ текстового сообщения s_j является самым минимальным элементом детализации текстового сообщения. Упорядоченная последовательность m символов представляет собой уровень детализации слов текстового сообщения $S_{\langle m \rangle} = w_j$, упорядоченная последовательность слов длиной k позволяет описывать текстовое сообщение на уровне детализации предложений $p_j = W_{\langle k \rangle}$, в этом случае всё СТФ может быть представлено множеством предложений $P_{\langle r \rangle}$.

В целях выявления информативных признаков распознавания иностранных агентов требуется провести сопоставительный анализ уровней лингвистической интерференции относительно соответствующих этапов машинной обработки текста [2]. Понятие *лингвистической интерференции* подразумевает влияние элементов родного языка при изучении иностранного, которая выражается в несоответствиях и ложных закономерностях при устном и письменном использовании иностранного языка.

Вмешательство иностранного языка может носить как отрицательный, так и положительный характер, что способствует адекватному переводу и взаимопониманию. Под положительной интерференцией понимается взаимосвязь контактирующих языковых систем, в которой имеют место универсальные и схожие свойства языков, не оказывающие негативно-го влияния на неродную речь [1].

Уровни интерференции представлены в соответствии с уровнями детализации элементов текстового сообщения. Минимальной составной единицей языка является буква s_j . Данный уровень детализации соответствует орфографическому уровню интерференции, который подразумевает перенос в изучаемый язык правил написания слов другого языка. Такие особенности находят свое проявление в графематических правилах машинной обработки текста, на этапах токенизации текста по буквам и биграммам (триграммам) (рис. 2). Закономерности лингвистической интерференции на данном этапе могут быть выражены посредством статистического анализа частотных свойств символов алфавита и биграмм (триграмм):

$$\tilde{p}(s_j) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} s_{j,i}}{N}, \quad (4)$$

$$\tilde{p}(s_j | s_{j-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (s_{j,i} | s_{j-1})}{N}, \quad (5)$$

где $s_{j,i}$ – i -й символ j -й выборки.

Стоит отметить, что на орфографическом уровне характерны ошибки использования букв «й», «ё», «ъ», «ь» и т. д. То есть особенности написания слов для различных языковых групп меняют частоты использования букв и биграмм соответственно.

Следующий уровень детализации текстового сообщения характеризуется грамматической интерференцией, которая возникает в результате несовпадения грамматических структур в различных языках. Данные особенности находят свои проявления в графематических правилах обработки текста, при этом необходимо учитывать пунктуацию, так как в разных языках существуют различные правила и наборы знаков препинания. Предполагаемый информативный признак данного уровня – статистические особенности частотных свойств биграмм (триграмм) основывается, как и на предыдущем этапе, на применении токенизации текста по биграммам, но с учетом символов пунктуации (триграммам) и т. д. Тогда

$$\tilde{p}(s_j | s_{j-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (s_{j,i} | s_{j-1,i})}{N}. \quad (6)$$

Интерференция на грамматическом уровне вызвана различиями в грамматическом строе русского и, в частности, английского языка [3]. Характерные ошибки данного уровня возникают в грамматических категориях определенности/неопределенности, в применении приставок, корней, суффиксов, рода, множественного числа существительных, вида, времени и залога глагола и т. д., что очень сильно меняет частоты использования биграмм.

Помимо графематических правил грамматический уровень характеризуется морфологическими правилами обработки текста машинного языка, которые позволяют учитывать неправильное употребление грамматических свойств речи и подмену на уровне грамматических категорий (рода, числа, формы глаголов и т. д.) Данные закономерности можно выявить посредством статистического анализа частотных свойств нелемматизированных слов (7)

$$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} S_{\langle m \rangle, j, i}}{N}. \quad (7)$$

Отсутствие эквивалентов слов одного языка в другом характеризует лексический уровень интерференции с применением морфологических правил обработки текста машинного языка. Данная особенность позволяет сделать предположение о разных частотных свойствах слов при использовании русского языка носителем языка и иноязычным автором. В целях статистического анализа признака на лексическом уровне требуется предварительная обработка текста (токенизация по словам и лемматизация)

$$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j}^*) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} S_{\langle m \rangle, j, i}^*}{N}. \quad (8)$$

Предположение о информативности данного признака обусловлено тем фактом, что иноязычный автор подменяет слова понятными ему эквивалентами, что, в свою очередь, меняет частоты использования лемматизированных слов.

Влияние различных правил синтаксического оформления предложений учитывается на синтаксическом уровне интерференции, которому соответствует этап обработки текста машинного языка с применением синтаксических правил. Статистический анализ информативного признака на данном уровне производится посредством исследования частотных свойств лемматизированных слов (9)

$$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j}^* | S_{\langle m \rangle, j-1}^*) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (S_{\langle m \rangle, j, i}^* | S_{\langle m \rangle, j-1, i}^*)}{N}. \quad (9)$$

Влияние смысловой асимметрии одинаковых слов учитывается на семантическом уровне интерференции, которому в свою очередь соответствует этап обработки текста машинного языка с применением семантических правил. В русском языке произвольный порядок употребления подлежащих и сказуемых, в свою очередь, меняет частоты использования пар лемматизированных слов, следовательно, статистический анализ информативного признака производится посредством исследования частотных свойств пар нелемматизированных слов

$$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j} | S_{\langle m \rangle, j-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (S_{\langle m \rangle, j, i} | S_{\langle m \rangle, j-1})}{N}. \quad (10)$$

Уровни сопоставления	Этап обработки текста машинного языка	Предполагаемый информативный признак	Предполагаемый процесс вычисления
Орфографический уровень перенос в изучаемый язык правил написания слов другого языка	Графемогические правила токенизация текста по буквам токенизация текста по биграммам (триграммам)	статистический анализ частотных свойств символов алфавита статистический анализ частотных свойств биграмм	$\tilde{p}(S_j) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} S_{j,i}}{N}$ $\tilde{p}(S_j S_{j-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (S_{j,i} S_{j-1})}{N}$
Грамматический уровень пунктуация – различные правила и наборы знаков препинания морфология – неправильное употребление грамматич. свойств речи части речи – подмена на уровне грамматических категорий	токенизация текста по биграммам с учетом символов пунктуации (триграммам) и т.д. Морфологические правила токенизация текста по словам	статистический анализ частотных свойств биграмм (триграмм) статистический анализ частотных свойств не лемматизированных слов	$\tilde{p}(S_j S_{j-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (S_{j,i} S_{j-1})}{N}$ $\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} S_{\langle m \rangle, j, i}}{N}$
Лексический уровень отсутствие эквивалентов слов одного языка в другом	токенизация текста по словам лемматизация	статистический анализ частотных свойств лемматизированных слов	$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j}^*) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} S_{\langle m \rangle, j, i}^*}{N}$
Синтаксический уровень различные правила синтаксического оформления предложения	Синтаксические правила токенизация текста по словам лемматизация	статистический анализ частотных свойств лемматизированных слов	$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j}^* S_{\langle m \rangle, j-1}^*) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (S_{\langle m \rangle, j, i}^* S_{\langle m \rangle, j-1}^*)}{N}$
Семантический уровень смысловая асимметрия одинаковых слов	Семантические правила токенизация текста по словам	статистический анализ частотных свойств пар слов	$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j} S_{\langle m \rangle, j-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (S_{\langle m \rangle, j, i} S_{\langle m \rangle, j-1})}{N}$
Стилистический уровень влияние стиля специфики словоупотребления и сочетаемости слов одного языка на другой при переводе	токенизация текста по словам лемматизация	статистический анализ частотных свойств пар слов	$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j} S_{\langle m \rangle, j-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (S_{\langle m \rangle, j, i} S_{\langle m \rangle, j-1})}{N}$

Рис. 2. Результаты сопоставительного анализа лингвистической интерференции

Влияние стиля специфики словоупотребления и сочетаемости слов одного языка на другой при переводе учитывается на стилистическом уровне интерференции.

Стилистическая интерференция появляется в том случае, если какое-то менее знакомое слово начинает употребляться по аналогии с уже известным его синонимом. Если похожие, но не совсем подходящие прилагательные будут использоваться одно вместо другого, то это приведет к стилистической ошибке, следовательно, статистический анализ информативного

признака производится посредством исследования частотных свойств пар нелеммутизированных слов (10).

Стоит отметить, что для каждого вида перевода характерен свой стиль, и поэтому перевод одного и того же выражения, предложения, текста в художественном, общественно-политическом и специальном переводе может отличаться стилистически. Для того чтобы писать на «высоком уровне», необходимо учитывать не только грамматические, лексические нормы иностранного языка, но и культурологические особенности иноязычных коммуникантов [5].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исходя из представленного исследования, можно выделить семь предполагаемых информативных признаков (рис. 3).

Суть информативного признака	Математическая модель соответствующего уровня	Математическая интерпретация
<p>1 Частотные характеристики букв</p>	$S_{\langle m \times k \rangle}^* = \langle s_0^*, s_1^*, \dots, s_j^*, \dots, s_{m \times k - 1}^* \rangle$ <p>где $S_{\langle m \times k \rangle}^*$ - массив букв информационного сообщения; s_j^* - j-тая буква информационного сообщения (без служебных символов)</p>	$\tilde{p}(s_j^*) = \frac{\sum_{i=0}^{m \times k - 1} s_{j,i}^*}{m \times k}$
<p>2 Частотные характеристики биграмм с символами</p>	$B_{\langle m \times k / 2 \rangle} = \langle b_0, b_1, \dots, b_j, \dots, b_{m \times k / 2 - 1} \rangle$ <p>где $B_{\langle m \times k / 2 \rangle}$ - массив биграмм информационного сообщения (со служебными символами); $b_j = \langle s_j, s_{j+1} \rangle$ - j-тая биграмма информационного сообщения (со служебными символами).</p>	$\tilde{p}(b_j) = \frac{\sum_{i=0}^{m \times k / 2 - 1} (b_{j,i})}{m \times k / 2}$
<p>3 Частотные характеристики биграмм без символов</p>	$B_{\langle m \times k / 2 \rangle}^* = \langle b_0^*, b_1^*, \dots, b_j^*, \dots, b_{m \times k / 2 - 1}^* \rangle$ <p>где $B_{\langle m \times k / 2 \rangle}^*$ - массив биграмм информационного сообщения (без служебных символов); $b_j^* = \langle s_j^*, s_{j+1}^* \rangle$ - j-тая биграмма информационного сообщения (без служебных символов).</p>	$\tilde{p}(b_j^*) = \frac{\sum_{i=0}^{m \times k / 2 - 1} (b_{j,i}^*)}{m \times k / 2}$
<p>4 Частотные характеристики слов без лемматизации</p>	$\{S_{\langle m \rangle}\}_k = \langle S_{\langle m \rangle, 0}, \dots, S_{\langle m \rangle, j}, \dots, S_{\langle m \rangle, k-1} \rangle$ <p>где $\{S_{\langle m \rangle}\}_k$ - массив слов информационного сообщения (без лемматизации); $S_{\langle m \rangle, j}$ - j-тое слово информационного сообщения (без лемматизации).</p>	$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j}) = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} S_{\langle m \rangle, j, i}}{k}$
<p>5 Частотные характеристики слов с лемматизацией</p>	$\{S_{\langle m \rangle}^*\}_k = \langle S_{\langle m \rangle, 0}^*, \dots, S_{\langle m \rangle, j}^*, \dots, S_{\langle m \rangle, k-1}^* \rangle$ <p>где $\{S_{\langle m \rangle}^*\}_k$ - массив слов информационного сообщения (с лемматизацией); $S_{\langle m \rangle, j}^*$ - j-тое слово информационного сообщения (с лемматизацией).</p>	$\tilde{p}(S_{\langle m \rangle, j}^*) = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} S_{\langle m \rangle, j, i}^*}{k}$
<p>6 Частотные характеристики пар слов без лемматизации</p>	$\{P_{\langle r \rangle}\}_{k-1} = \langle P_{\langle r \rangle, 0}, \dots, P_{\langle r \rangle, j}, \dots, P_{\langle r \rangle, k-2} \rangle$ <p>где $\{P_{\langle r \rangle}\}_{k-1}$ - массив пар слов информационного сообщения (без лемматизации); $P_{\langle r \rangle, j} = \langle S_{\langle m \rangle, j}, S_{\langle m_{j+1} \rangle, j+1} \rangle$ - j-тая пара слов информационного сообщения (без лемматизации); $r = m_j + m_{j+1}$ - количество символов в паре слов.</p>	$\tilde{p}(P_{\langle r \rangle, j}) = \frac{\sum_{i=0}^{k-2} (P_{\langle r \rangle, j, i})}{k-1}$
<p>7 Частотные характеристики пар слов с лемматизацией</p>	$\{P_{\langle r \rangle}^*\}_{k-1} = \langle P_{\langle r \rangle, 0}^*, \dots, P_{\langle r \rangle, j}^*, \dots, P_{\langle r \rangle, k-2}^* \rangle$ <p>где $\{P_{\langle r \rangle}^*\}_{k-1}$ - массив пар слов информационного сообщения (с лемматизацией); $P_{\langle r \rangle, j}^* = \langle S_{\langle m \rangle, j}^*, S_{\langle m_{j+1} \rangle, j+1}^* \rangle$ - j-тая пара слов информационного сообщения (с лемматизацией); $r = m_j + m_{j+1}$ - количество символов в паре слов.</p>	$\tilde{p}(P_{\langle r \rangle, j}^*) = \frac{\sum_{i=0}^{k-2} (P_{\langle r \rangle, j, i}^*)}{k-1}$

Рис. 3. Математическая интерпретация сущности информативных признаков

В целях обоснования информативности признаков необходимо осуществить проверку их статистической значимости в соответствии с двумя выдвинутыми гипотезами:

H_0 – статистические характеристики распределения символов одинаковы для русскоязычного и иностранного агента;

H_1 – статистические характеристики распределения символов не одинаковы для русскоязычного и иностранного агента.

Алгоритм проверки статистической значимости выдвинутых гипотез о предполагаемых информативных признаках принимает следующий вид.

На *первом этапе* формируется множество выборок генеральной совокупности (в соответствии с центральной предельной теоремой $n > 30$). При этом количество элементов выборки должно превышать $m = 10000$ элементов.

На *втором этапе* рассчитывается значение выборочного среднего и выборочной оценки дисперсии:

$$\bar{M}_{s_j} = \frac{\sum_{i=1}^m p_i(s_j)}{m}, \quad (11)$$

$$\bar{D}_{s_j} = \frac{\sum_{i=1}^m (p_i(s_j) - \bar{M}_{s_j})^2}{m-1}. \quad (12)$$

В соответствии с предельной центральной теоремой выборочные средние будут распределены нормальным образом с математическим ожиданием генеральной совокупности M_{s_j} и стандартной ошибкой среднего, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$\bar{\sigma}_{\bar{M}_{s_j}} = \frac{\bar{\sigma}_{s_j}}{\sqrt{m}}.$$

На *третьем этапе* выполняется преобразование полученных данных в стандартную Z-шкалу (Z-преобразование):

$$Z_{s_j} = \frac{M_{s_j} - \bar{M}_{s_j}}{\bar{\sigma}_{\bar{M}_{s_j}}}.$$

На *четвертом этапе* в соответствии со свойствами нормального распределения (в Z-плоскости) рассчитывается вероятность полученного отклонения \bar{M}_{s_j} от математического ожидания генеральной совокупности M_{s_j} .

В соответствии с критериями статистической значимости принято считать, что в случае, когда вероятность отклонения удовлетворяет неравенству $p < 0,05$, принимается альтернативная гипотеза H_1 , в случае $p \geq 0,05$ – основная H_0 .

Вероятность отклонения от математического ожидания генеральной совокупности M_{s_j} называется p – критерием значимости статистического параметра, который свидетельствует о значимости полученных результатов и максимальных ошибках первого и второго рода.

Результаты статистического эксперимента по оцениванию частотных характеристик биграмм без символов ранжированы по возрастанию значения ошибки, они представлены в табл. 1 и на рис. 4 и 5.

Исходя из представленных результатов, можно сделать вывод, что различия в частотных характеристиках биграмм статистически значимы только для пятнадцати позиций табл. 1. Для них значение ошибки не превышает уровня 5% и их можно использовать в качестве информативного признака.

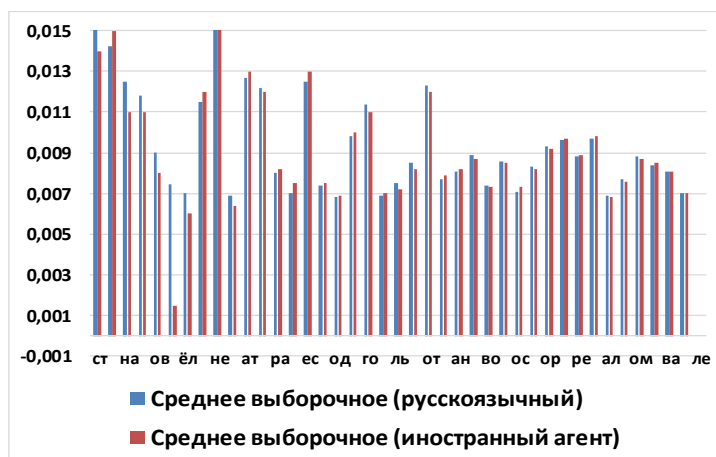


Рис. 4. Сравнение частотных характеристик биграмм

Таблица 1

Результаты проверки критерия статистической значимости

№	Биграмма	Среднее выборочное (русскоязычный) \bar{M}_{S_j}	Среднее выборочное (иноязычного автора) M_{S_j}	$\bar{\sigma}_{S_j}$	$\bar{\sigma}_{M_{S_j}}$	Z_{S_j}	P-уровень	Ошибка
1	ст	0,0174	0,01800	0,01250	0,00013	4,8000	0,00000	0,00%
2	но	0,0156	0,01400	0,02630	0,00026	6,08365	0,00000	0,00%
3	на	0,0142	0,01500	0,00870	0,00009	9,1954	0,00000	0,00%
4	по	0,0125	0,01100	0,02180	0,00022	6,88073	0,00000	0,00%
5	ов	0,0118	0,01100	0,01140	0,00011	7,01754	0,00000	0,00%
6	ка	0,009	0,00800	0,01750	0,00018	5,71429	0,00000	0,00%
7	ёл	0,00745	0,00150	0,03150	0,00032	18,8888	0,00000	0,00%
8	ла	0,007	0,00600	0,01880	0,00019	5,31915	0,00000	0,00%
9	не	0,0115	0,01200	0,01440	0,00014	3,4722	0,00049	0,05%
10	то	0,0164	0,01700	0,01750	0,00018	3,4285	0,00065	0,07%
11	ат	0,0069	0,00640	0,01490	0,00015	3,35570	0,00089	0,09%
12	ен	0,0127	0,01300	0,00910	0,00009	3,2967	0,00098	0,10%
13	ра	0,0122	0,01200	0,00690	0,00007	2,89855	0,00379	0,38%
14	те	0,008	0,00820	0,00710	0,00007	2,8169	0,00511	0,51%
15	ес	0,007	0,00750	0,02140	0,00021	2,3364	0,02060	2,06%
16	ни	0,0125	0,01300	0,02250	0,00023	2,2222	0,02780	2,78%
17	од	0,0074	0,00750	0,00550	0,00006	1,8181	0,07110	7,11%
18	де	0,0068	0,00690	0,00600	0,00006	1,6666	0,09200	9,20%
19	го	0,0098	0,01000	0,01210	0,00012	1,6528	0,09300	9,30%
20	ро	0,0114	0,01100	0,02890	0,00029	1,38408	0,16500	16,50%

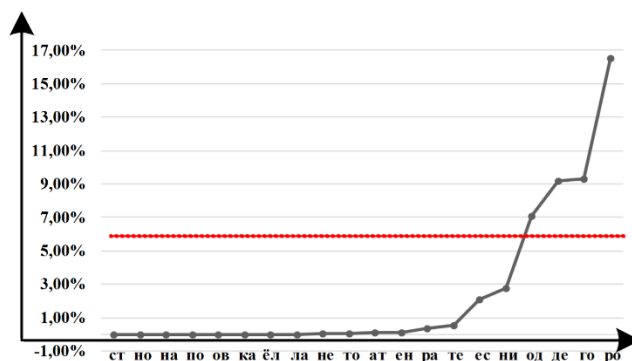


Рис. 5. Значение вероятностей ошибок использования различных биграмм в качестве информативного признака

В результате проверки статистической значимости остальных признаков гипотезы об информативности не подтвердились при оценивании частотных характеристик нелемматизированных слов и нелемматизированных пар слов. Для пяти других категорий признаков возможно сформировать таблицы, подобные табл. 1, и выделить группы наиболее информативных букв, биграмм, слов и пар слов. По каждой категории признаков можно сформировать правила принятия решения, посредством которого сформировать размеченные выборки для обучения нейронной сети в качестве инструмента принятия решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенных исследований можно сделать вывод о существующей зависимости особенностей написания текстовой информации от проявления русского менталитета. Признаки для информационного контента, созданного иноязычным автором, проявляются в рамках явления лингвистической интерференции.

В статье предложен алгоритм оценивания статистической значимости предполагаемых признаков, комплексное использование которых позволит сформировать репрезентативные выборки для обучения нейронной сети задачам распознавания иностранных агентов, авторов новостного информационного контента.

Список используемых источников

1. Кукушкина О.В., Поликарпов А.А., Хмелей Д.В. Определение авторства текста с использованием буквенной и грамматической информации // Проблемы передачи информации. – 2001. – № 37(2). – С. 96–109.
2. Ермаков А. Компьютерная лингвистика и анализ текста // Мир ПК. – 2002. – № 9. – С. 86–88.
3. Селезнев К. Обработка текстов на естественном языке // Открытые системы. СУБД. – 2003. – № 12. – С. 48–53.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
5. Майгельдиева Ж.М., Майгельдиева Ш.М., Кубенова М.А. Об интерференции в русской речи // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 3(45), ч. 4. – С. 20–23.
6. Чевела О.В., Федотова С.И., Никитюк В.П. К вопросу о преодолении языковой интерференции при обучении русскому языку как иностранному // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 1 – С. 154–158.

И.В. Абашева*;
В.Н. Алексеев**;
Д.А. Жарков**

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

**Войсковая часть 74455, г. Москва

ТЕНДЕНЦИИ УСЛОЖНЕНИЯ СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ОТ «ВОССТАНОВЛЕНИЯ» ПАРОЛЕЙ ИЗ ХЕШ-КОДОВ

В статье рассмотрены основные способы «восстановления» паролей из хеш-кодов, их классификация, принципы работы, усложнение хеш-кодов с целью противодействия имеющимся способам «восстановления» паролей, а также современный и перспективный способ защиты.

Цель исследования: показать тенденции усложнения системы защиты паролей на примере хеш-кодов с целью противодействия существующим методам взлома.

Ключевые слова: восстановление, пароль, хеш-код, хеш-функции, хеш-код с солью.

ВВЕДЕНИЕ

Защита пароля обеспечивается не только алгоритмами шифрования, но и надежным хранением его в базе данных. Чтобы пароли пользователей были недоступны для попыток злоумышленников их подобрать, разработчикам систем нужно спроектировать и реализовать систему защиты хеш-кодов паролей в базе данных паролей (далее – БД). Система должна снизить вероятность получения доступа к БД, и даже в случае получения доступа к ней она должна не позволить взломать хеш-коды за время актуальности пароля.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ АТАК НА ХЕШ-КОДЫ

Рассмотрим основные способы вскрытия («подбора») паролей из хеш-кодов[1].

1. Перебор всех возможных значений (Brutforce). Различают три основных типа взлома:

прямой – поиск пароля осуществляется на всем множестве его значений, который может иметь размер от 1 знака до длины, поддерживаемой системой безопасности. Является универсальным, но самым требовательным к наличию вычислительных ресурсов. Позволяет перебирать пароли длиной до 8–10 знаков;

шаблонный (template) – поиск пароля осуществляется не на всем пространстве, а только в его ограниченном множестве, которое удовлетворяет заданным критериям (определенному шаблону);

вероятностный (марковские цепочки) – дальнейшее развитие шаблонной атаки. В процессе поиска пароля учитываются частоты встречаемости n -граммам. Частота встречаемости n -граммам для использования строится на основе анализа имеющихся БД.

Специализированные комплексы позволяют осуществлять поиск пароля длиной до 6 знаков меньше чем за секунду. Используя специализированные вычислители, можно осуществлять атаки на пароли длиной около 10 символов, а с использованием шаблонов и марковских цепочек – до 16. Данный способ взлома стал применяться сразу с появлением алгоритмов хеширования.

2. Словарная атака (Dictionary Attack). Она основана на использовании данных, содержащих слова, фразы, характерные для данного ресурса или языка пользователей. Словари содержат пароли пользователей, которые были получены разными путями. Это позволяет при поиске пароля использовать то обстоятельство, что пользователи при работе на разных ре-

сурсах могут применять один и тот же пароль, что повышает вероятность взлома. Существуют атаки, в результате которых можно вычислить близость паролей, и проводятся они с применением правил (мутаций слов в словаре) с помощью специальных команд. Данный способ взлома стал использоваться сразу с появлением алгоритмов хеширования.

3. Перебор по «радужным таблицам» (Rainbow tables), которые состоят из хэш-кодов наиболее часто употребляемых паролей. Эти таблицы могут включать большое количество значений. По сути, это тот же перебор, только осуществляется поиск не пароля, а прообраза хеш-кода. Найденный прообраз осуществляет поиск по цепочке хешей пароля, который привел к ее генерации. Этот способ имеет существенный недостаток. В связи с участием в расчетах хеш-кода, пароль которого мы ищем, мы можем искать только один пароль. Если необходимо искать большое количество паролей, то время вычислений необходимо умножить на количество хешей. Данная атака состоит из двух этапов: создание определенным образом цепочек словарей (рис. 1) и поиск в таблице. Время на создание цепочек не меньше времени прямого перебора. Такой способ взлома был разработан Мартином Хеллманом и появился в 1980 году [2, 5].

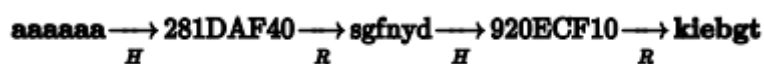


Рис. 1. Общий принцип создания радужной цепочки:
H – хеш-функция, R – функция преобразования из хеш-кода в пароль

ХЕШ-ФУНКЦИИ С «СОЛЮ»

Перебор по «радужным таблицам» основан на том факте, что, если пользователи используют один и тот же пароль, то и хеш-код для него будет один и тот же. Поэтому, если создать таблицу со всеми возможными паролями, то и поиск окажется почти мгновенным для пользователей, применяющих одинаковые пароли.

Для защиты от перебора по радужным таблицам необходимо либо усложнить функцию хеширования – увеличить количество операций для вычислений хеш-кода из пароля, либо внести небольшие изменения в существующие алгоритмы авторизации.

Разработчики в большинстве случаев вносят небольшие изменения в существующие алгоритмы авторизации посредством добавления к паролю случайной последовательности, осуществив «подсаливание» и тем самым его «удлинив». Данное усложнение может применяться к любому алгоритму хеширования, и поэтому нельзя точно определить дату его появления,

```
sha1("123456|"c92cfd8115") = ac43211beecee74e786232ce385690f6078fb5b2
sha1("123456|"326c2db280") = c1c8a269306573d1085ac3d19e3152874cdc5b06
sha1("123456|"57f2be11fb") = 22716a8c93b433e6a95d3b4068fd89974cddb832.
```

Другим предназначением «соли» является незаметное пользователю «удлинение пароля». Это существенно осложняет работу атакующего, обладающего специально сгенерированными радужными таблицами. Если атакующий получит все хеш-коды системы без «соли», то это не позволит ему проверить корректность паролей.

Пример применения алгоритма sha1 с и без «соли» представлен ниже (длина хеш-кода одинакова, и нельзя, получив только хеш-код, определить: есть «соль» или нет):

```
sha1("123456") = 7c4a8d09ca3762af61e59520943dc26494f8941b
sha1("123456|"c92cfd8115") = ac43211beecee74e786232ce385690f6078fb5b2
```

Для авторизации пользователя в системе в ней должны находиться все данные для проверки введенных пользователем параметров. Ниже представлен пример реальной БД параметров авторизации в виде текста (рис. 2).

Username	Secret	hash
Ivanov	QxLUF1bgIAdeQX	5b2577523954739fe5ed3b58a75cff2127075e d1
Petrov	Bv5PehSMfV11Cd	d1d3ec2e6f20fd420d50e2642992841d8338a3 5f
Sidorov	YYLmfY6IehjZMQ	1d8338a35fec2e6f20fd420d50e264 d1d3299284

Рис. 2. Пример хранения «соли»

Получение злоумышленником данных системы авторизации (хеш-кода и «соли») позволит осуществить перечисленные выше атаки и восстановить пароль, однако не позволит автоматически вычислить пользователей, у которых один и тот же пароль, – ведь все хэш-коды разные.

Примеры современных алгоритмов хеширования с «солью» на основе алгоритмов md5, sha1:

одинарные, с различным порядком использования «соли» и пароля: md5(pass|salt), md5(salt|pass), sha1(pass|salt), sha1(salt|pass);

с двойным использованием алгоритма: md5(md5(salt)|pass), md5(salt|md5(pass));

с тройным использованием алгоритма: md5(md5(salt)|md5(pass)), md5(md5(pass)|md5(salt));

с увеличенным количеством использования «соли» и пароля: md5(salt|pass|salt), md5(salt|md5(salt|pass)), md5(salt|md5(pass|salt)).

В связи с появлением современных вычислительных комплексов на базе FPGA и ASIC, позволяющих быстро взламывать пароли, хеширование с «солью» уже не обеспечивает надежной защиты от восстановления паролей. Поэтому применяются новые методы защиты хеш-кодов в БД паролей от злоумышленника.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ПАРОЛЬНО-АДРЕСНОЙ ИНФОРМАЦИИ

1. Технология растяжения ключа.

Другим направлением повышения стойкости системы к атакам является усложнение функции хеширования – повышение количества операций для вычисления. Для этого необходимо разработать и внедрить достаточно медленную функцию, которая не создает видимой задержки для пользователя, а атакующий при этом не может перебрать за приемлемое время все пространство ключей.

Ниже представлен перечень специальных стандартных алгоритмов, реализующих растяжение ключа: функции bcrypt (1999), PBKDF2 (2000), scrypt (2009), Argon2 (2015) и др.

На рис. 3 приведен пример использования функции PBKDF (версия 2.0) на основе алгоритма HMAC_GOST3411. На вход этой функции поступает пароль, «соль» и количество итераций (циклов), которые определяют, насколько медленной будет хеш-функция.

Если применять данную технологию с целью защиты ресурсов, то для проверки правильности введенных данных (пароля) потребуются дополнительные затраты на построение и эксплуатацию систем безопасности, что может оказаться критичным для большинства проектов. Кроме этого, данное направление создает предпосылки для выполнения атак типа «отказ в обслуживании» для систем авторизации, что является наиболее критичным для мобильных устройств и технологии интернет-вещей, где используются низкопроизводительные процессоры и процессоры, работающие на источниках питания на основе батарей.

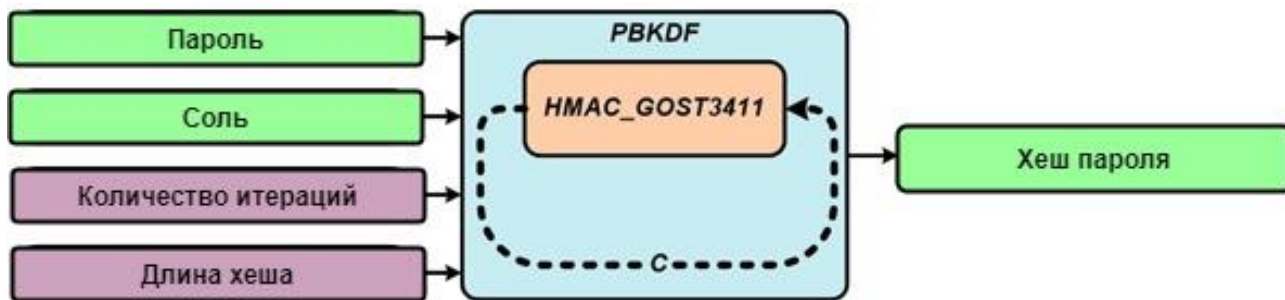


Рис. 3. Пример использования функции PBKDF (версия 2.0)

2. Комбинации хеш-функций.

Другим часто встречающимся направлением обеспечения защиты паролей является комбинирование различных хеш-функций. Соединение хеш-функций увеличивает количество итераций и кратно времени вычисления хеша.

Примеры комбинирования хеш-функций:

с двойным использованием алгоритма: $md5(md5(salt) | pass), md5(salt|md5(pass))$;

с тройным использованием алгоритма: $md5(md5(salt)|md5(pass)), md5(md5(pass)|md5(salt))$;

с увеличенным количеством использования «соли» и пароля: $md5(salt|pass|salt), md5(salt|md5(salt|pass)), md5(salt|md5(pass|salt))$.

В данных случаях для взлома потребуется, действительно, больше времени, но такой подход не гарантирует надежную защиту пароля. Атакующий будет поэтапно восстанавливать последовательность вложений хеш-функций, перебирая все варианты вложений. Пример комбинации хеш-функций, найденных и положительно восстановленных:

$md5(salt|md5(pass)|md5(salt)), sha1(md5(pass))$.

Разработка нового сложного алгоритма авторизации с использованием комбинаций хеш-функций требует очень глубоких криптографических знаний, необходимых для разработки устойчивого алгоритма хеширования.

3. Криптографические методы.

Это *имитовставка* и *аппаратное хеширование паролей*.

Основная идея – защитить криптографическими методами хеш-код от доступа атакующих, тем самым введя в систему дополнительный уровень контроля.

Реализуется двумя способами:

- шифрованием, например AES;
- имитовставкой, например алгоритм HMAC (секретный ключ включен в хеш-код).

Для защиты от троянов и других способов кражи ключ должен храниться во внешней системе, такой как физически изолированный сервер, или на специальном устройстве. Дополнительный уровень безопасности строится на основе анализа угроз безопасности системы.

МЕТОДЫ МАСКИРОВКИ

В настоящее время на некоторых информационных ресурсах выявлено применение новых способов хранения хеш-кода и «соли» в БД с применением алгоритмов маскировки. Ниже перечислены некоторые из них.

Метод группировки. Главная идея – замаскировать «соль», изменив способ хранения в БД паролей.

Вместо классического способа хранения хеш-кода и «соли» в БД паролей, где для них выделяется отдельный столбец, применяется метод группировки хеша-кода и «соли» в единую последовательность байт без специальных разделителей (рис. 4).

Такой метод группировки позволяет замаскировать от злоумышленника не только «соль», но и тип алгоритма хеширования, в примере из алгоритма md5(pass | salt) получить sha1 или любой другой алгоритм. Аналогично применяются методы группировки, когда «соль» ставится в начало хеш-кода.

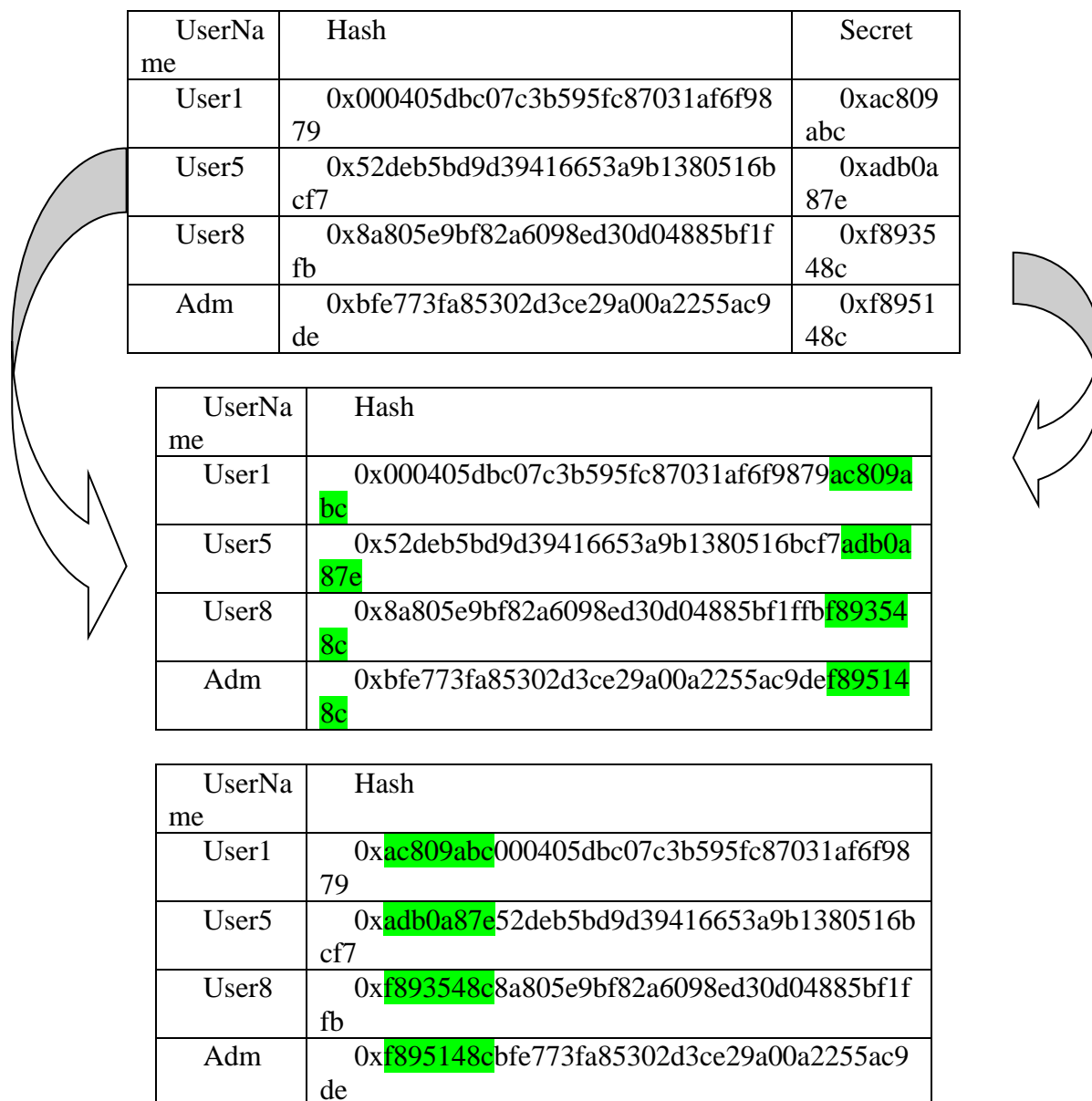


Рис. 4. Графическая интерпретация процедуры маскировки «соли»

Метод вставки. Главная идея – замаскировать байты «соли» среди байтов хеш-кода с помощью специального ключа. Функция преобразования хеш-кода F зависит от трех переменных:

$$F(\text{hash}, \text{salt}, \text{key}) = \text{new_hash},$$

где hash – результат хеширования пароля любой стандартной хеш-функцией (например, md5),
 salt – «соль»,
 key – секретный ключ, предназначенный для настройки алгоритма вставки «соли» в hash ,
 new_hash – новый хеш-код, который будет храниться в БД.

Рассмотрим применение данного метода на базе *framework Kohana* (веб-фреймворк с открытым кодом, основанный на PHP5), где по умолчанию используется тип хеш-функции – `sha1(pass | salt)`, а специальным ключом является массив `salt_patten` [4].

Специальный ключ представляет собой восходящую последовательность из десяти цифр. В исходных кодах данного ПО имеется стандартный (дефолтный) массив, который выглядит следующим образом:

$$\text{salt_pattern} = \{1, 3, 5, 9, 14, 15, 20, 21, 28, 30\}.$$

Позиции для вставки байтов «соли» в хеш-коде вычисляются следующим образом:

$$\text{pos}[i] = \text{salt_pattern}[i] + i,$$

где i – индекс массива.

В итоге получим

$$\text{pos} = \{1, 4, 7, 12, 18, 20, 26, 28, 36, 39\}.$$

В результате применения функции преобразования F (рис. 5) на хеш-код и «соль», получим новый хеш-код.

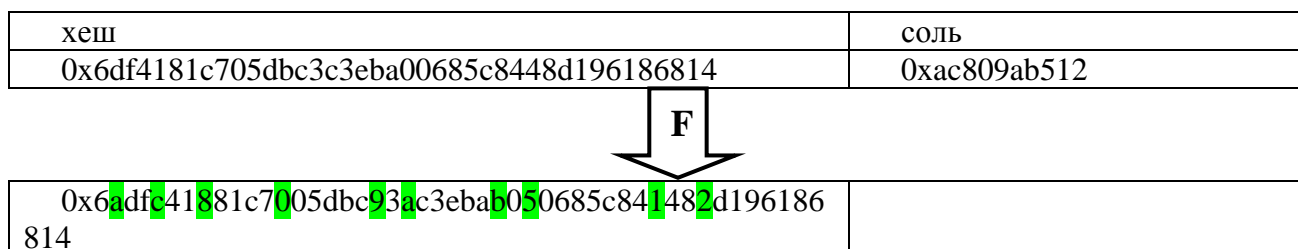


Рис. 5. Графическая интерпретация функции преобразования F

В базе данных паролей злоумышленник получит хеш-код, который относится к редким хеш-функциям (например, ArubaOS). Такие данные потребуют дополнительного анализа и дополнительных вычислений, что значительно усложнит получение доступа на сетевые узлы.

Данная система позволяет администраторам сети задавать собственный ключевой массив `salt_pattern`, а также выбирать тип хеш-функции семейства SHA1 с «солью».

ВЫВОД

Таким образом, существует большое количество способов «восстановления» паролей из хеш-кодов, в связи с чем появляются современные методы защиты парольно-адресной информации, основанные не только на математических методах, но и использующие методы сокрытия типа алгоритма, что сильно затрудняет взлом систем.

Список используемых источников

1. Алферов А.П., Зубов А.Ю., Кузьмин А.С. Основы криптографии. – М.: Гелиос АРВ, 2002. – 480 с.
2. Oechslin P. Making a Faster Cryptanalytic Time-Meory Trade-Off // Advances in Cryptology – CRYPTO 2003, 23rd Annual International Cryptology Conference. – USA, August 17–21 2003. – URL: <https://www.iacr.org/archive/crypto2003/27290615/27290615.pdf> (дата обращения: 27.09.2020).
3. Provos N., Mazières D. A Future-Adaptable Password Scheme // Proceedings of the FREENIX Track: 1999 USENIX Annual Technical Conference. (Monterey, California, USA, June

6–11, 1999). – URL: <https://www.usenix.org/legacy/event/usenix99/provos/provos.pdf> (дата обращения: 27.09.2020).

4. KOHANA PHP Framework: сайт. – URL: <https://kohanaframework.org> (дата обращения: 27.09.2020).

5. *Hellman M.* A Cryptanalytic Time-Memory Trade-Off // IEEE transactions on information theory. – URL: <https://caislab.kaist.ac.kr/lecture/2010/spring/cs548/basic/B01.pdf> (дата обращения: 27.09.2020).

А.О. Афанасьев;
С.В. Пилькевич,
доктор технических наук

ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ТЕКСТОВОГО КОНТЕНТА НА ВЕБ-СТРАНИЦАХ

Публикация посвящена проблематике размещения элементов управления на веб-страницах. В качестве цели исследования рассматривается определение параметров текстового контента, характеризующих степень привлечения внимания пользователя персонального компьютера при его ознакомлении с содержимым веб-страниц. Проведенные эксперименты позволили инструментально зафиксировать характеристики зрительного восприятия испытуемых, зависящие от типа и расположения элементов управления на веб-страницах.

Ключевые слова: текстовый контент, айтрекер, видеоокулография, точка фиксации, область внимания.

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние развития общества характеризуется информатизацией разнообразных сфер жизни – от жилищно-коммунального и сельского хозяйства до вопросов обороны государства [1]. Возрастает влияние новых электронных средств связи, обеспечивающих ставший привычным набор телекоммуникационных услуг и позволяющих своим пользователям свободно обмениваться разнородной информацией как личного, так и общественного характера. Современные компьютеры, подключенные к сети Интернет, и мобильные персональные устройства образуют инфраструктуру, открывающую своим пользователям доступ к разнообразным источникам данных (геопространственным, метеорологическим, новостным и др.) в зависимости от их потребностей. Широкое применение сервисов электронной почты, коммуникационных возможностей социальных сетей, форумов, блогов, информационных площадок и других новейших сервисов, без сомнения, способствует интенсификации не только межличностного, но и массового взаимодействия членов общества [2].

Информатизация общества привела к необходимости получения, обработки и, при необходимости, отправки индивидуумом громадных объемов разнородной информации. Эта ситуация послужила отправной точкой актуализации вопросов информационного влияния, а зачастую и откровенного давления на потребителей информационных ресурсов, что в конечном итоге нашло свою реализацию в проведении агрессивных предвыборных кампаний, продвижении товаров на рынок, реализации концепции контекстной рекламы, навязывании сомнительных товаров и услуг, формировании искаженного представления у аудитории об освещаемых событиях и персонах.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

Для разработки методов защиты граждан от негативного информационного воздействия необходимо рассмотреть особенности контента, распространяемого посредством современных телекоммуникационных систем.

К основным классам такой информации следует отнести:

- а) потоки видеоданных;
- б) аудиоконтент;
- в) текстовые сообщения.

Простота восприятия аудиторией, доверие к информации печатных изданий, распространенность и доступность технического оборудования по приему заставляют в первую очередь

обратиться к рассмотрению вопросов формирования (модификации) текстовой информации, которая представлена в глобальной сети Интернет в виде html-страниц и тестовых документов различных форматов (*.htm, *.mht, *.html, *.shtml, *.xml, *.doc, *.rtf, *.pdf и др.). Следует отметить исключительную важность и особое место среди прочего текстового контента возникшего сравнительно недавно массового феномена создания пользователями открытых дневников – «блогов». На данный момент блогосфера стала социально значимой средой общения. Главными особенностями данной среды являются стихийное образование тематических групп, возможность оперативно донести свои мысли до большого количества людей, фактическое отсутствие цензуры содержания. Быстрому разрастанию блогосферы способствует тот факт, что блог может с легкостью завести даже пользователь, незнакомый с основами разработки сайтов.

Высокая эффективность информационного воздействия мультимедийного контента обуславливает необходимость как контроля и фильтрации потенциально вредоносных материалов, доступных в сети Интернет, так и формирования соответствующего контента для оказания позитивного влияния на целевую аудиторию различных информационных площадок [3].

Наиболее важными параметрами, определяющими воздействие текста на психику человека и его физическое состояние, являются:

- наличие в тексте эмоционально выраженных и социально табуированных словоформ (например, «афроамериканец» – «нигер»);
- статическая и динамическая нагруженность текста в парадигме эволюционного кода речи [4, 5];
- фоносемантическая окраска [6, 7];
- фрактальная структура, определяющая потенциально высокие суггестивные свойства текста [8];
- применение эвфемизмов – лингвистических уловок, имеющих своей целью маскировку истинного значения описываемых событий (война – операция по принуждению к миру, ракетный удар – молниеносный ответ, ударно-разведывательный комплекс – активное средство объективного контроля, массовые убийства – обострение напряженности и т. д.);
- использование сопутствующих значений слов – коннотаций (ястреб – сторонник силового варианта разрешения противоречия; осел – упрямство, глупость; свинья – неблагодарность, подлость и т. д.).

При распространении текстовой информации посредством систем и сетей связи, обеспечивающих отображение сложного форматирования документов (надстрочные, подстрочные, символы псевдографики, гиперссылки и др.), необходимо использовать субъективное влияние различных цветов на человека, а также физиологические особенности восприятия цветов и форм.

Фундаментальные исследования, проводившиеся в области эргономики и технической эстетики, сформировали богатый набор сведений о степени воздействия на человека цветовой палитры, выбора шрифтов, восприятия цифр, начертания букв и др.

ВИДЕООКУЛОГРАФИЯ КАК МЕТОД ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА

Современные аппаратные средства объективного контроля деятельности оператора персонального компьютера позволяют фиксировать характеристики поведенческой деятельности человека в ходе его ознакомления с аудиовизуальной и текстовой информацией. К числу такого оборудования относятся видеоокулографы или айтрекеры – носимые или стационарные устройства, позволяющие наблюдать и записывать параметры движения глаз: направление, скорость, диаметр зрачка, моргания. На основе регистрируемых показателей можно

ввести понятие «точек фиксации» – это точки взгляда пользователя, характеризующиеся длительным промежутком временем фиксации, т. е. те области, которые представляют для испытуемого наибольший интерес.

Задача определения фокуса взгляда пользователя в общем случае сводится к сравнению позиции отражения, созданного пучком ближнего инфракрасного света, с позицией зрачка. Простейшие геометрические построения, описывающие указанную задачу, в сочетании с информацией о положении головы испытуемого позволяют определить точку, на которой сфокусирован взгляд пользователя. Далее определяются соответствующие координаты на экране и при сопоставлении с временными метками можно однозначно указать область изображения, привлекая внимание оператора. Рассматриваемое оборудование реализует указанный подход и позволяет определить, что именно попадает в зону внимания, а что полностью игнорируется [9].

Широта диапазонов допустимого перемещения головы пользователя (расстояние, на которое пользователь может отклонять голову вверх-вниз и вправо-влево) является одним из основных параметров стационарных видеоокулографов, оказывающим прямое влияние на стоимость устройства. Технические характеристики айтрекеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение основных параметров айтрекеров

Наименование модели видеоокулографа	Частота сканирования (Гц)	Диапазон перемещения головы (см)	Расстояние от айтрекера (см)	Цена (тыс. \$)
Tobii X2	30-60	50×36	40-90	10
Tobii TX300	300	37×17	50-80	—
SMI Red	60/120/500	40×20	60-80	40
SMI Red-m	60/120	32×21	50-75	36
D6 Remote Tracking	60	33×33	50.8-101.6	42
S2 Desktop Eye Tracker	60	25×11	50-80	5 / 10
Eyetech VT2	80	33×16	65-100	7,5
Eyetech VT2 mini	80	33×16	65	7,5
Eyetech VT2 XL	80	36×19	120-250	7,5
GP3 Desktop Eye-Tracker	60	25×11	50-80	0,5
The eyetribe eyetracker	30/60	40×30	45-75	0,099
EyeFollower	120	76×51	46-97	25
EAS Binocular	120	76×51	46-97	15
EAS Monocular	60	76×51	46-97	—
faceLAB 5	—	35×23	60	—
Remote 3D Eye Tracking DR120	120	40×40	30	—
Smart Eye Pro 5	60-120	40×40	30-300	—

Анализ тактико-технических и стоимостных характеристик современных видеоокулографов позволил сделать выбор в пользу айтрекера компании Gazepoint – GP3 Desktop Eye-Tracker (строка табл. 1, выделенная серым цветом).

Данное устройство фиксирует следующие значения [10]:

- доля внимания и количество фиксации на различных частях изображения и элементах оформления;
- эмоциональная вовлеченность и сила эмоциональной реакции;
- изменение эмоций в процессе использования сайта/приложения;

– статистика посещений, кликов в целом и относительно самого короткого пользовательского пути.

Помимо перечисленного GP3 Desktop Eye-Tracker позволяет анализировать заметность элементов интерфейса, степень внимания пользователя относительно различных объектов, количество фиксаций, эффективность навигации.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Формальная постановка решаемой задачи родственна классу задач, известных в области вычислительной геометрии и в случае ее экстремальной постановки, в исследовании операций. Пусть задано множество точек $\mathbf{P} \subset \mathbb{R}^d$, требуется найти множество точек $\mathbf{S} \subset \mathbb{R}^d$, $|\mathbf{S}| = k$, такое, что $\max_{p \in \mathbf{P}} \left(\min_{s \in \mathbf{S}} d(p, s) \right)$ будет минимальным. В том случае, если ограничение на количество точек фиксации (элементов интерфейса) не накладывается, то $k \in \mathbb{N}$. Если же решение задачи рассматривается безотносительно ограничений по времени предъявления изображений испытуемым, то требование $\min_{s \in \mathbf{S}} d(p, s)$ – минимизации расстояния между областями – также снимается.

В качестве исходных данных для проведения эксперимента выступили веб-страницы с наиболее распространенным интерфейсом, который используется в сети Интернет. Задача испытуемых заключалась в последовательном просмотре этих страниц (сайтов) и ознакомлении с расположенными на них элементами управления, по сути – это имитация ознакомления с информационным содержанием веб-страницы. Результаты реагирования («глазного поведения») пользователей фиксировались с помощью специального программного обеспечения Gazepoint Analysis (рис. 1) [9].

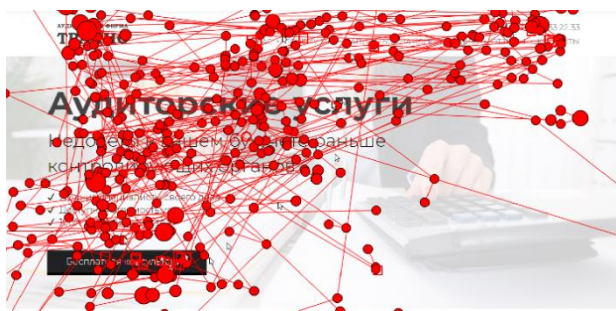


Рис. 1. Области интереса пользователей – участники эксперимента

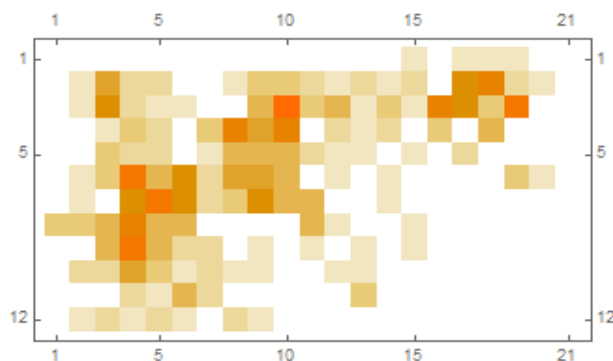


Рис. 2. Проекция гистограммы координат направления взгляда испытуемых на экран

На изображении (рис. 1) представлены обобщенные результаты всех пользователей, наглядно демонстрирующие преобладание интереса в отношении объектов управления (кнопок) по сравнению с графическими изображениями. Координаты направления взгляда испытуемых при их ознакомлении с предъявляемым стимульным материалом трактовались как двумерная случайная величина. Гистограмма ее распределения с уровнем значимости, равным 0,95 (рис. 2), позволяет построить своеобразные карты зон интереса – областей изображения, рассматриваемых испытуемыми наиболее внимательно. В терминах формальной постановки задачи множество $\mathbf{S} \subset \mathbb{R}^d$. Обращает на себя внимание необходимость некоторого загробления результатов и перехода от пространства \mathbb{R}^d к $\mathbb{R}^{N \times N}$, что обусловлено привязкой полученных результатов к координатной сетке с ячейками 64 x 64 пикселя. Это дает возможность

представить выделенные области квадратными фрагментами исходного изображения соответствующего размера. Указанное преобразование представляется оправданным в виду существования систематической ошибки измерений, характеризующей средство мониторинга. В результате описанной процедуры обработки получаем координаты фрагментов, содержащих эмоционально-значимые (информационно-нагруженные) элементы стимульного материала, которые, как предполагают исследователи, побуждают испытуемых дольше обрабатывать визуальную информацию [11].

Проведенные экспериментальные исследования и последующая статистическая обработка их результатов позволили сформулировать ряд рекомендаций по размещению элементов интерфейса электронного текстового ресурса, а также по своеобразному ранжированию степени заметности этих элементов для пользователя.

1. Символические изображения (иконки, пиктограммы) предпочтительнее размещать в левом верхнем углу веб-страницы, что привычнее для пользователей (справедливо для исследованной группы и, вероятно, зависит от социокультурных особенностей испытуемых).

2. Элемент «меню» целесообразно расположить в верхней части страницы по горизонтали. Это позволяет пользователям избегать применения функции прокрутки и фиксирует внимание на большее время.

3. Рациональнее использовать один крупный заголовок, чем несколько меньших по размеру: пользователи обращают внимание и запоминают такой заголовок лучше. Аналогичная рекомендация справедлива и для рисунков.

4. Крупные кнопки ярких цветов на сайте привлекают внимание пользователей в большей степени (см. на рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования позволяют создать перечень элементов интерфейса электронного текстового ресурса, в наибольшей степени привлекающих внимание пользователей персонального компьютера при посещении соответствующих интернет-ресурсов. Совокупность характеризующих их параметров в сочетании с информацией об особенностях целевой аудитории позволяет создать специализированное программное обеспечение поддержки принятия решений для разработки веб-страниц, обладающих высокой степенью фиксации взгляда пользователей.

В качестве направлений дальнейших исследований целесообразно рассмотреть возможность повышения степени заинтересованности пользователя в содержании веб-ресурса (текстовых сообщений в htm-подобных форматах) за счет использования мультимедийных объектов или так называемой gif-анимации.

Представляет интерес проведение аналогичного исследования в отношении особенностей восприятия контента, демонстрирующегося на экране мобильного персонального устройства (смартфона, планшета и т. д.).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-22064\19.

Список используемых источников

1. Пилькевич С.В., Ломако А.Г. Модели коммуникации при обеспечении защиты от негативного информационного воздействия // Методы обеспечения информационной кибербезопасности. – М.: КомКнига, 2013. – Т. 27 [дополнительный выпуск] – С. 475–496.

2. Грачев М.Н. Политическая коммуникация: теоретические концепции, модели, векторы развития. — М.: Прометей, 2004. – 328 с.

3. *Лускатов И.В., Пилькевич С.В.* Модель выявления киберугроз на информационные ресурсы сети Интернет // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы: журн. – 2018. – № 3. – С. 9–17.
4. *Биркин А.А.* Код речи. – СПб.: Гиппократ, 2007. – 408 с.
5. *Биркин А.А.* Психофизиология кода речи. Теоретические основы // Психотерапия. – 2006. – № 7 (43). – С. 15–19.
6. *Журавлев А.П.* Звук и смысл. – М.: Просвещение, 1991. – 160 с.
7. *Журавлев А.П.* Фонетическое значение. – Л., 1974. – 205 с.
8. *Гнидко К.О., Горемыкин Д.В.* Исследование фрактальных свойств внушающих текстов в интересах защиты оператора автоматизированной системы военного назначения от вредоносного информационно-психофизиологического воздействия // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2009. – Вып. 625. – С. 182–189.
9. Сайт фирмы Gazerpoint. – URL: <https://usabilityin.ru/gazerpoint/> (дата обращения: 12.09.2020).
10. *Фазылзянова Г.И., Балалов В.В.* Айтрекинг: когнитивные технологии в визуальной культуре // Вестник российских университетов. Математика. – 2014. – 19(2). – С. 628–633.
11. *Пилькевич С.В., Андрушкевич С.С.* Исследование особенностей восприятия потенциально негативного контента // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации: материалы 29-й научно-техн. конф. 28 сент. – 1 окт. 2020 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. – С. 7–8.

А.А. Криулин*,
кандидат технических наук;
В.С. Нефедов*,
кандидат технических наук;
Г.Ю. Потерпеев*,
кандидат технических наук;
В.И. Якунин**,
кандидат технических наук

*Российский технологический университет, г. Москва.

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

ПОДХОД К АНАЛИЗУ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Представлен подход формирования классов вредоносных программ с применением синтаксического анализа результатов сканирования антивирусными средствами и с использованием алгоритмов машинного обучения при определении класса вредоносной программы, что позволяет систематизировать и интегрировать полученные новые знания в процесс обеспечения безопасности информации объектов информационной инфраструктуры. Предложена классификация вредоносных программ с помощью алгоритма случайный лес и метода опорных векторов. В отличие от существующих при применении подхода используются усредненные макро- и микропоказатели, позволяющие оценить точность работы алгоритмов для разных классов вредоносных программ.

Ключевые слова: компьютерная атака, вредоносное программное обеспечение, исполняемый файл, алгоритм машинного обучения, мультиклассовая классификация, классификатор, метод опорных векторов.

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерные атаки все чаще принимают таргетированную форму, представляя собой совокупность различных действий в информационно-вычислительной сети с применением программных средств, в том числе вредоносных. Развитие современных методов интеллектуального анализа данных, алгоритмов машинного обучения позволяет уверенно совершенствовать различные системы поддержки принятия решений, распознавания образов, компьютерного моделирования и т. д., и, в частности систем обнаружения и предупреждения компьютерных атак. Совершенствование превентивных мер по распознаванию вредоносного программного обеспечения (ВПО) с определением класса таких программ должно способствовать максимально эффективному реагированию на инциденты компьютерной безопасности.

В статье рассматривается подход к анализу ВПО с использованием мультиклассовой классификации алгоритмами машинного обучения с целью точного определения его класса. Подход отличается от существующих способом формирования классов вредоносных программ с применением синтаксического анализа результатов сканирования антивирусными средствами.

Новизна подхода также состоит в использовании алгоритмов машинного обучения при определении класса вредоносной программы. Это позволяет систематизировать и интегрировать полученные новые знания в процесс обеспечения компьютерной безопасности. Определение класса вредоносной программы делает возможным прогнозирование поведения таких программ в компьютерной сети, сужение места проверки и контроля, а также применение адекватных мер противодействия компьютерным атакам.

ВЫБОРКА ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований использовалась выборка вредоносного программного обеспечения с публичного ресурса *GitHub* [1]. Из выборки были убраны все файлы, не являющиеся исполняемыми для операционной системы *Windows*. В результате анализу и классификации подвергались только файлы формата PE (*Portable Executable*) под платформы x86 и x64.

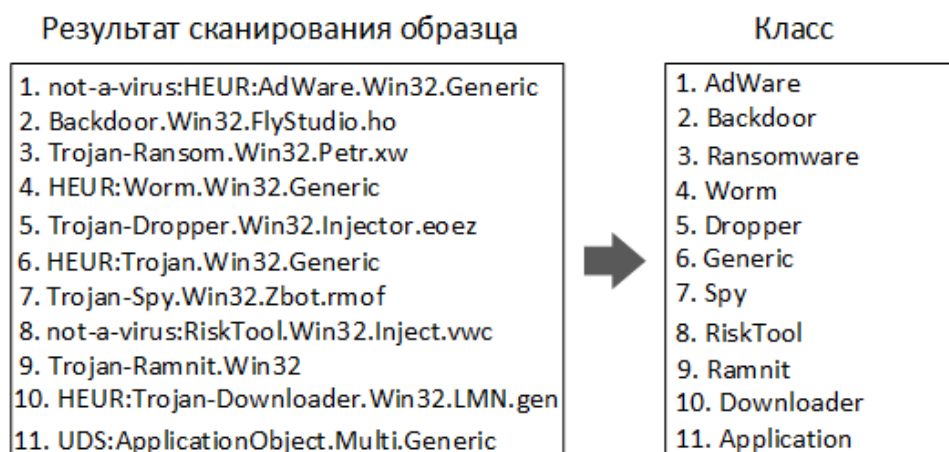


Рис. 1. Сопоставление образца вредоносной программы с классом

Для определения класса вредоносных программ использовался сервис *VirusTotal*. Вредоносной программе рассчитывалась хэш-сумма, и с использованием API сервиса *VirusTotal* были получены результаты сканирования этих программ средствами антивирусной защиты. Результаты сканирования от сервиса *VirusTotal* представляют собой ответы средств антивирусной защиты в формате JSON. В результате синтаксического анализа результатов сканирования были сформированы 11 классов вредоносных программ (рис. 1).

ОТБОР ПРИЗНАКОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Обозначим признаком f для каждого экземпляра из всей выборки X вредоносных программ как характеристику исполняемого файла $f: X \rightarrow D_{\langle f \rangle}$, где $D_{\langle f \rangle}$ – вектор признаков. При этом элементы в векторе $D_{\langle f \rangle}$ могут быть бинарными и принимать значения $\{0, 1\}$ или количественными – $\{0, +\infty\}$.

К количественным признакам относятся: размер исполняемого файла – f_1 , число секций – f_2 , версия компоновщика – f_3 , размер образа в памяти операционной системы – f_4 , размер исполняемого кода – f_5 , размер инициализированных данных – f_6 , число исполняемых секций – f_7 , число секций с нестандартными именами – f_8 , число импортируемых (экспортируемых) функций – f_9 , число импортируемых библиотек – f_{10} , значение энтропии всего исполняемого файла – f_{11} .

Совокупность признаков описаний всех объектов выборки X вредоносных программ может быть представлена в матрицы F размером $m \times n$:

$$F = \|f_i(x_i)\|_{m \times n} = \begin{pmatrix} f_1(x_1) & f_n(x_1) \\ \dots & \dots \\ f_1(x_m) & f_n(x_m) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

которая отражает исходные данные.

На рис. 2 представлены диаграммы размаха для разных классов программ по признаку f_1 размера файла из матрицы признаков F (1). На оси Y находятся значения размеров исполняемых файлов в байтах, на оси X – классы вредоносных программ. На диаграммах в графическом виде отражаются такие показатели, как медиана, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значения выборки и выбросы.

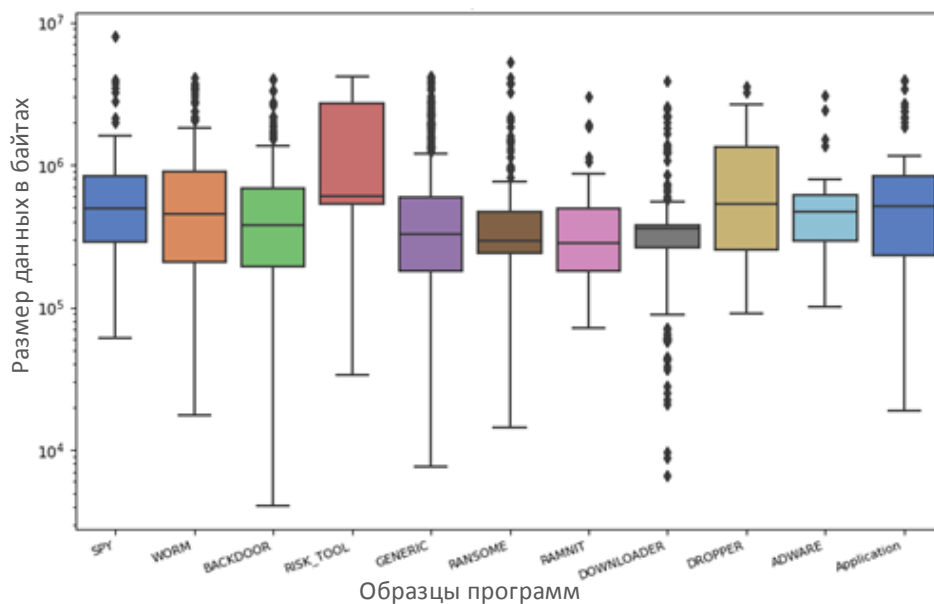


Рис. 2. Сравнение классов вредоносных программ по размеру

К бинарным признакам относятся: наличие упаковщика – f_{12} , тип исполняемого файла (библиотека динамического линкования, системный драйвер) – f_{13} , использование платформы .NET – f_{14} , наличие отладочной информации – f_{15} , тип запуск программы (консольный, графический) – f_{16} , наличие секции ресурсов – f_{17} , наличие ресурсов с типом RC_DATA – f_{18} , разработка на языке Delphi – f_{19} .

ПОРЯДОК РАЗРАБОТКИ МУЛЬТИКЛАССОВОГО КЛАССИФИКАТОРА ПРИ АНАЛИЗЕ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Непосредственно самому этапу разработки классификатора предшествует этап подготовки данных из выборки вредоносных программ. Первый шаг в подготовке данных – это выполнение факторизации. Признаки, имеющие строковые значения, например тип упаковщика или название компилятора, кодируются числовыми эквивалентами. Затем выборка разбивается на обучающую и тестовую, как правило, в соотношении 80 на 20 соответственно. Многие алгоритмы чувствительны к шкале данных. В тех случаях, когда размерности не сопоставимы, данные из обучающей и тестовой выборки шкалируют, благодаря чему каждая размерность имеет нулевое среднее значение и стандартное отклонение, равное 1.

Преобразование каждой размерности в «стандартные отклонения от среднего значения» позволяет фактически избавиться от единиц измерения.

При решении задачи мультиклассовой классификации необходимо построить алгоритм, который будет предсказывать, к какому классу, число которых K , относится каждый объект из выборки, и оценить его точность. Для этого, как правило, задача мультиклассовой классификации сводится к задаче бинарной классификации. Используя подход *OneVsRest* (один против всех) построим K классификаторов, каждый из которых будет отделять один класс от остальных. При этом для i -го класса обучающей выборкой будет служить вся выборка вредоносных программ, $X^i = X^l$.

Если объект относится к классу i , ответ будет «1». Если объект относится к одному из других классов, ответ будет «0». Тогда $y_j^i = [y_j = i]$. Построим классификатор, который будет давать оценку принадлежности объекта к классу 1, причем ответами будут вещественные числа $b_i(x) \in \mathbb{R}$. После построения K классификаторов вычисляем вещественные оценки принадлежности, находим максимальную из них и этот класс возвращаем в качестве ответа:

$$y(x) = \arg \max_k b_k(x) \quad (2)$$

$$k \in \{1, \dots, K\}$$

В качестве метрик в задачах классификации используется матрица ошибок, которая будет содержать следующие ответы:

- истинно-положительный, TP – образец относится к конкретному классу, например к классу WORM, и алгоритм его классифицировал к классу WORM;
- ложно-отрицательный, FN – образец относится к классу WORM, и алгоритм его классифицировал к другому классу;
- ложно-положительный, FP – образец не относится к классу WORM, и алгоритм его классифицировал к классу WORM;
- истинно-отрицательный, TN – образец не относится к классу WORM, и алгоритм его классифицировал к другому классу.

Для оценки качества работы алгоритма на каждом из классов по отдельности вводятся метрики точности и полноты:

$$P = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (3)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN}.$$

Показатель P отражает долю положительно классифицированных вредоносных программ конкретного класса, а показатель R показывает, какую долю вредоносных программ конкретного класса из всех программ этого класса нашел алгоритм.

Для оценки работы модели в целом может использоваться также значение площади под кривой ошибок – ROC-AUC. При этом ROC-кривая представляет собой линию со значениями от (0;0) до (0;1) в координатах TPR истинно-положительного результата и FPR ложно-положительного результата [2]:

- истинно-положительный результат, TPR – отношение числа TP (истинно-положительных) ответов от алгоритма к общему числу образцов класса WORM в выборке. Данный показатель отражает способность алгоритма распознавать образцы класса WORM при анализе вредоносных образцов различного класса;
- ложно-положительный результат, FPR – отношение числа FP (ложно-положительных) ответов от алгоритма к общему числу образцов других классов в выборке.

Для решения K задач бинарной классификации результирующая точность алгоритма может быть усреднена и может оцениваться с использованием макро- и микросреднего показателей:

$$P_{macro} = \frac{\sum_{k=1}^N P_k}{N};$$

$$P_{micro} = \frac{\sum_{k=1}^N TP}{\sum_{k=1}^N (TP + FP)}.$$
(4)

При микроусреднении в каждой задаче бинарной классификации вычисляются базовые показатели: TP , FN , FP , TN . Затем они усредняются также по каждой задаче, и вычисляется результирующая метрика, например точность. При макроусреднении сначала выполняется вычисление результирующей метрики для каждой бинарной задачи, а затем производится усреднение.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МУЛЬТИКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

С целью более наглядной оценки качества классификации вредоносных программ использовались несколько алгоритмов – случайный лес [3] и метод опорных векторов [4]. Также из предположения, что с увеличением числа классов вредоносных программ качество классификации должно снижаться, использовались две выборки, состоящие из четырех классов и из одиннадцати.

В табл. 1 и 2 представлены результаты классификации вредоносных программ алгоритмом случайный лес с использованием метрик TP , FN , FP , TN , а также рассчитанные на основе этих метрик показатели (3) точности, полноты и значения истинно-положительного и ложно-положительного результата.

Таблица 1

Показатели классификации алгоритма случайный лес для четырех классов ВПО

№ пп	Класс	T	F	F	T	T	F	P
		P	N	P	N	PR	PR	
1	WORM	1 38	1 0	1 0	4 3	0. 81	0. 19	0 .81
2	BACKDOOR	1 48	2 9	5 9	1 9	0. 40	0. 21	0 .79
3	RANSOME	1 43	2 2	3 3	3 3	0. 60	0. 08	0 .92
4	DOWNLOADER	1 53	1 0	3 5	3 5	0. 78	0. 08	0 .92

При сравнении значений точности классификации в табл. 1 и 2 можно заметить снижение этого показателя для некоторых классов с увеличением общего числа исследуемых классов.

С использованием полученных показателей определим значения (4) микро- и макросреднего показателей (табл. 3).

Таблица 2

Показатели классификации алгоритма случайный лес для 11 классов ВПО

№ пп	Класс	T	F	F	T	T	F	P
		P	N	P	N	PR	PR	
1	SPY	4 56	1 3	1	2	0. 13	0. 33	0 .67
2	WORM	4 03	2 5	4	4 0	0. 62	0. 09	0 .91
3	BACKDOOR	4 17	4 4	5	6	0. 12	0. 45	0 .55
4	RISK_TOOL	4 58	1 1	1	2	0. 15	0. 33	0 .67
5	GENERIC	2 23	5 7	6 0	1 32	0. 70	0. 31	0 .69
6	RANSOME	4 10	2 9	8	2 5	0. 46	0. 24	0 .76
7	RAMNIT	4 62	8	0	2	0. 20	0. 00	1 .00
8	DOWNLOADE R	4 11	1 9	8	3 4	0. 64	0. 19	0 .81
9	DROPPER	4 67	4	0	1	0. 20	0. 00	1 .00
10	ADWARE	4 64	4	3	1	0. 20	0. 75	0 .25
11	APPLICATION	4 57	1 1	2	2	0. 15	0. 50	0 .50

Таблица 3

Микро- и макросредние показатели классификации ВПО

№ пп	Алгоритм	Число классов	Микро-среднее	Макросреднее
1	Случайный лес	4	0,80	0,70
2	Метод опорных векторов	4	0,66	0,66
3	Случайный лес	11	0,75	0,65
4	Метод опорных векторов	11	0,69	0,57

С использованием показателей TPR истинно-положительного и FPR ложно-положительного результата выполним оценку качества классификации обоих алгоритмов, построив графики ROC-кривых для четырех и одиннадцати классов вредоносных программ.

На рис. 3 (вверху) изображен график ROC-кривых для четырех классов вредоносных программ, классифицированных с использованием алгоритма случайный лес. Микросреднее и макросреднее значения для мультиклассовой классификации с использованием случайного леса получились 0,80 и 0,80 соответственно.

На рис. 3 (внизу) изображен график ROC-кривых для четырех классов вредоносных программ, классифицированных с использованием метода опорных векторов. Микросреднее и макросреднее значения для мультиклассовой классификации с использованием метода опорных векторов получились 0,66 и 0,66 соответственно.

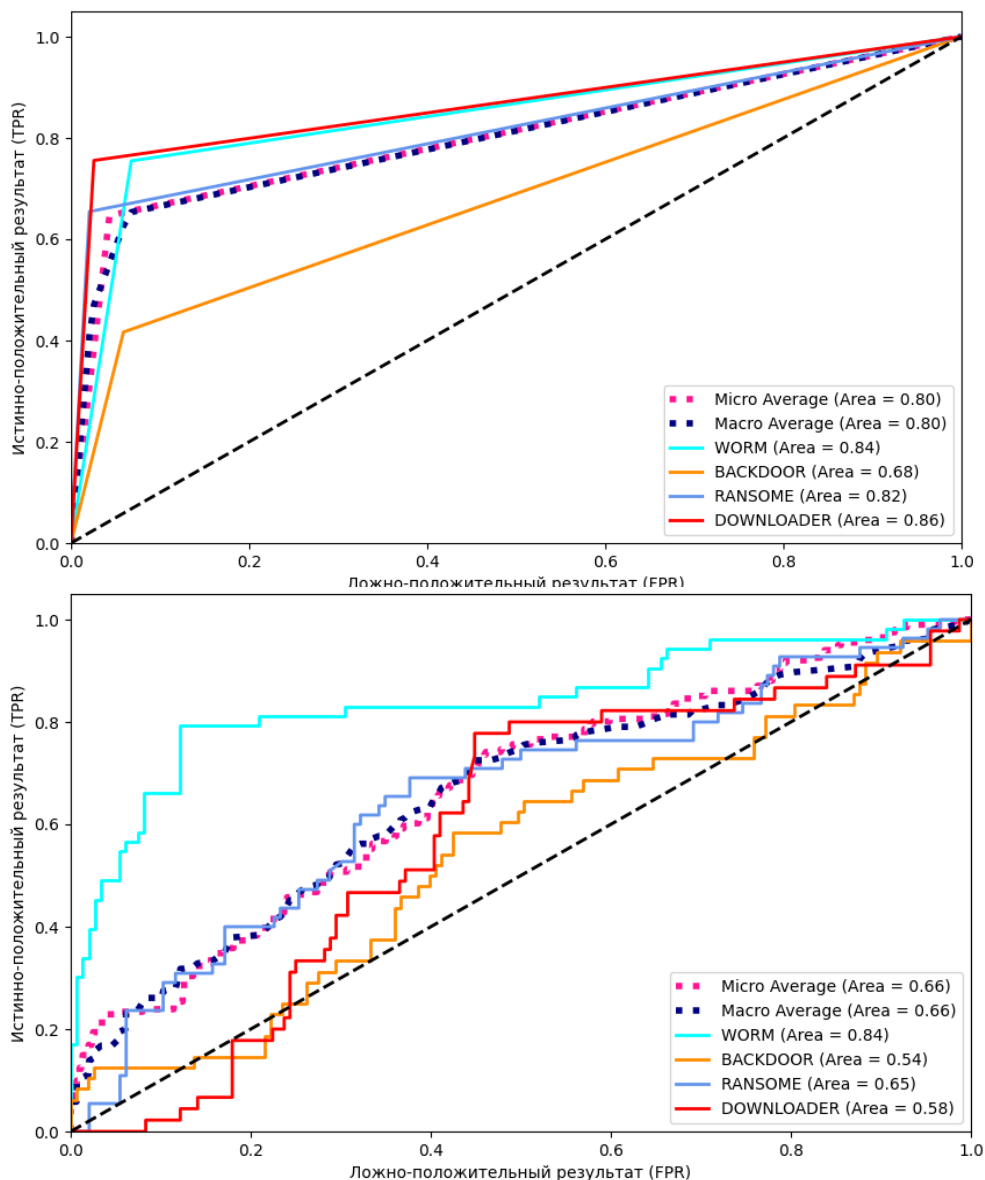


Рис. 3. Сравнение результатов мультиклассовой классификации

Стоит отметить, что результаты качества классификации для обоих алгоритмов оказались довольно высокими, усредненные показатели практически одинаковы. Интересным результатом стал тот факт, что алгоритм случайный лес лучшие результаты показал на классах WORM (сетевые черви) и DOWNLOADER (программы, скачивающие нагрузку из интернета). Метод опорных векторов лучше распознает классы BACKDOOR (бэждоры) и RANSOME (шифровальщики или уничтожители данных).

На рис. 4 (вверху) изображен график ROC-кривых для всех имеющихся классов вредоносных программ, классифицированных с использованием алгоритма случайный лес. Микросреднее и макросреднее значения для мультиклассовой классификации с использованием случайного леса получились 0,75 и 0,65 соответственно.

На рис. 4 (внизу) изображен график ROC-кривых для всех имеющихся классов вредоносных программ, классифицированных с использованием метода опорных векторов. Микросреднее и макросреднее значения для мультиклассовой классификации с использованием метода опорных векторов получились 0,69 и 0,57 соответственно.

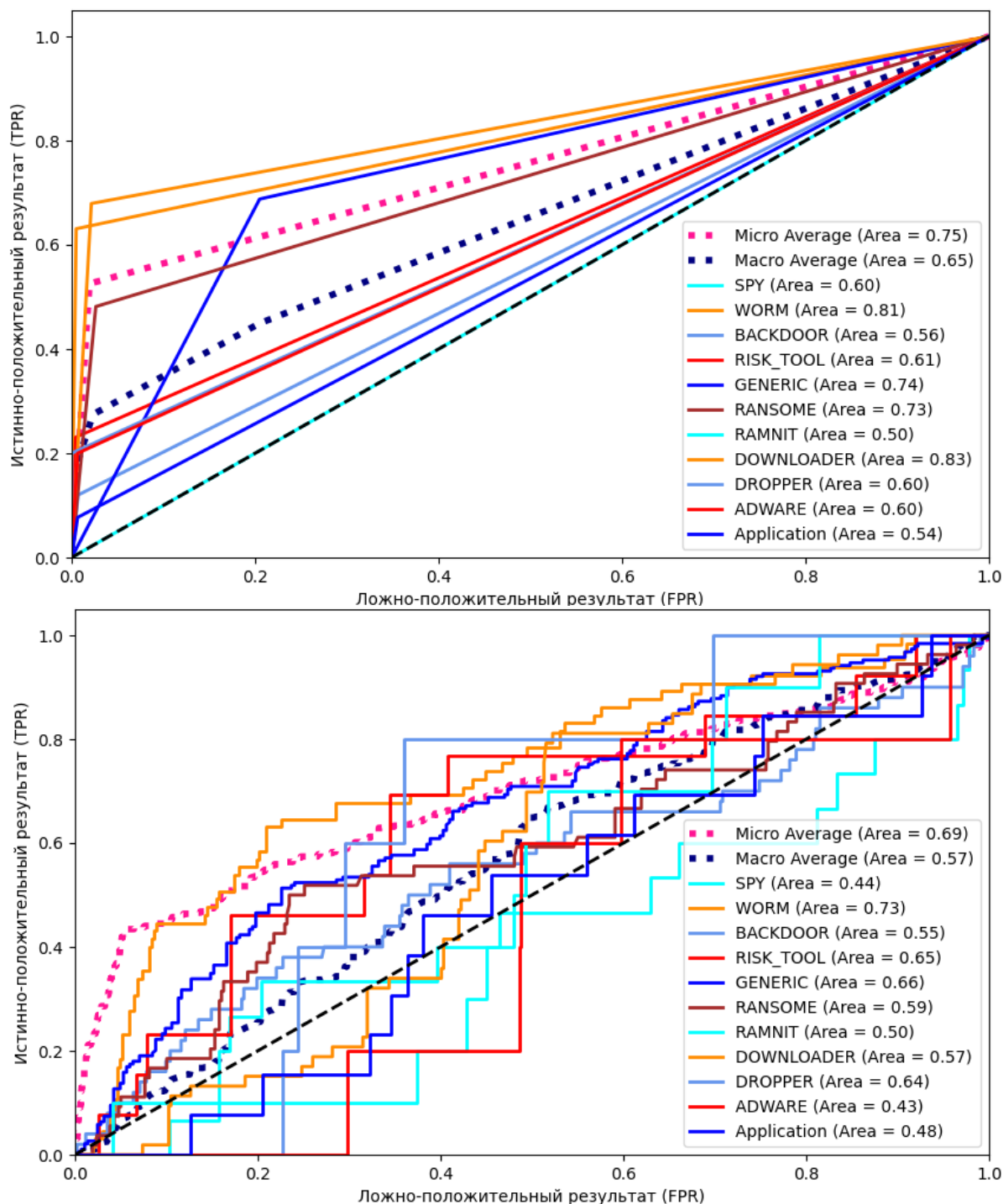


Рис. 4. Сравнение результатов мультиклассовой классификации

Все полученные результаты классификации одиннадцати классов вредоносных программ оказались ниже, чем для четырех классов. При этом алгоритм случайный лес практически по всем классам показал более высокую точность, чем метод опорных векторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье исследован подход к анализу вредоносных программ разных классов с использованием алгоритмов машинного обучения. В отличие от существующих при применении подхода используются усредненные макро- и микропоказатели, позволяющие оценить точность работы алгоритмов для разных классов вредоносных программ. Полученные результаты отражают специфичность параметров вредоносных программ разных классов, что подтверждается точностью классификации алгоритмов машинного обучения.

Следует отметить, что результаты классификации получены из анализа параметров и характеристик вредоносных программ, не относящихся к динамическим, и не учитывают поведение таких программ в операционной системе. С учетом того, что не всегда имеется возможность использования специальных песочниц для анализа программ, рассмотренный в статье подход может быть применен в общей системе предупреждения компьютерных атак в совокупности с другими подходами.

Дальнейшим направлением развития предложенного подхода к анализу вредоносных программ с использованием мультиклассовой классификации может быть расширение области признакового пространства с учетом поведенческих особенностей. Также представляет интерес применение подхода при анализе вредоносных программ различных таргетированных угроз АРТ (Advanced Persistent Threat) с целью их идентификации при расследовании компьютерных инцидентов.

Список используемых источников

1. Репозиторий с образцами вредоносных программ. – URL: <https://github.com/ytisf/theZoo> (дата обращения: 18.10.2020).
2. Машинное обучение. – URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/f/fc/Voron-ML-Intro-slides.pdf> (дата обращения: 18.10.2020).
3. Лекции по логическим алгоритмам классификации. – URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/3/3e/Voron-ML-Logic.pdf> (дата обращения: 18.10.2020).
4. Линейные методы классификации и регрессии: метод опорных векторов. – URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/a/a0/Voron-ML-Lin-SVM.pdf> (дата обращения: 18.10.2020).

В.А. Овчаров,
доктор технических наук;
И.А. Соловьев;
Н.А. Трофимова;
А.Ф. Шинкаренко,
кандидат технических наук

ПОДХОД К ПРОФИЛИРОВАНИЮ ПОВЕДЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТАКТИК, ТЕХНИК И ПРОЦЕДУР ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК

В статье представлен подход к построению, тестированию и уточнению поведенческих моделей нарушителя для определения перечня актуальных угроз информационной безопасности в сетевой инфраструктуре. Используемый в отношении целевой информационно-телекоммуникационной сети аналитический процесс выявления и профилирования поведения нарушителя может быть применен для выработки способов повышения ее защищенности.

Ключевые слова: моделирование действий нарушителя, поведенческая модель, профиль нарушителя, киберигры.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная система информационной безопасности (ИБ) сетевой инфраструктуры от актуальных классов угроз требует разработки новых подходов и технологий, функционирующих на всех уровнях эталонной модели ISO/OSI, для своевременного пресечения или нейтрализации действий потенциального нарушителя. В современных распределенных информационно-телекоммуникационных сетях (ИТКС), ввиду их структурной и параметрической сложности, маловероятно, что система ИБ обладает возможностями обнаружения и нейтрализации всех типов тактик, техник и процедур, которые могут использовать нарушители для получения доступа к ресурсам [1]. Тактики, техники и процедуры реализации атак, используемые нарушителями, постоянно развиваются. При этом современные многоэтапные атаки (Advanced Persistent Thread – АРТ) позволяют эффективно преодолевать технологии, основанные на статических методах обнаружения, например с использованием индикаторов компрометации (indicators of compromise, ИОС) [2, 4], а потенциальный нарушитель имеет возможность применить эксплойт нулевого дня или технику социальной инженерии, чтобы оперативно закрепиться в сети. Оказавшись внутри ИТКС, нарушитель использует различные тактики и технологии информационного обмена, эффективно маскируя вредоносную активность в легитимном сетевом трафике для достижения целей атаки [3]. Это обуславливает необходимость определения окна возможностей нарушителя, в течение которого он присутствует в скомпрометированной системе, но еще не выполнил свои задачи. С целью оперативного выявления сценария реализации нарушителем целенаправленных угроз и определения его поведения, необходимо обнаруживать вредоносные события в этом так называемом «посткомпроматном окне», анализируя информационные потоки с предположением о нарушении. Эффективная нейтрализация атак реализуется с использованием технологий выявления поведения нарушителя при получении им доступа к ИТКС.

После проникновения во внутреннюю сеть, на этапах взаимодействия с компонентами целевых узлов в указанном окне возможностей, нарушители, как правило, реализуют последовательные сценарии (операции) с использованием определенных тактик, техник и процедур (ТТР) [5]. Таким образом, возникает необходимость разработки адекватной модели

поведенческого профиля нарушителя с целью своевременного выявления вредоносного поведения на начальных этапах реализации атаки в ИТКС.

Целью данного исследования является разработка унифицированного подхода к построению методики определения и выявления поведенческого профиля нарушителя на основе используемых им тактик, техник и процедур при реализации кибератаки для последующего определения перечня актуальных угроз ИТКС и оценивания эффективности применения средств защиты информации (СЗИ) или обоснования необходимости их внедрения.

ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАРУШИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ ИМ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ КИБЕРАТАКИ

Для своевременного выявления атак, распознавания их целей и эффективной нейтрализации действий нарушителя требуется разработка базы данных всех возможных атакующих действий и переходов между ними, обеспечивающей формирование гипотез о присутствии определенной угрозы, и технологии оценивания поведения нарушителя при реализации угроз на основе алгоритма выбора соответствующего решения по предотвращению потенциально реализуемой атаки на ИТКС.

Представим классификацию элементов поведенческого профиля нарушителя [8], систематизирующую имеющуюся информацию о реализуемых им методах, которая может быть использована для моделирования его потенциальных действий. Предлагаемая классификация содержит категории высокого уровня (тактики нарушителя), отдельные методы, которые нарушители могут применять в каждой категории тактики, а также используемый ими инструментарий [5]. Тактика описывает определенные действия нарушителя и его мотивацию. Методы описывают, что он делает, а инструментарий – как он это делает. Согласно работе [6] взаимосвязь основных элементов поведенческой модели нарушителя визуализирована в виде графа, представленного на рис. 1.

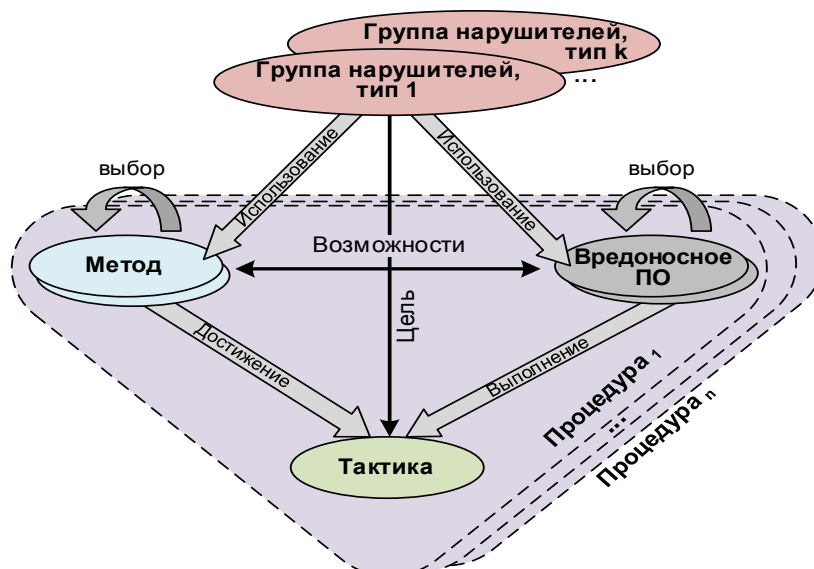


Рис. 1. Основные элементы поведенческой модели нарушителя и взаимосвязи между ними

Определим основными сущностями поведенческой модели нарушителя такие понятия, как «тактика» и «метод реализации тактики». *Тактика* представляет собой наивысший уровень абстракции модели и определяет цель нарушителя.

Каждая категория тактики характеризуется конечным числом методов. *Метод* (техника) представляет собой подход к достижению нарушителем тактической цели вне связи с конкретными вредоносными программами и инструментами.

Для систематизации используемых нарушителем методов в рамках категорий тактик разработана базовая матрица, в которой заголовки столбцов соответствуют основным этапам кибератаки (тактики), а содержимое ячеек – методам реализации (техникам) их выполнения (табл. 1).

Таблица 1

Матрица тактик и методов проведения кибератаки нарушителем

Закрепление	Повышение привилегий	Обход защиты	Получение учетных данных	Обнаружение	Боковое перемещение	Выполнение	Сбор данных	Вывод данных	Командование и управление
Поиск DLL			Перебор паролей	Обнаружение учетной записи	Удаленное управление ОС		Автоматизированный сбор	Автоматизированный вывод	Стандартно используемый порт
Законные полномочия			Сброс учетных данных	Обнаружение окна приложения	Стороннее ПО		Данные буфер обмена	Сжатие данных	Коммуникация с использованием съемных носителей
Специальные возможности		Бинарное заполнение			ПО для развертывания приложений	Командная строка	Данные этапа обработки	Зашифрованные данные	
Библиотеки		Подписание кода	Манипулирование учетными данными	Обнаружение файлов и каталогов	Эксплуатация уязвимости	Выполнение через API	Данные из локальной системы	Данные ограниченного размера	Межсетевой протокол командования и управления
Мониторинг локального порта		Компонент прошивки				Графический пользовательский интерфейс	Данные с общего диска	Экспертиза через альтернативный протокол	
Новый сервис		Боковая загрузка DLL	Учетные данные в файлах	Обнаружение локальной конфигурации сети	Логотип сценария	Powershell	Данные из съемных носителей	Экспертиза через контрольный канал	Пользовательский криптографический протокол
Перехват пути		Отключение инструментов безопасности	Захват ввода	Обнаружение локальных сетевых соединений	Передача хеша	Hollowing процесс			
Запланированная задача		Удаление файла	Сниффинг сети		Сканирование сетевого сервиса	Передача билета	Regsvcs/Regasm	Сбор электронной почты	Обфускация данных
Слабость разрешений на служебные файлы		Логические смещения файловой системы		Перехват двухфакторной аутентификации		Протокол удаленного рабочего стола	Regsvr32	Захват ввода	
Слабость разрешений на доступ к реестру		Блокировка индикатора	Обнаружение периферийных устройств		Удаленное копирование файла	Rundll32	Захват экрана	Экспертиза через физические средства	Многоступенчатые каналы
Web-оболочки				Эксплуатация уязвимости		Удаленный сервис	Запланированная задача		
Базовая система ввода/вывода		Обход управления учетными записями пользователей		Обнаружение групп разрешений	Репликация через съемный носитель	Выполнение службы	Инструмент управления Windows	Многослойное шифрование	
Бутки		DLL инъекции		Обнаружение Процесса	Общие Webroot				Измененный внешний контент
Изменение ассоциации файлов по умолчанию		Удаление индикатора из инструментов		Обнаружение Реестр запросов	Общие удаленной системы	Обнаружение безопасности	Обнаружение системной информации	Стандартный протокол уровня приложений	
Компонентная прошивка		Удаление индикатора на хосте		Обнаружение пользователей / администратора системы	Обнаружение системного сервиса				Избыточный доступ
Гипервизор		Установка утилит		Обнаружение безопасности	Обнаружение системной информации	Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm	Нестандартно используемый порт	
Сценарии входа		Маскарад							Изменение реестра
Изменение существующей службы		Изменение реестра		Вытеснение процесса	Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm	Regsvr32		
Избыточный доступ		Расширенные атрибуты NTFS						Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm
Ключи запуска реестра / стартовой папки		Запутанные файлы или информация		Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm	Regsvr32	Rundll32		
Поставщик поддержки безопасности		Вытеснение процесса						Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm
Контекстная модификация		Избыточный доступ		Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm	Regsvr32	Rundll32		
Подписывание событий для инструментов управления Windows		Regsvcs/Regasm						Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm
Winlogon Helper DLL		Rundll32		Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm	Regsvr32	Rundll32		
		Сценарии						Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm
		Упаковка ПО		Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm	Regsvr32	Rundll32		
		Временные метки						Избыточный доступ	Regsvcs/Regasm

Следует отметить, что частные реализации техник кибератак представлены *процедурами* их выполнения в соответствии с намерениями и возможностями нарушителя (в том числе определение доступного вредоносного ПО и инструментария для его реализации), поэтому используются *поведенческие (TTP) индикаторы* – показатели, определяющие способ достижения тактической цели при использовании выбранной техники. Совокупность индикаторов (последовательность выполняемых процедур) описывает процесс навигации нарушителя по сети, указывая на основную цель и в конечном итоге определяя его

поведенческий профиль [8]. В связи с этим методы необходимо рассматривать не как единичные действия при реализации целенаправленной атаки, а как элементы последовательности событий, отображающей вредоносное поведение в окне возможностей нарушителя. Следовательно, модель может быть использована для характеристики поведения конкретного нарушителя после компрометации ИТКС путем перевода общего поведения с известными действиями в индивидуальные или их комбинации, предпринимаемыми для достижения тактических целей. Преимущество модели заключается в том, что она описывает поведение нарушителя без привязки к технологиям защиты от конкретных типов вредоносного ПО и отдельным инструментам (удаленного доступа, скриптам и др.), которые могут измениться с течением времени.

Для определения перечня актуальных угроз ИТКС используются категории сведений, определяющих признаки атак как индикаторов компрометации ИОС, которая представляет собой объект, обнаруженный в сетевой инфраструктуре. Наличие такого объекта, с высокой долей вероятности, свидетельствует о планируемой или уже реализованной компьютерной атаке. В качестве указателей на вторжение используются статические объекты: хэш-суммы файлов, их имена и расположение, IP-адреса, DNS-имена серверов, URL и др.

Важным отличием методов от указателей на вторжение (ИОС) является то, что многие из методов представляются легитимными системными функциями, которые могут быть использованы нарушителем, в то время как ИОС, развернутый в качестве механизма обнаружения вторжения, является признаком действий, которые вызваны деятельностью нарушителя. Данные о каждом шаге в последовательности событий могут быть использованы для определения, являются ли они вредоносным или доброкачественным поведением, а также для построения сценария реализации нарушителем целей атаки. Аналитический процесс определения и соотнесения набора вредоносных действий в рамках формируемого профиля поведения нарушителя является важной частью современной системы защиты.

Для формирования гипотез в аналитическом процессе выявления поведения нарушителя в ИТКС необходим учет взаимосвязи событий на соответствующем узле и в анализируемой ИТКС. Технологии автоматизированного профилирования конечных точек (endpoint) и потоковая обработка данных сетевого трафика (network data) применяются для обнаружения вредоносных действий внутри сети и реализуют эффективный подход к выявлению поведения нарушителя в ИТКС.

ОРГАНИЗАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ

Разработанная поведенческая модель нарушителя является основой для формирования гипотез о присутствии определенной угрозы и построения карты предполагаемых злонамеренных действий в целевой ИТКС. Она позволяет по составу выявляемых в процессе анализа методов определять намерения и цели воздействий нарушителя.

С целью проверки выполнения гипотез в рамках построения аналитического процесса исследования поведения нарушителя после компрометации с применением теории игр различными функциональными командами требуется произвести итеративное измерение текущей способности обнаружения различных классов угроз. Для этого вводятся понятия: «Белая команда», «Красная команда» и «Синяя команда», которые исполняют в соответствии с правилами проведения «киберигр» следующие роли.

Белая команда – разработка сценариев реализации угроз для тестирования системы защиты и обеспечение достижения целей тестирования через взаимодействие с администраторами ИБ.

Красная команда – выполнение запланированных сценариев с акцентом на эмуляцию поведения нарушителя и взаимодействие с Белой командой для доведения до ее сведения состава обнаруженных уязвимостей ИТКС.

Синяя команда – выполнение действий в качестве администраторов ИБ с использованием аналитических данных, требуемых для обнаружения активности Красной команды.

Алгоритм профилирования поведения нарушителя, представленного совокупностью выбранных тактик и методов базовой матрицы, содержит семь шагов (рис. 2).

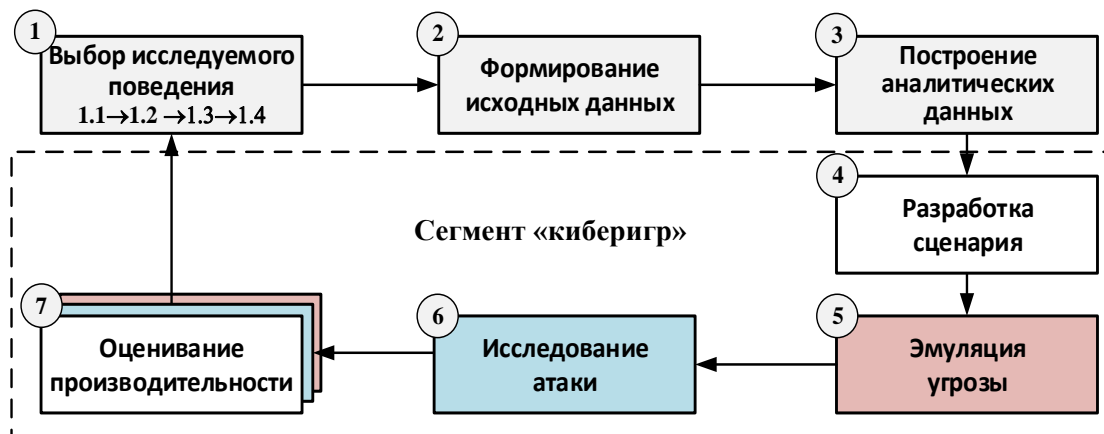


Рис. 2. Алгоритм профилирования поведения нарушителя

Шаг 1. Определение поведения – приоритизация действий нарушителей (от генерации гипотез о наличии угрозы до построения профиля нарушителя, ее реализующего).

Шаг 2. Формирование исходных данных – определение данных, необходимых для обнаружения рассматриваемого поведения нарушителя, с заданием архитектуры размещения сенсорных узлов сбора указанных данных и (или) их возможным созданием (если на текущий момент такие данные не доступны);

Шаг 3. Построение аналитических материалов – создание из собранных данных аналитических материалов для проверки гипотез в процессе идентификации поведения. Важно обеспечить, чтобы правила обнаружения рассматриваемого поведения нарушителя не приводили к неприемлемым ложноположительным срабатываниям на доброкачественные события.

Шаг 4. Разработка сценария эмуляции действий нарушителя – разработка сценария реализации поведения нарушителя, определенного в шаге 1 и основанного на базовой матрице. Сценарий включает методы, необходимые к использованию и определенные Белой командой.

Шаг 5. Эмуляция угрозы – попытка Красной команды реализовать поведенческие сценарии (разработанные на шаге 4) для достижения целей, изложенных Белой командой.

Шаг 6. Исследование атаки – попытка Синей команды воссоздать временную шкалу деятельности Красной команды с помощью данных и аналитики, разработанных в шагах 2 и 3.

Шаг 7. Оценивание производительности – взаимодействие команд для оценивания степени возможности успешного обнаружения Синей командой поведения, определенного Белой командой и смоделированного Красной командой, с использованием разработанных аналитических материалов и данных, полученных от сенсорных узлов. По результатам выполнения этапа цикл алгоритма может повторяться с возвращением к шагу 1.

Представленный алгоритм может применяться как при подготовке к тестированию сценария кибератаки, так и при построении системы защиты сетевой инфраструктуры, предоставляя инструментарий Красной и Синей командам для анализа возможности

реализации сценария поведения нарушителя в ИТКС и его обнаружения. Итогом выполнения алгоритма является *подтверждение гипотезы о возможности реализации атаки*, что в дальнейшем используется для выработки адекватных мер противодействия.

Рассмотрим итерационную последовательность действий при разработке алгоритма профилирования поведения нарушителя.

1. Выбор поведения нарушителя.

1.1. Определение наиболее распространенного поведения. Разведка потенциальных угроз позволяет информировать администратора ИБ о тактиках и методах основной матричной модели, на которых нужно сосредоточиться.

1.2. Уточнение поведения, оказывающего наибольшее негативное влияние. Необходимо учитывать, какие методы нарушителя оказывают наибольшее потенциальное негативное воздействие на ИТКС.

1.3. Выявление поведений, данные для которых легко доступны. Поведение, для которого уже имеются необходимые данные, облегчит создание соответствующей аналитики, в отличие от тех, которые требуют разработки и развертывания новых датчиков или источников данных.

1.4. Определение вредоносного поведения. Поведение, которое является результатом действий только нарушителей, а не легитимных пользователей, будет наиболее полезным для администраторов безопасности, поскольку обеспечивает малое число ложных срабатываний.

2. Формирование исходных данных. Для определения данных, необходимых для создания аналитики, важно понять, какие из них уже собираются существующими датчиками (сенсорами) и механизмами регистрации. В некоторых случаях они могут полностью выполнять требования к формируемому набору данных. Однако во многих случаях для начала сбора требуемых данных могут потребоваться настройки или разработка правил для существующих датчиков и инструментов либо для их сбора могут потребоваться новые инструменты или функции.

3. Построение аналитических материалов. Оно представляет собой процесс построения правил обнаружения рассматриваемого поведения нарушителя на основе приобретенных данных с целью проверки гипотез о наличии угрозы. Аналитические исследования, связанные с представленной матричной моделью, могут проводиться следующими способами:

– применением поведенческой аналитики для обнаружения конкретного поведения нарушителя, например создание нового Windows service (поведение отображается в разделе Методы в частной матричной модели ИТКС соответствующим индикатором – показателем активности нарушителя в рамках рассматриваемой техники);

– обеспечением ситуационной осведомленности, ориентированной на общее понимание того, что происходит в ИТКС в данный момент времени и не направленной на генерацию предупреждений о вредоносном поведении (в сочетании с поведенческими индикаторами предоставляет для них контекстуальную информацию о состоянии среды);

– проведением анализа аномалий, ориентированного на обнаружение поведения, которое не является вредоносным, но является необычным и может вызывать подозрения (обнаружение исполняемых файлов или идентификация процессов, которые ранее не запускались);

– реализацией процесса расследования и установления причинно-следственных связей между действиями нарушителя, а также их последствиями при проведении экспертизы события (например, при обнаружении на хосте использования дампера учетных данных необходимо провести анализ, выявляющий пользователей, учетные данные которых были скомпрометированы).

4. Разработка сценария эмуляции нарушителя с учетом его непрерывной адаптации к новым способам обнаружения. Также при моделировании сценария необходимо учитывать,

что большинство реальных нарушителей имеют конкретные цели, и, следовательно, действия Красной команды должны быть сосредоточены на попытках их достижения, оставаясь незамеченными [7].

С этой целью Белая команда на основании результатов выполнения предыдущих шагов аналитического процесса исследования поведения нарушителя (рис. 2) определяет возможности Красной команды адекватно протестировать угрозу и в соответствии с этим разрабатывает высокоуровневый план проведения «киберигры», включающий следующие исходные данные:

- состав и содержание аналитических и защитных (оборонительных) возможностей, которые будут протестированы;
- сценарий поведения нарушителя на уровне методов;
- первичный план выполнения Красной командой последовательности действий тестирования оборонительных возможностей Синей команды;
- сведения о системе, сети или других ресурсах, необходимых для тестирования.

В рамках первичного плана определяется сценарий эмуляции нарушителя, который должен быть достаточно подробным, определяя Красной команде направление для проверки способностей защиты, и достаточно гибким, предоставляя возможность адаптации операций для проверки вариаций поведения, не идентифицированных Синей командой. Поскольку Синяя команда в своих защитных действиях может достигнуть уровня, позволяющего обнаруживать тестируемые реализации рассматриваемых видов угроз, Красная команда должна иметь возможность выходить за пределы проводимой эмуляции, используя Белую команду для принятия решения о том, какие иные модели поведения необходимо протестировать.

Для выработки детализированного сценария в качестве навигационной карты действий Красной команды по эмуляции нарушителя осуществляется его построение на матричной поведенческой модели. Для этого из базовой матрицы исключаются методы, не имеющие отношения к тестируемой среде, а для визуализации необходимых к обнаружению методов применяется цветовое кодирование ячеек. Методы, необходимые для тестирования оборонительных возможностей Синей команды, отображаются зеленым цветом, а для более полного представления сценария эмуляции действий нарушителя методы комплексного теста по достижению цели Красной командой отображаются желтым цветом.

5. Эмуляция угрозы. Красная команда начинает реализацию угрозы, используя определенную технологию удаленного доступа к ИТКС. Организованный доступ ускоряет анализ системы ИБ ИТКС и гарантирует, что в этих условиях защита сетевой инфраструктуры будет адекватно протестирована. Поэтому тесты эмуляции нарушителя проводятся более оперативно и целенаправленно, чем тесты на проникновение. Далее Красная команда следует плану и первичному сценарию, изложенному Белой командой, а Синяя команда, в свою очередь, осуществляет контроль обнаружения активности Красной команды. С целью проверки полноты состава и расстановки дополнительных источников данных и использующей их аналитики может быть разработан следующий сценарий, учитывающий успехи и неудачи реализации предыдущего. При этом последовательность выполнения методов тестирования оборонительных возможностей Синей команды в следующем сценарии совпадает с предыдущим и отражает ту же цель тестирования с использованием тех же тактик и методов, но методы реализуются через эквиваленты и/или альтернативы выполненных ранее процедур, чтобы избежать обнаружения Синей командой (например, цветовое кодирование зеленых ячеек оранжевой границей).

Заметим, что взаимодействия команд должны проводиться асинхронно. Такой подход позволяет сосредоточиться на обнаружении нарушителя, а не на попытке помешать ему. Прекращение действий Красной команды в режиме реального времени помешало бы возможности итерационного определения нескольких способов обнаружения эмулированной угрозы. Также асинхронные действия имитируют реальную ситуацию в ИТКС, когда

защитники не получают уведомления о действиях нарушителя до тех пор, пока не произошли события.

Таким образом, процесс эмуляции реализации угрозы состоит из повторяющихся операций взаимодействий команд на уровне сценариев, обеспечивающих полноту тестирования защиты сетевой инфраструктуры путем итеративного применения в целевой среде разнообразных видов вредоносного поведения. Такие операции эмуляции техник атак и защиты позволяют на основе профилирования поведения нарушителя (рис. 1) осуществлять оценивание эффективности системы ИБ ИТКС.

6. Исследование атаки. Исследование отдельных хостов ИТКС проводится с использованием ранее описанных типов аналитики (ситуационная осведомленность и расследование).

Процесс использования результатов одной аналитики для уточнения результатов другой является итеративным и повторяется на протяжении всего исследования по мере сбора новой информации. В процессе того, как события идентифицируются принадлежащими Красной команде, формируется хронология ее действий, а пробелы в ней могут определить точки, где требуется дальнейшее исследование с предположением потенциальной деятельности.

В ходе выполнения сценария Синяя команда, расследуя атаку Красной команды, формирует следующие обобщающие категории выявляемой информации:

- вовлеченные/скомпрометированные хосты (список хостов и причин, по которым каждый объект был идентифицирован как подозрительный);
- скомпрометированные учетные записи;
- цели нарушителя (Красной команды) и данные по их достижению;
- используемые техники и уязвимости, определенные Синей командой при тестировании средств ИБ.

7. Оценивание производительности. Позволяет получить оценку успешности обнаружения соответствующих сценариев на основе всестороннего анализа результатов тестирования реализации угроз. Используется Синей командой при необходимости, в целях уточнения аналитики обнаружения или определения поведения нарушителя, для которого следует разработать (установить) новые датчики, собрать новые наборы данных и создать новую аналитику.

Итерационный подход к анализу угроз через серию «киберигр», в которых одна команда выполняет эмуляцию поведения нарушителя против другой команды, применяющей аналитический подход и учитывающей характерное для конкретного сценария сочетание событий на узле и в ИТКС в целом, обеспечивает результативное обнаружение вредоносных сценариев и построение поведенческого профиля нарушителя.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ НАРУШИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТТР-ИНДИКАТОРОВ

Современные подходы к обеспечению ИБ имеют многочисленные проблемы с обнаружением целенаправленных компьютерных атак. Большинство программно-технических средств ИБ не позволяет обнаружить применяемые нарушителем инструменты, а индикаторы компрометации защищенной инфраструктуры могут меняться очень быстро. Анализ сетевого трафика также не эффективен ввиду его шифрования в большинстве ситуаций. Таким образом, инвентаризация инструментов, применяемых нарушителем для реализации угрозы, должна проводиться чаще, чем инвентаризация используемых им методов. Предложенный подход к обнаружению вредоносной активности и построению поведенческого профиля нарушителя на основе ТТР-индикаторов позволяет проследить связь между целями и средствами атаки, определить состав необходимых и достаточных мер для парирования актуальных угроз (АРТ). Примеры взаимосвязи способов обнаружения возможных действий

нарушителя на уровне индикаторов компрометации (ИОС), инструментов (ПО) и поведенческих ТТР-индикаторов, характеризующих выполняемые им процедуры, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Примеры взаимосвязи способов обнаружения возможных действий нарушителя

Возможные действия нарушителя	Определение на уровне ИОС-индикаторов	Определение на уровне инструментов	Определение на уровне ТТР-индикаторов
Использование ПО Mimikatz или аналогичных инструментов для сброса учетных данных из памяти	Поиск хэшей (MD5, SHA1, SHA256) исполняемых файлов Mimikatz и других подобных инструментов	Поиск файлов с определенными именами (расширениями), созданных Mimikatz и другими подобными инструментами. Например, Mimikatz экспортирует сброшенные билеты Kerberos в файлы .kirbiextension и WCE сбрасывает DLL с предопределенным именем в wseaux.dll	Поиск процессов, которые имеют доступ в lsass.exe память или инжектировали код в lsass.exe память. Поиск неподписанных библиотек DLL, загруженных в lsass.exe
Использование PsExec/WinExec или аналогичных инструментов для удаленного выполнения и бокового перемещения	Поиск хэшей (MD5, SHA1, SHA256) исполняемых файлов PsExec/WinExec и других подобных инструментов	Поиск установки служб с известными именами (PsExec устанавливает службу с именем PSEXESVC, WinExec устанавливает службу с WINEXESVC)	Поиск удаленно установленных служб, порождающих различные процессы
Использование внешних серверов для получения обратных подключений от скомпрометированных хостов, так как вредоносному ПО необходимо взаимодействовать с центром командования и управления	Поиск связи с определенными доменами или IP-адресами, которые помечены как ИОС или «плохие» домены	Поиск специфичных User-Agent, связей с доменами, генерируемыми определенным алгоритмом (фреймворком)	Поиск соединений с периодичностью. Поиск связей со случайно генерируемыми доменами. Поиск связей с недавно зарегистрированными доменами

Исходя из вышесказанного при разработке эффективного механизма обнаружения сетевых угроз на основе моделирования поведения и построения профиля нарушителя необходимо руководствоваться приведенными ниже принципами.

1. Включение в систему ИБ технологий обнаружения реализации угрозы после компрометации нарушителем компонентов сети. Система ИБ должна учитывать действия

нарушителя после проникновения в защищаемую ИТКС, чтобы свести к минимуму ущерб, причиненный им в случае успеха. Возможности обнаружения реализации нарушителями угроз после компрометации компонентов сети необходимы, когда они обходят установленную защиту с использованием новых средств для проникновения в ИТКС.

2. Анализ поведения нарушителя. Технологии поведенческого анализа позволяют определить сценарии (последовательности действий), которые с высокой вероятностью будут выполняться многими группами нарушителей при реализации угрозы и являются постоянной составляющей их профиля, не зависящей от изменений состава применяемых инструментов и индикаторов компрометации. Такой подход эффективен в условиях попыток нарушителя избежать выявления своих действий.

3. Использование модели угроз на основе ТТР. Масштабируемая и актуальная модель тактик, техник и процедур реализации угроз необходима для обеспечения эффективности обнаружения реального поведения нарушителя. Такая модель, учитывающая действия и намерения нарушителя, позволяет аналитикам формировать профиль нарушителя, находя реляционные связи между его инструментами и методами, классифицировать нарушителей в группы по их типовым поведенческим профилям, а администраторам ИБ адекватно оценивать эксплуатируемую систему защиты.

4. Итеративное развитие модели угроз. Совершенствование моделей угроз, способов и инструментов ИБ с учетом изменения поведения нарушителя обеспечивает способность системы защиты адаптироваться к изменяющемуся составу угроз и их характеристикам. Оперативная обратная связь при итеративном подходе предоставляет субъектам анализа возможности проверки гипотез о том, как эффективно обнаруживать поведение нарушителя в ИТКС.

5. Анализ реализации угроз с учетом реалистичной среды. Создание, оценивание и пересмотр аналитического процесса исследования поведения нарушителя должны выполняться в соответствии с реальными сценариями функционирования ИТКС.

Таким образом, рассматриваемый подход к определению поведенческого профиля нарушителя на основе ТТР-индикаторов обеспечивает разработку метода оценивания угроз информационной безопасности ИТКС, представленного на рис. 3.

Этап определения негативных последствий включает в себя определение исходных данных согласно имеющейся документации с целью первоначальной оценки состояния системного и прикладного ПО на сетевых объектах (узлах) системы по формальным признакам. Полученные данные становятся основой для первоначальной экспертной оценки негативных последствий, возникших в результате реализации возможных угроз, и оценки потенциального ущерба при реализации этих угроз.

На этапе определения объектов воздействий осуществляется инвентаризация ИТКС с целью накопления исходных данных для оценивания технического состояния объектов информационной инфраструктуры и их отдельных элементов. Эти данные позволяют определить и выделить группы потенциальных нарушителей и возможные применяемые технологии и программно-технические средства ИБ.

На основе выявленных источников угроз формируется качественная оценка способов их реализации и актуальности. А последующее профилирование нарушителя при использовании разработанного алгоритма позволяет сформировать базу данных возможных сценариев проведения целенаправленных воздействий. Такой подход обеспечит эффективное проведение обнаружения вредоносных сценариев и построение поведенческого профиля нарушителя.

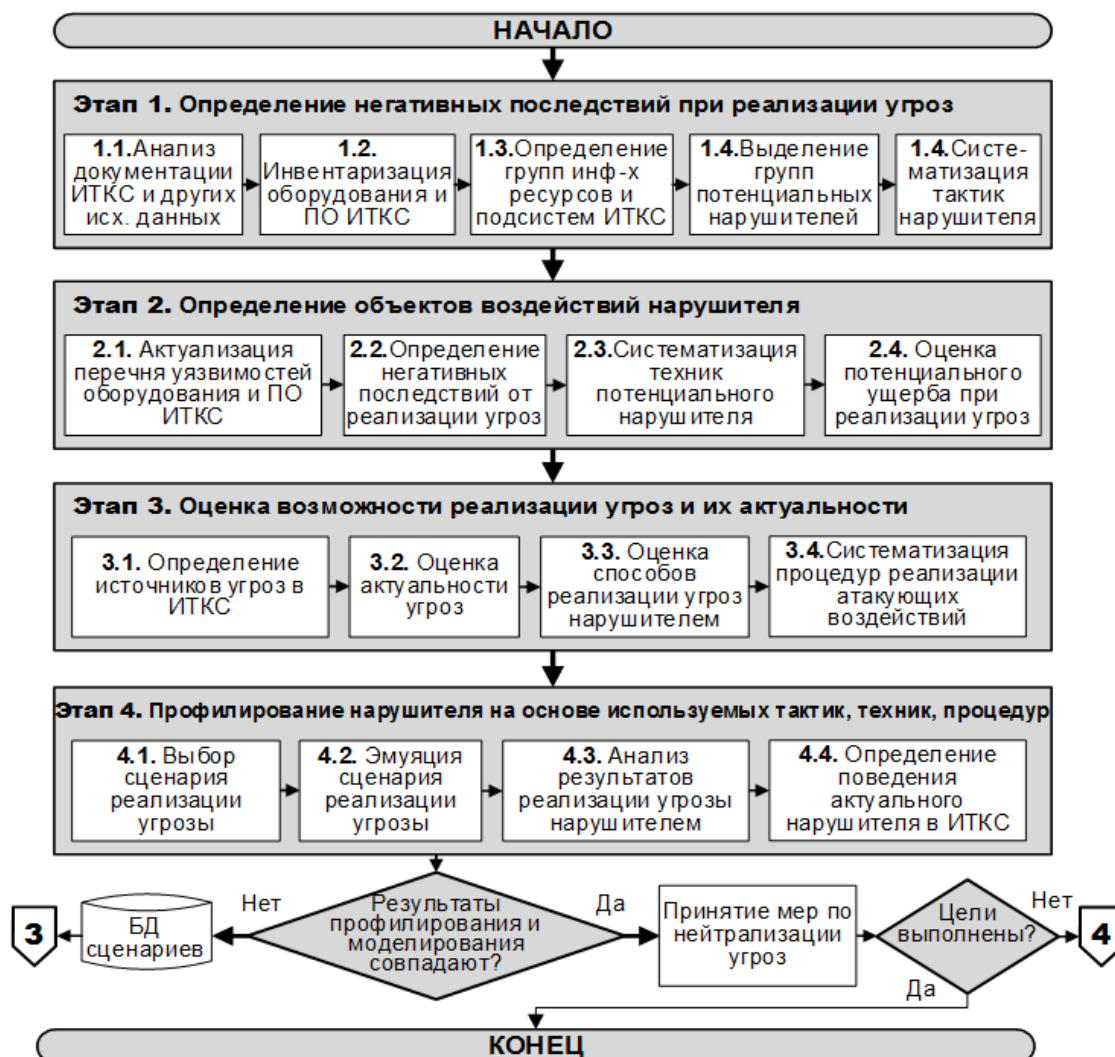


Рис. 3. Метод оценивания угроз информационной безопасности ИТКС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сложности и многоэтапности современных целенаправленных кибератак на объекты ИТКС предъявляются повышенные требования к возможностям средств защиты. Процесс формирования аналитических данных при построении системы моделирования актуальных угроз на основе профилирования поведения нарушителя является необходимым инструментом для администраторов ИБ, который можно использовать для создания и поддержания возможностей обнаружения этих классов угроз.

Предлагаемый подход к обнаружению реализации угроз на уровне выполняемых нарушителем тактик, техник и процедур устойчив к попыткам избежать выявления путем изменений индикаторов компрометации и является более эффективным по сравнению с существующими корреляционными/индикаторными подходами к ИБ.

Организация ИБ в ИТКС на основе представленного подхода позволит определить, к каким техникам нарушителя уязвимы ресурсы защищаемой инфраструктуры, устанавливать, в какой фазе развития находится атака, где искать следы реализации угрозы и какие меры по противодействию ей необходимо предпринять в первую очередь.

Построение типового поведенческого профиля нарушителя с использованием разработанного подхода в дальнейшем предоставит возможность определять вероятного исполнителя, а также отслеживать эволюцию тактик и методов, которые применяют известные АРТ-группировки.

Список используемых источников

1. FireEye, «M-Trends 2021». – URL: <https://www2.fireeye.com/rs/848-DID-242/images/Mtrends2021.pdf> (дата обращения: 19.03.2021).
2. Технология выявления скоординированного горизонтального сканирования объектов мониторируемой сетевой инфраструктуры с использованием жадных алгоритмов / В.А. Овчаров [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки: журн. – 2018. – № 7. – С. 457–469.
3. SecureWorks. Living Off the Land. – May 2015. – URL: <https://www.secureworks.com/blog/living-off-the-land> (дата обращения: 19.03.2021).
4. Подход к оцениванию защищенности объектов коммуникации на основе моделей функционирования веб-приложений / В.А. Овчаров [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 672. – С. 176–187.
5. The MITRE Corporation. Cyber Analytics Repository. – April 2021. – URL: https://car.mitre.org/wiki/Main_Page (дата обращения: 19.03.2021).
6. Соловьев И.А., Соловьева М.В., Трофимова Н.А. Контроль состояния информационной безопасности на основе моделирования деструктивной деятельности нарушителя // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 677. – С. 169–179.
7. *Mudg R.* Adversary Simulation Becomes a Thing... – November 2014. – URL: <http://blog.cobaltstrike.com/2014/11/12/adversary-simulation-becomes-a-thing/> (дата обращения: 19.03.2021).
8. Овчаров В.А. Моделирование субъектно-объектного взаимодействия в сетевых инфраструктурах // Труды СПИИРАН. – 2015. – Т. 39, № 0. – С. 42–61.

Д.Р. Абсалямов,
доктор технических наук, доцент;
В.И. Сеньченков,
доктор технических наук, профессор

ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Представляются методические и математические схемы формирования множества информативных (контролируемых) параметров специальных технических систем ракетно-космических комплексов при интервальном контроле состояния. Содержание схем заключается в обработке траекторий выходных параметров системы с привлечением теории ортогональных преобразований. Обоснован выбор контролируемых параметров как упорядоченного множества коэффициентов разложения траекторий в частичные суммы ряда Фурье на основе ортогональных алгебраических базисов.

Предлагается подход к аппроксимации траекторий частичными суммами ряда Фурье с применением ортогонального базиса Лежандра, который подвергнут модификации для использования при любых временных интервалах контроля технического состояния. Разработан усовершенствованный способ определения мощности множества контролируемых параметров. Предъявляется численная процедура поиска значений контролируемых параметров при разложении траекторий, аналитический вид которых неизвестен.

Показаны результаты обработки траектории одной из физических величин, характеризующих функционирование специальных технических систем, и задание на указанной основе множества контролируемых параметров.

Ключевые слова: интервальный контроль технического состояния, частичные суммы ряда Фурье – Лежандра, ортогональный алгебраический базис, среднеквадратичная сходимость.

ВВЕДЕНИЕ

Вывод на новые рубежи процессов эксплуатации ракетно-космических комплексов (РКК) предполагает разработку и внедрение методических подходов и аппаратных средств получения объективных данных о техническом состоянии систем, входящих в указанные комплексы. Так, функционирование специальных технических систем (СТС) характеризуется сложными процессами материального и энергетического обмена между отдельными подсистемами. Во избежание сбоев в данных процессах и отказов оборудования необходим контроль технического состояния не только в отдельные моменты времени (точечный контроль), но и в течение определенных временных интервалов (интервальный контроль).

При интервальном контроле регистрируются траектории физических величин, которые определяют процессы функционирования СТС. Под траекторией f понимается множество значений какой-либо переменной на временном интервале T . Изменение технического состояния системы сопровождается изменением траекторий. Пусть каждая траектория представляется в виде упорядоченного набора (или вектора)

$$\mathbf{Y}_{(n)} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \quad (1)$$

числовых характеристик, которые однозначно описывают ее поведение на множестве T . В этом случае координаты y_j , $j = \overline{1, n}$ вектора (1) могут выступать в качестве информативных или контролируемых параметров системы. В настоящее время предлагается обширный научный материал по заданию векторов вида (1).

В исследованиях [1–3] преобразование базируется на теории случайных процессов. Находятся оценки числовых характеристик траекторий как случайных функций – математическое

ожидание, дисперсия, асимметрия, эксцесс, другие начальные или центральные моменты. Из полученных характеристик формируется искомый вектор (1).

В работах [4, 5] предполагается, что траектории удовлетворяют условиям теоремы Липшица [6]. Данные условия сводятся к тому, что траектория должна быть непрерывной и, кроме того, иметь ограниченную скорость изменения на интервале T . Такой случай характерен для инерционных параметров, например: температуры теплоносителя или подшипников в сопрягающихся узлах изделия, уровня жидкой среды. Выбор по определенным правилам множества дискретных значений траектории позволяет сформировать конечномерный вектор.

Также предлагаются методы на основе аналого-стохастического квантования [7], в результате которого траектория задается в виде цифрового кода. Такой код является основой для получения координат вектора (1).

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО БАЗИСА ЛЕЖАНДРА ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ В ЧАСТИЧНЫЕ СУММЫ РЯДА ФУРЬЕ

Отсутствие методологического единства в схемах, которые используются для задания множества контролируемых параметров системы, может сопровождаться трудностями в построении моделей диагностирования и интерпретации результатов исследований. Для преодоления указанных трудностей преобразование различных выходных процессов СТС должно опираться на общую теоретическую базу.

В работах [8, 9] развивается подход, который базируется на разложении траекторий в частичные суммы рядов Фурье по различным ортогональным базисам. Коэффициенты разложения позволяют иметь сведения обо всех особенностях траектории на множестве T , так как вычисляются однозначно. По этой причине в данных коэффициентах аккумулирована информация о техническом состоянии системы, и они могут применяться в качестве контролируемых параметров.

Пусть $\{\varphi_k / k = 0, 1, 2, \dots\}$ – произвольный ортогональный базис с областью ортогональности T . Временной интервал T в данном случае следует трактовать как подмножество в множестве вещественных чисел \mathbf{R} ($T \subset \mathbf{R}$). Тогда частичная сумма порядка m ряда Фурье для траектории f определяется выражением

$$S^m = \sum_{k=0}^m c_k \varphi_k . \quad (2)$$

Коэффициенты Фурье в частичной сумме (2) находятся как

$$c_k = \frac{1}{\|\varphi_k\|^2} \int_T f(t) \varphi_k(t) dt , \quad (3)$$

где $\|\varphi_k\|$ – норма k -й базисной функции.

Для дальнейших рассуждений важно заметить, что квадрат нормированного значения базисной функции – это скалярное произведение данной функции на себя [10]:

$$\|\varphi_k\|^2 = (\varphi_k, \varphi_k) = \int_T \varphi_k^2(t) dt . \quad (4)$$

Сходимость ряда Фурье к траектории задается условием

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbf{N} : \left\| f - \sum_{k=0}^m c_k \varphi_k \right\|^2 < \varepsilon , \quad m > N , \quad (5)$$

где \mathbf{N} – множество натуральных чисел.

Условие (5) определяет среднеквадратичную сходимость, которая предоставляет возможность отслеживать поведение траектории не в фиксированных точках или в рамках локальных отрезков, а на всем интервале времени T . Указанный факт делает предпочтительным использование такого типа сходимости перед другими – поточечной или равномерной сходимостью.

Возникает вопрос: какой ортогональный базис из перечня общеизвестных тригонометрических и алгебраических базисов наиболее рационально применять при формировании множества контролируемых параметров. Данный вопрос связан с особенностями траектории. Тригонометрические базисы позволяют точно учитывать периодическую составляющую, поэтому они имеют преимущество при обработке траекторий вибрационных или акустических процессов, когда система включает инерционные массы с вращательным и (или) возвратно-поступательным движением. Данный случай рассматривается в работе [9].

При отсутствии или неявной выраженности периодической составляющей необходимо использовать алгебраические базисы, частичные суммы которых обеспечивают более гибкое приближение к траекториям с данной особенностью. К числу алгебраических относится базис Лежандра. Применение указанного базиса для разложения функции в частичные суммы ряда Фурье основывается на предположении, что область ее определения является ограниченным множеством. Очевидно, что временной интервал T относится именно к таким множествам, поскольку он совпадает с продолжительностью регистрации траектории в контрольной точке системы.

Областью ортогональности классического базиса Лежандра

$$L_k(x), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

является интервал $[-1; 1]$. В выражении (6) аргумент x – некоторая абстрактная переменная, которой не придается какого-либо физического смысла. Для вывода элементов такого базиса (базисных функций) используется формула Родрига [11]:

$$L_k(x) = \frac{1}{k! \cdot 2^k} \frac{d^k}{dx^k} [(x^2 - 1)^k], \quad (7)$$

где $\frac{d^k}{dx^k} [\cdot]$ – производная k -го порядка по переменной x ;

$k!$ – факториал числа k ($k! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot k$, $0! = 1$).

Например, из соотношения (7) вытекает:

$$\begin{aligned} L_3(x) &= \frac{1}{3! \cdot 2^3} \frac{d^3}{dx^3} [(x^2 - 1)^3] = \frac{1}{6 \cdot 8} \frac{d^2}{dx^2} \left[3(x^2 - 1)^2 \cdot \frac{d}{dx} (x^2 - 1) \right] = \frac{6}{48} \frac{d^2}{dx^2} [(x^2 - 1)^2 \cdot x] = \\ &= \frac{1}{8} \frac{d}{dx} \left[\frac{d}{dx} (x^2 - 1)^2 \cdot x + (x^2 - 1)^2 \cdot \frac{d}{dx} (x) \right] = \frac{1}{8} \frac{d}{dx} (4x^4 - 4x^2 + x^4 - 2x^2 + 1) = \\ &= \frac{1}{8} \frac{d}{dx} (5x^4 - 6x^2 + 1) = \frac{1}{8} (20x^3 - 12x) = \frac{1}{2} (5x^3 - 3x). \end{aligned}$$

Аналогично выводятся другие элементы рассматриваемого базиса. Явные выражения первых восьми базисных функций имеют вид:

$$L_0(x) = 1; \quad L_1(x) = x; \quad L_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1); \quad L_3(x) = \frac{1}{2}(5x^3 - 3x);$$

$$L_4(x) = \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3); \quad L_5(x) = \frac{1}{8}(63x^5 - 70x^3 + 15x); \quad (8)$$

$$L_6(x) = \frac{1}{16}(231x^6 - 315x^4 + 105x^2 - 5); \quad L_7(x) = \frac{1}{16}(429x^7 - 693x^5 + 315x^3 - 35x).$$

Ортогональность на интервале $[-1; 1]$ означает [10], что попарные скалярные произведения различных элементов классического базиса Лежандра равны 0, а квадрат нормированного значения элемента [см. (4)] составляет $2/(2k+1)$:

$$(L_k, L_s) = \int_{-1}^1 L_k(x)L_s(x)dx = \begin{cases} 0, & k \neq s; \\ \frac{2}{2k+1}, & k = s. \end{cases} \quad (9)$$

Учитывая формулы (4) и (9), выражение (3) для определения коэффициентов Фурье в случае использования базиса Лежандра принимает облик

$$c_k = \frac{2k+1}{2} \int_{-1}^1 f(x)L_k(x)dx. \quad (10)$$

Для того чтобы выполнять разложение траекторий выходных переменных СТС в частичные суммы ряда Фурье по базису Лежандра (ряд Фурье – Лежандра), необходим инструмент для задания требуемой области ортогональности. Очевидно, что регистрация траектории на интервале T означает, что он имеет левую t_0 и правую t_r границы на оси времени (начальный и конечный моменты регистрации):

$$T = t_r - t_0, \quad t_r > t_0, \quad t_0 \geq 0. \quad (11)$$

С целью получения требуемой области ортогональности базиса Лежандра предлагается следующее линейное преобразование:

$$t = \frac{t_r + t_0}{2} + \frac{t_r - t_0}{2}x, \quad (12)$$

где t – переменная, имеющая смысл текущего времени, $t_0 \leq t \leq t_r$.

Действительно, новая переменная t изменяется на интервале $[t_0; t_r]$ при изменении переменной x на $[-1; 1]$. Справедливость данного утверждения видна из подстановки граничных значений x в равенство (12):

$$\frac{t_r + t_0}{2} + \frac{t_r - t_0}{2}(-1) = \frac{1}{2}(t_r + t_0 - t_r + t_0) = t_0; \quad \frac{t_r + t_0}{2} + \frac{t_r - t_0}{2} \cdot 1 = \frac{1}{2}(t_r + t_0 + t_r - t_0) = t_r.$$

Таким образом, переменная x классического базиса Лежандра выражается через текущее время t формулой

$$x = \frac{t - \frac{1}{2}(t_r + t_0)}{\frac{1}{2}(t_r - t_0)} = \frac{2t - t_0 - t_r}{t_r - t_0}, \quad (13)$$

что непосредственно следует из выражения (12).

В дальнейшем базис, ортогональный на произвольном интервале $[t_0; t_r]$, называется модифицированным базисом Лежандра. Начальные элементы модифицированного базиса формируются путем подстановки правой части (13) в выражения (8), которые входят в классический базис:

$$\begin{aligned} L_0(t) &= 1; \quad L_1(t) = \frac{2t - t_0 - t_r}{t_r - t_0}; \quad L_2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{3(2t - t_0 - t_r)^2}{(t_r - t_0)^2} - 1 \right); \\ L_3(t) &= \frac{1}{2} \left(\frac{5(2t - t_0 - t_r)^3}{(t_r - t_0)^3} - \frac{3(2t - t_0 - t_r)}{t_r - t_0} \right); \quad L_4(t) = \frac{1}{8} \left(\frac{35(2t - t_0 - t_r)^4}{(t_r - t_0)^4} - \frac{30(2t - t_0 - t_r)^2}{(t_r - t_0)^2} + 3 \right); \\ L_5(t) &= \frac{1}{8} \left(\frac{63(2t - t_0 - t_r)^5}{(t_r - t_0)^5} - \frac{70(2t - t_0 - t_r)^3}{(t_r - t_0)^3} + \frac{15(2t - t_0 - t_r)}{t_r - t_0} \right); \end{aligned} \quad (14)$$

$$L_6(t) = \frac{1}{16} \left(\frac{231(2t-t_0-t_r)^6}{(t_r-t_0)^6} - \frac{315(2t-t_0-t_r)^4}{(t_r-t_0)^4} + \frac{105(2t-t_0-t_r)^2}{(t_r-t_0)^2} - 5 \right);$$

$$L_7(t) = \frac{1}{16} \left(\frac{429(2t-t_0-t_r)^7}{(t_r-t_0)^7} - \frac{693(2t-t_0-t_r)^5}{(t_r-t_0)^5} + \frac{315(2t-t_0-t_r)^3}{(t_r-t_0)^3} - \frac{35(2t-t_0-t_r)}{t_r-t_0} \right).$$

Условие вида (9) для модифицированного базиса Лежандра проверяется вычислением попарных скалярных произведений его элементов (14), например:

$$(L_1, L_1) = \int_{t_0}^{t_r} \left(\frac{2t-t_0-t_r}{t_r-t_0} \right) \left(\frac{2t-t_0-t_r}{t_r-t_0} \right) dt = \frac{1}{(t_r-t_0)^2} \int_{t_0}^{t_r} (2t-(t_0+t_r))^2 dt =$$

$$= \frac{1}{(t_r-t_0)^2} \int_{t_0}^{t_r} (4t^2 - 4t(t_0+t_r) + (t_0+t_r)^2) dt = \frac{1}{(t_r-t_0)^2} \left(\frac{4}{3}t^3 - \frac{4}{2}(t_0+t_r)t^2 + (t_0+t_r)^2t \right) \Big|_{t_0}^{t_r} =$$

$$= \frac{1}{(t_r-t_0)^2} \left(\frac{4}{3}(t_r^3-t_0^3) - 2(t_0+t_r)(t_r^2-t_0^2) + (t_0+t_r)^2(t_r-t_0) \right) =$$

$$= \frac{t_r-t_0}{(t_r-t_0)^2} \left(\frac{4}{3}(t_r^2+t_0t_r+t_0^2) - (t_0+t_r)^2 \right) = \frac{1}{t_r-t_0} \left(\frac{4}{3}t_r^2 + \frac{4}{3}t_0t_r + \frac{4}{3}t_0^2 - t_0^2 - 2t_0t_r - t_r^2 \right) =$$

$$= \frac{1}{3(t_r-t_0)} (t_r^2 - 2t_0t_r + t_0^2) = \frac{(t_r-t_0)^2}{3(t_r-t_0)} = \frac{1}{3}(t_r-t_0).$$

Аналогично находим:

$$(L_0, L_0) = t_r - t_0; (L_2, L_2) = \frac{1}{5}(t_r - t_0); (L_3, L_3) = \frac{1}{7}(t_r - t_0); (L_4, L_4) = \frac{1}{9}(t_r - t_0); (L_5, L_5) = \frac{1}{11}(t_r - t_0);$$

$$(L_6, L_6) = \frac{1}{13}(t_r - t_0); (L_7, L_7) = \frac{1}{15}(t_r - t_0); (L_k, L_s) = 0, k = \overline{0, 7}, s = \overline{0, 7}, k \neq s.$$

Из полученных результатов просматривается закономерность, которую можно записать как

$$(L_k, L_s) = \int_{t_0}^{t_r} L_k(t)L_s(t)dt = \begin{cases} 0, & k \neq s; \\ \frac{t_r-t_0}{2k+1}, & k = s. \end{cases} \quad (15)$$

Выражение (15) есть аналог (9) применительно к модифицированному базису. Следовательно, соотношение (10) трансформируется с учетом (15) и обретает вид

$$c_k = \frac{2k+1}{t_r-t_0} \int_{t_0}^{t_r} f(t)L_k(t)dt. \quad (16)$$

Далее величины (16) называются коэффициентами Фурье – Лежандра, а частичная сумма порядка m ряда с таким же названием будет фиксироваться равенством

$$S^m = \sum_{k=0}^m c_k L_k \quad (17)$$

по аналогии с выражением (2).

Необходимо определить мощность множества слагаемых, которые должны быть включены в частичную сумму (17) для обеспечения требуемой результативности контроля технического состояния СТС.

В рамках настоящей статьи рассматривается усовершенствованный по сравнению с начальными разработками [12, 13] способ численной оценки качества приближения траекторий частичными суммами ряда Фурье.

Пусть

$$\sum_{k=0}^{m-1} c_k L_k, \sum_{k=0}^m c_k L_k, \sum_{k=0}^{m+1} c_k L_k \quad (18)$$

– три частичные суммы вида (17), порядок которых отличается на единицу при переходе от предыдущей суммы к последующей и наоборот. Для сравнения отклонений смежных частичных сумм (т. е. предыдущего и последующего порядка) от траектории предлагаются величины:

$$\delta_{m-1,m} = \left| \frac{\left\| f - \sum_{k=0}^{m-1} c_k L_k \right\|^2 - \left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2}{\left\| f - \sum_{k=0}^{m-1} c_k L_k \right\|^2} \right| \cdot 100; \quad \delta_{m,m+1} = \left| \frac{\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 - \left\| f - \sum_{k=0}^{m+1} c_k L_k \right\|^2}{\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2} \right| \cdot 100. \quad (19)$$

Относительные величины (19) показывают, насколько процентов отличаются отклонения смежных частичных сумм от траектории. Затем формируется двухкомпонентное условие

$$\delta_{m-1,m} \leq \delta \ \& \ \delta_{m,m+1} \leq \delta, \quad (20)$$

которое заключается в том, что два последних неравенства выполняются одновременно.

В выражении (20) величина δ – максимально допустимое относительное отклонение, которое задается предварительно при решении конкретной задачи. В общем случае δ целесообразно принимать сопоставимой с метрологическими и методическими погрешностями регистрации траектории на исследуемой системе [14].

Если при разложении траектории условие (20) выполняется, то в качестве контролируемых параметров принимаются коэффициенты Фурье-Лежандра из частичной суммы:

– порядка $m+1$, если имеет место неравенство

$$\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 > \left\| f - \sum_{k=0}^{m+1} c_k L_k \right\|^2;$$

– порядка m при обратном неравенстве

$$\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 \leq \left\| f - \sum_{k=0}^{m+1} c_k L_k \right\|^2. \quad (21)$$

В случае, когда справедлива формула (21), переход к частичной сумме порядка $m+1$ нецелесообразен, это означало бы увеличение погрешностей вычислений из-за повышения размерности математических конструкций. Тем самым снижается качество аппроксимации.

При невыполнении условий (20) количество слагаемых в частичных суммах (18) последовательно увеличивается на единицу, и при очередном увеличении проверяется данное условие. Как только частичные суммы (18) начинают удовлетворять неравенствам (20), процесс удлинения сумм заканчивается. Это указывает, что найдено множество контролируемых параметров в соответствующей контрольной точке. В коэффициентах Фурье – Лежандра, не попадающих в данное множество, сосредоточены пренебрежимо малые сведения о поведении траектории на множестве T .

В более ранних версиях предложенного способа [12, 13] сравнивались две смежные частичные суммы вида (17) и проверялось одно из неравенств, входящих в условие (20). Дальнейший опыт разработки и применения математического обеспечения контроля технического состояния СТС свидетельствует о наличии ситуаций, когда неравенство

$$\delta_{m-1,m} \leq \delta \quad (22)$$

выполняется, а при последующем увеличении порядка частичной суммы на единицу положение меняется:

$$\delta_{m,m+1} > \delta. \quad (23)$$

Если сформировать множество контролируемых параметров только на основании (22), оно не в полной мере отражает поведение траектории на интервале (11). Это в конечном счете может отрицательно сказываться на достоверности контроля технического состояния СТС. Пример преобразования траектории давления воздуха, который приводится ниже, показывает такую ситуацию.

ЧИСЛЕННАЯ ПРОЦЕДУРА ПОИСКА ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Траектории физических величин обычно претерпевают сложные изменения на временном интервале (11), им невозможно придать аналитический вид. Поэтому требуется формировать приближенные соотношения при обработке траекторий, которые базируются на методах теории вычислительных процессов [15].

Для отыскания интегралов, входящих в (16), может использоваться либо формула Симпсона, либо формула трапеций. В последнем случае выражения имеют более простую структуру, но в то же время необходимая точность вычислений обеспечивается. По этой причине дальнейшие рассуждения основываются на применении формулы трапеций, которая адаптируется к рассматриваемой задаче в форме

$$\int_{t_0}^{t_r} f(t)L_k(t)dt \approx \frac{t_r - t_0}{r} \left(\frac{f(t_0)L_k(t_0) + f(t_r)L_k(t_r)}{2} + f(t_1)L_k(t_1) + f(t_2)L_k(t_2) + \dots + f(t_{r-1})L_k(t_{r-1}) \right). \quad (24)$$

Здесь введены следующие обозначения: $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{r-1} < t_r$ – упорядоченные по возрастанию моменты времени на интервале (11), а $f(t_0), f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_{r-1}), f(t_r)$ – значения траектории в указанные моменты, а r – мощность множества отрезков между моментами времени.

Из выражений (16) и (24) следует, что коэффициенты Фурье – Лежандра находятся по формуле

$$c_k = \frac{2k+1}{r} \left(\frac{f(t_0)L_k(t_0) + f(t_r)L_k(t_r)}{2} + \sum_{l=1}^{r-1} f(t_l)L_k(t_l) \right). \quad (25)$$

С учетом выражения (17) значения частичной суммы порядка m ряда Фурье – Лежандра в граничных точках временных отрезков находятся из соотношения

$$S_l^m = \sum_{k=0}^m c_k L_k(t_l), \quad l = \overline{0, r}. \quad (26)$$

Предполагая среднеквадратичную сходимость [см. (5)], отклонение частичной суммы (17) от траектории определяется выражением

$$\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 = \sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2. \quad (27)$$

Из выражения (27) вытекает, что относительные величины (19) принимают вид:

$$\delta_{m-1,m} = \left| \frac{\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^{m-1})^2 - \sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2}{\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^{m-1})^2} \right| \cdot 100; \quad (28)$$

$$\delta_{m,m+1} = \left| \frac{\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2 - \sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^{m+1})^2}{\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2} \right| \cdot 100.$$

ОБРАБОТКА МАССИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В компрессорном ресивере системы холодоснабжения зарегистрирована траектория давления P воздуха на интервале времени 4 мин (рис. 1). На основе разложения данной траектории в частичные суммы ряда Фурье – Лежандра необходимо получить множество контролируемых параметров системы. Максимально допустимое относительное отклонение δ в условии (20) принимается равным 10%.

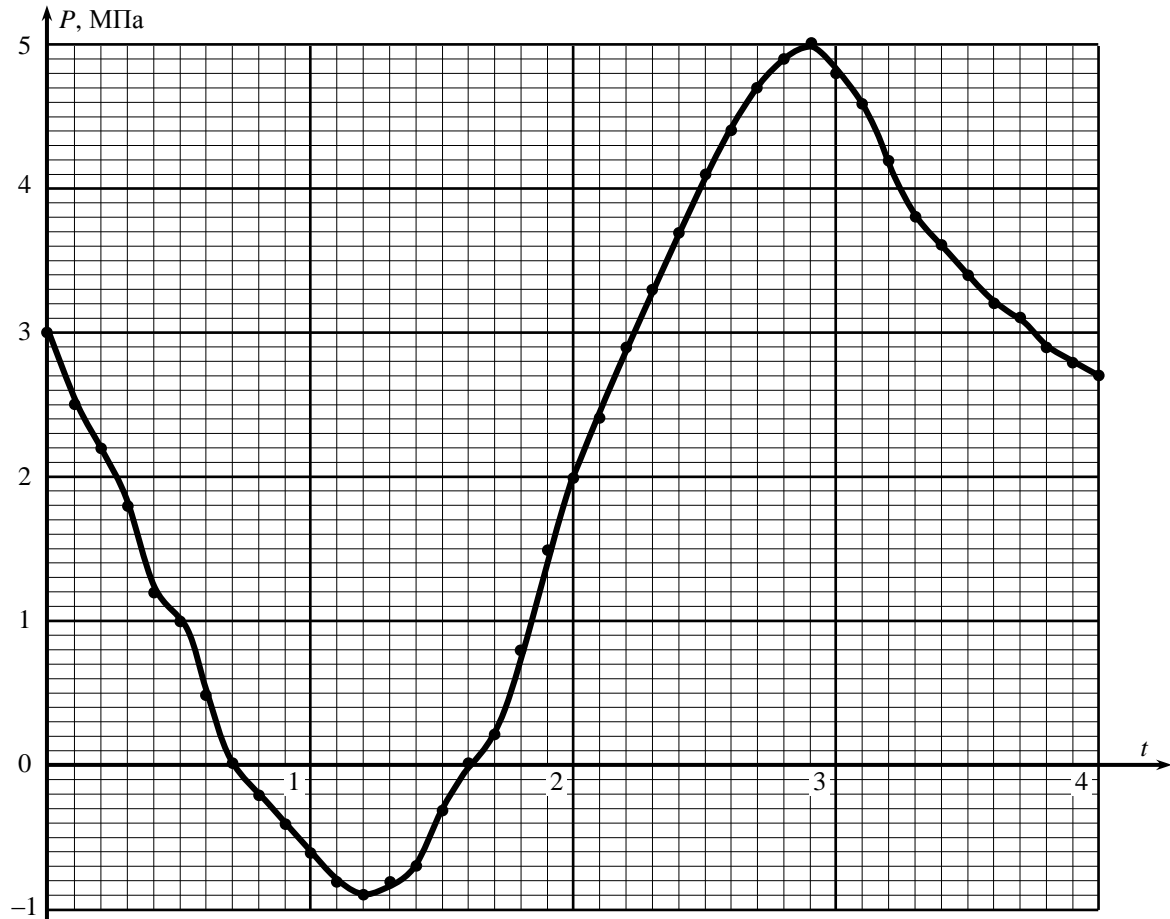


Рис. 1. Траектория давления воздуха

Если считать начальный момент регистрации как ноль на оси времени, то областью определения данной траектории является интервал вида (11)

$$T = t_r - t_0 = 4 - 0 = 4. \quad (29)$$

С целью охвата всех характерных значений траектории мощность множества временных отрезков на интервале (29) принимается равной 40 ($r = 40$). Выражение (25) для вычисления коэффициентов Фурье – Лежандра в данном случае приобретает следующий облик:

$$c_k = \frac{2k+1}{40} \left(\frac{P(t_0)L_k(t_0) + P(t_{40})L_k(t_{40})}{2} + \sum_{l=1}^{39} P(t_l)L_k(t_l) \right). \quad (30)$$

Границы выделенных временных отрезков и значения P_l давления в граничных точках показаны в табл. 1. Значения P_l сняты непосредственно с траектории (рис. 1).

Сведения из табл. 1 необходимы для вычисления коэффициентов Фурье – Лежандра.

Так, применительно к коэффициенту c_4 выражение (16) приобретает вид

$$c_4 = \frac{9}{4} \int_0^4 P(t) L_4(t) dt. \quad (31)$$

Из выражения (14) выводится формальная конструкция для полинома $L_4(t)$, являющегося элементом модифицированного базиса Лежандра:

$$L_4(t) = \frac{1}{8} \left(\frac{35(2t-4)^4}{4^4} - \frac{30(2t-4)^2}{4^2} + 3 \right) = \frac{1}{128} (35t^4 - 280t^3 + 720t^2 - 640t + 128). \quad (32)$$

Имея в виду формулу (32), выражение (31) записывается как

$$c_4 = \frac{9}{512} \int_0^4 (35t^4 - 280t^3 + 720t^2 - 640t + 128) P(t) dt. \quad (33)$$

Таблица 1

Исходные данные для определения коэффициентов частичных сумм ряда Фурье – Лежандра

Границы t_l временных отрезков		Значения $P(t_l)$	Границы t_l временных отрезков		Значения $P(t_l)$
Обозначение	Численное значение		Обозначение	Численное значение	
t_0	0,0	3,0	t_{21}	2,1	2,4
t_1	0,1	2,5	t_{22}	2,2	2,9
t_2	0,2	2,2	t_{23}	2,3	3,3
t_3	0,3	1,8	t_{24}	2,4	3,7
t_4	0,4	1,2	t_{25}	2,5	4,1
t_5	0,5	1,0	t_{26}	2,6	4,4
t_6	0,6	0,5	t_{27}	2,7	4,7
t_7	0,7	0,0	t_{28}	2,8	4,9
t_8	0,8	-0,2	t_{29}	2,9	5,0
t_9	0,9	-0,4	t_{30}	3,0	4,8
t_{10}	1,0	-0,6	t_{31}	3,1	4,6
t_{11}	1,1	-0,8	t_{32}	3,2	4,2
t_{12}	1,2	-0,9	t_{33}	3,3	3,8
t_{13}	1,3	-0,8	t_{34}	3,4	3,6
t_{14}	1,4	-0,7	t_{35}	3,5	3,4
t_{15}	1,5	-0,3	t_{36}	3,6	3,2
t_{16}	1,6	0,0	t_{37}	3,7	3,1
t_{17}	1,7	0,2	t_{38}	3,8	2,9
t_{18}	1,8	0,8	t_{39}	3,9	2,8
t_{19}	1,9	1,5	t_{40}	4,0	2,7
t_{20}	2,0	2,0			

Формула (33) может непосредственно использоваться для вычисления c_4 , если известен явный вид зависимости $P(t)$ давления воздуха в ресивере от времени. В действительности известны лишь отдельные значения давления (табл. 1), поэтому найти c_4 возможно только из соотношения (30):

$$c_4 = \frac{9}{40} \left(\frac{P(0)L_4(0) + P(4)L_4(4)}{2} + \sum_{l=1}^{39} P(t_l)L_4(t_l) \right). \quad (34)$$

В табл. 2 приведены значения $L_4(t_l)$, $l = \overline{0, 40}$ полинома (32), которые необходимы для подстановки в (34).

Таблица 2

Значения $L_4(t_l)$ элемента $L_4(t)$ модифицированного базиса Лежандра

t_l	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$L_4(t_l)$	1,0000	0,5541	0,2080	-0,0506	-0,2330	-0,3501	-0,4121
t_l	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$L_4(t_l)$	-0,4284	-0,4080	-0,3591	-0,2891	-0,2050	-0,1130	-0,0187
t_l	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$L_4(t_l)$	0,0729	0,1577	0,2320	0,2929	0,3380	0,3657	0,3750
t_l	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
$L_4(t_l)$	0,3657	0,3380	0,2929	0,2320	0,1577	0,0729	-0,0187
t_l	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
$L_4(t_l)$	-0,1130	-0,2050	-0,2891	-0,3591	-0,4080	-0,4284	-0,4121
t_l	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	
$L_4(t_l)$	-0,3501	-0,2330	-0,0506	0,2080	0,5541	1,0001	

Из анализа табл. 2 видно, что если взять точку $t_{11} = 1,1$, то получается следующее значение полинома:

$$L_4(t_{11}) = \frac{1}{128} (35t_{11}^4 - 280t_{11}^3 + 720t_{11}^2 - 640t_{11} + 128) = -0,2050.$$

Учитывая данные табл. 1 и 2, по формуле (34) вычисляется искомая величина:

$$c_4 = \frac{9}{40} \left(\frac{3 \cdot 1 + 2,7 \cdot 1,0001}{2} + (2,5 \cdot 0,5541 + 2,2 \cdot 0,2080 + 1,8(-0,0506) + \dots + 2,8 \cdot 0,5541) \right) = 0,2599.$$

Таким же образом определяются другие коэффициенты Фурье – Лежандра, значения восьми начальных коэффициентов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов Фурье – Лежандра

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
2,0913	2,1709	0,5436	-3,4852	0,2599	1,4757	0,2798	-0,3019

В соответствии с выражением (17) отыскиваются выражения для частичных сумм. Например, частичная сумма седьмого порядка имеет конфигурацию

$$S^7 = \sum_{k=0}^7 c_k L_k(t) = c_0 L_0(t) + c_1 L_1(t) + c_2 L_2(t) + c_3 L_3(t) + c_4 L_4(t) + c_5 L_5(t) + c_6 L_6(t) + c_7 L_7(t). \quad (35)$$

Тогда значения частичной суммы (35) в граничных точках временных отрезков могут вычисляться как

$$S_l^7 = \sum_{k=0}^7 c_k L_k(t_l), \quad l = \overline{0, 40}. \quad (36)$$

Однако целесообразно получить все частичные суммы в форме стандартных алгебраических полиномов переменной t и на данной основе находить величины (36). Такие вычисления будут более конкретными и обозримыми. Далее в качестве примера искомое соотношение воспроизводится для частичной суммы (35).

Вначале из (14) выводятся базисные полиномы, содержащиеся в (35), как это реализовано в (32):

$$\begin{aligned}
 L_0(t) &= 1; \quad L_1(t) = \frac{1}{2}(t-2); \quad L_2(t) = \frac{1}{8}(3t^2 - 12t + 8); \quad L_3(t) = \frac{1}{16}(5t^3 - 30t^2 + 48t - 16); \\
 L_4(t) &= \frac{1}{256}(63t^5 - 630t^4 + 2240t^3 - 3360t^2 + 1920t - 256); \\
 L_5(t) &= \frac{1}{1024}(231t^6 - 2772t^5 + 12600t^4 - 26880t^3 + 26880t^2 - 10752t + 1024); \\
 L_6(t) &= \frac{1}{2048}(429t^7 - 6006t^6 + 33264t^5 - 92400t^4 + 134400t^3 - 96768t^2 + 28672t - 2048).
 \end{aligned} \tag{37}$$

Затем при подстановке в (35) выражений (37) и значений коэффициентов из табл. 3 частичная сумма седьмого порядка приобретает форму полинома

$$S^7 = -0,0632t^7 + 0,9485t^6 - 5,2977t^5 + 13,506t^4 - 15,913t^3 + 10,456t^2 - 7,5915t + 3,3162. \tag{38}$$

Соотношение (27) для отклонения частичной суммы от траектории принимает вид

$$\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2 = \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^m)^2. \tag{39}$$

В табл. 4 приведены значения частичной суммы седьмого порядка, полученные из (38), а также отклонения данной суммы от траектории в граничных точках временных отрезков.

Таблица 4

Значения частичной суммы седьмого порядка и ее отклонений от траектории в выбранных моментах времени

l	S_l^7	$(P(t_l) - S_l^7)^2$	l	S_l^7	$(P(t_l) - S_l^7)^2$
0	3,3162	0,1000	21	2,3836	0,0003
1	2,6470	0,0216	22	2,9190	0,0004
2	2,1088	0,0083	23	3,4232	0,0152
3	1,6473	0,0233	24	3,8773	0,0314
4	1,2294	0,0009	25	4,2646	0,0271
5	0,8382	0,0262	26	4,5717	0,0295
6	0,4692	0,0010	27	4,7889	0,0079
7	0,1262	0,0159	28	4,9112	0,0001
8	-0,1811	0,0004	29	4,9389	0,0037
9	-0,4405	0,0016	30	4,8777	0,0060
10	-0,6387	0,0015	31	4,7390	0,0193
11	-0,7636	0,0013	32	4,4198	0,0483
12	-0,8052	0,0090	33	4,0026	0,0411
13	-0,7568	0,0019	34	3,8343	0,0549
14	-0,6155	0,0071	35	3,6254	0,0508
15	-0,3825	0,0068	36	3,4489	0,0619
16	-0,0633	0,0040	37	3,3582	0,0667
17	0,3328	0,0176	38	3,1849	0,0811
18	0,7926	0,0001	39	3,2164	0,1734
19	1,3002	0,0399	40	3,2526	0,3054
20	1,8372	0,0265			

При $t_{11} = 1,1$, как следует из табл. 4, имеет место значение

$$S_{11}^7 = -0,0632t_{11}^7 + 0,9485t_{11}^6 - 5,2977t_{11}^5 + 13,506t_{11}^4 - 15,913t_{11}^3 + 10,456t_{11}^2 - 7,5915t_{11} + 3,3162 = -0,7636.$$

Результаты вычислений (см. табл. 4) и соотношение (39) являются основой для поиска отклонения частичной суммы седьмого порядка от траектории:

$$\sum_{l=0}^{40} (P_l - S_l^7)^2 = 1,3394.$$

Подобные расчеты выполнены для частичных сумм более низкого порядка:

$$\sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^1)^2 = 86,517; \quad \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^2)^2 = 83,693; \quad \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^3)^2 = 10,584;$$

$$\sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^4)^2 = 10,362; \quad \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^5)^2 = 1,3567; \quad \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^6)^2 = 1,2356.$$

Относительные изменения отклонений частичных сумм предыдущего и последующего порядков от траектории в соответствии с (28):

$$\delta_{1,2} = \left| \frac{\sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^1)^2 - \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^2)^2}{\sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^1)^2} \right| \cdot 100 = \frac{86,517 - 83,693}{86,517} \cdot 100 = 3,3\%; \quad (40)$$

$$\delta_{2,3} = 87,4\%; \quad \delta_{3,4} = 2,1\%; \quad \delta_{4,5} = 86,9\%; \quad \delta_{5,6} = 8,9\%; \quad \delta_{6,7} = 7,7\%.$$

Результаты (40) свидетельствуют, что на частичных суммах пятого, шестого и седьмого порядков двухкомпонентное условие (20) выполняется:

$$\delta_{5,6} < 10\% \quad \& \quad \delta_{6,7} < 10\%. \quad (41)$$

При этом абсолютное значение отклонения частичной суммы седьмого порядка от траектории превышает аналогичную величину для частичной суммы шестого порядка [справедливо неравенство (21)]:

$$\sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^6)^2 < \sum_{l=0}^{40} (P_l - S_l^7)^2 \quad (42)$$

Из (41) и (42) следует, что в качестве аппроксимирующего соотношения для траектории (см. рис. 1) нужно принимать частичную сумму ряда Фурье – Лежандра шестого порядка

$$S^6 = 0,0631t^6 - 0,3942t^5 - 0,1148t^4 + 3,8992t^3 - 3,8092t^2 - 3,3649t + 3,0143. \quad (43)$$

Формула (43) получена так же, как и (38).

Таким образом, из табл. 3 видно, что вектор (1) при разложении траектории давления воздуха (см. рис. 1) приобретает следующее начертание:

$$\mathbf{Y}_{(7)} = (2,0913, \quad 2,1709, \quad 0,5436, \quad -3,4852, \quad 0,2599, \quad 1,4757, \quad 0,2798)^T.$$

Необходимо заметить, что относительные различия частичных сумм первого и второго, а также третьего и четвертого порядков ряда Фурье – Лежандра [см. (40)] условию (22) удовлетворяют. При этом и неравенство (23) в обоих случаях тоже выполняется – относительные различия частичных сумм второго и третьего, четвертого и пятого порядков превышают допустимую величину $\delta = 10\%$. Указанный факт говорит о преимуществе предложенного в данной работе способа определения размерности вектора (1) по сравнению с предыдущими исследованиями [12, 13]. Руководствуясь ими, можно принять неточное решение об аппроксимирующем соотношении для траектории давления воздуха в виде частичных сумм второго или четвертого порядка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования процессов интервального контроля состояния специальных технических систем РКК позволили:

– обосновать возможность применения ортогональных алгебраических базисов для преобразования траекторий выходных переменных СТС с целью получения множества контролируемых параметров;

– выполнять аппроксимацию траекторий частичными суммами ряда Фурье на основе ортогонального базиса Лежандра, модифицированного применительно к временным интервалам контроля технического состояния СТС любой продолжительности;

– предложить усовершенствованный способ определения мощности множества контролируемых параметров в виде коэффициентов разложения траекторий в частичные суммы ряда Фурье – Лежандра;

– разработать численную процедуру поиска значений контролируемых параметров СТС при разложении траекторий, которые не могут быть представлены в аналитическом виде.

Усовершенствование способа задания мощности множества контролируемых параметров состоит в том, что обосновано двухкомпонентное условие, при выполнении которого завершается процесс удлинения частичных сумм ряда Фурье – Лежандра. При этом сформированное множество контролируемых параметров включает всю значимую информацию об особенностях поведения траектории на интервале регистрации.

Процедура отыскания значений контролируемых параметров опирается на методы определения интегралов, представленные в теории вычислений.

Показаны результаты обработки экспериментальных исследований изменения одного из выходных параметров системы холодоснабжения, которые демонстрируют предложенные методические и математические подходы к получению объективных сведений о техническом состоянии СТС.

Список используемых источников

1. Лобан А.В. Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 146 с.
2. A review of model based and data driven methods targeting hardware systems diagnostics / C. Skliros [et al.] // *Diagnostyka*. – 2019. – Vol. 20(1). – P. 3–21.
3. A novel intelligent fault diagnosis method of rotating machinery based on deep learning and PSO-SVM / P. Shi [et al.] // *Journal of Vibroengineering*. – 2017. – Vol. 19(8). – P. 5932–5946.
4. Поляков В.А. Основы технической диагностики. – М.: Инфра-М, 2014. – 118 с.
5. Дмитриев А.К., Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
6. Зорич В.А. Математический анализ. – М.: МЦНМО, 2012. – Ч.1. – 674 с.
7. Якимов В.Н. Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // *Известия Самарского центра РАН*. – 2016. – Т. 18, № 4(7). – С. 1346–1353.
8. Сеньченков В.И. Модели, методы и алгоритмы анализа технического состояния. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 377 с.
9. Сеньченков В.И., Абсалямов Д.Р., Авсюкевич Д.А. Задание множества диагностических параметров системы на основе теории функциональных пространств // *Труды СПИИРАН*. – 2019. – Т. 18(4). – С. 949–975.
10. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 572 с.

11. *Muscat J.* Functional Analysis: An Introduction to Metric Spaces, Hilbert Spaces, and Banach Algebras. – Springer, 2014. – 420 p.
12. Методика определения совокупности коэффициентов Фурье при диагностировании агрегатов роторного типа / П.А. Грушковский [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 11. – С. 60–63.
13. *Сеньченков В.И.* Математический аппарат диагностирования сложных технических систем // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 7. – С. 547–557.
14. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений – Л.: Электроатомиздат, 1991. – 304 с.
15. *Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.* Численные методы. – 9-е изд. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 636 с.

В.Н. Арсеньев,
доктор технических наук, профессор;
С.Ю. Балугев,
кандидат технических наук, доцент;
Е.Н. Белихин,
кандидат технических наук

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА С ЦЕНТРОИДНЫМ АЛГОРИТМОМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматривается задача идентификации параметров бортового оптико-электронного средства, в котором используется алгоритм расчета энергетического центра изображений точечных источников излучения в кластере пикселей матричного приемника оптического излучения. Отмечены особенности, достоинства и недостатки этого алгоритма при решении задач определения центров изображений точечных источников излучения с помощью аппаратуры наблюдения космического пространства. Предложена методика определения значений параметров бортового оптико-электронного средства, обеспечивающих требуемую точность траекторных измерений параметров орбит наблюдаемых космических объектов (КО) методом космической триангуляции в различных зонах двойного обзора (ЗДО).

Ключевые слова: бортовые оптико-электронные средства, космический объект, точность измерений, метод космической триангуляции, зоны двойного обзора, центроидный алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасного функционирования отечественных группировок космических аппаратов (КА) различного назначения необходимо вести непрерывное наблюдение за текущей обстановкой в околоземном космическом пространстве (ОКП) [1, 2]. Размещение средств наблюдения в ОКП позволяет существенно повысить эффективность его контроля, поскольку оснащенные специальными бортовыми оптико-электронными средствами (БОЭС) космические аппараты-измерители (КАИ) способны реализовать непрерывное и глобальное наблюдение, осуществлять траекторные измерения параметров орбит КО и выдавать предупреждающие сигналы об их опасных сближениях с отечественными КА.

Процессы наблюдений в ОКП и определения значений параметров орбит КО имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании и разработке БОЭС КАИ. Основными из них являются:

- большой диапазон и высокие скорости взаимного движения КО и КАИ;
- ограничение поля зрения БОЭС при наблюдении удаленных объектов;
- зависимость наблюдаемых областей и участков ОКП от структуры, количества КАИ и технических характеристик БОЭС;
- формирование изображения КО в БОЭС в виде «пятна рассеяния»;
- применение специальных алгоритмов обработки цифровых сигналов матричных приемников оптического излучения (МПОИ) БОЭС;
- малое время наблюдений, а также ограничения треков движения отметок от КО в МПОИ БОЭС;
- возникновение «смаза» изображения при большом времени экспозиции $t_{\text{эксп}}$ в МПОИ БОЭС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для проведения траекторных измерений параметров орбит КО в первую очередь необходимо измерить с малой погрешностью расстояние (дальность) между КАИ и КО – L . Активные средства измерения дальности, такие как лазерные дальномеры, позволяют проводить высокоточные измерения, однако применение их ограничено из-за большого потребления энергии.

В работах [3–7] предложено использовать пассивные БОЭС для определения дальности L (КАИ-КО) методом «космической триангуляции». Для этого необходимо, чтобы один и тот же КО был расположен в зоне двойного обзора (ЗДО), т. е. наблюдался с двух КАИ. БОЭС КАИ проводят угломерные измерения положения изображений КО с привязкой к приборной системе координат (ПСК) БОЭС КАИ. В работе [7] приведены расчеты дальности L (КАИ-КО) с применением метода «космической триангуляции» в различных ЗДО и показано, что среднеквадратическое отклонение (СКО) угломерных измерений положения изображений КО в поле зрения БОЭС $\sigma_{\text{ко}}$ непосредственно влияет на погрешность расчетов дальности ΔL (КАИ-КО). Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношения между требованиями к погрешностям расчета дальности КАИ-КО и угломерных измерений БОЭС

Погрешность расчетов дальности (КАИ – КО) ΔL (м)	Требуемое значение СКО вычисления центров изображений КО в ПСК БОЭС $\sigma_{\text{ко}}$ (угл. мин)				
	ЗДО1	ЗДО2	ЗДО3	ЗДО4	ЗДО5
200	0.396	0.096	0.0216	0.00192	0.00036
100	0.198	0.048	0.0108	0.00096	0.00018

Из анализа табл. 1 следует, что для уменьшения погрешности расчета дальности ΔL (КАИ-КО) необходимо уменьшать СКО $\sigma_{\text{ко}}$ измерения положения отметки от КО в ПСК БОЭС. Для этого необходимо иметь специализированное БОЭС, обеспечивающее проведение угломерных измерений положений отметок от КО с требуемым СКО $\sigma_{\text{ко}}$.

Разработкой подобных оптико-электронных приборов и систем в настоящее время занимаются ряд организаций: ИКИ РАН, ПАО «МАК «Вымпел», ЗАО «НПО «Лептон», ФГУП «НПО Астрофизика», АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» и др. При этом остается актуальной задача автономного определения параметров орбит наблюдаемых КО с помощью бортовых пассивных оптико-электронных средств. Для ее решения с требуемой точностью необходимо определить параметры БОЭС.

Рассматривается функциональная схема специализированного БОЭС (рис. 1).

В БОЭС различные КО наблюдаются на значительных расстояниях от КАИ ($L > 1000$ км) и являются точечными источниками излучения, изображения которых в фокальной плоскости БОЭС представляют собой «пятна рассеяния» [8].

Размеры «пятна рассеяния» характеризуются «эффективным радиусом рассеяния» ρ_0 и зависят от значений параметров БОЭС. При этом СКО погрешности определения энергетических центров КО в ПСК $\sigma_{\text{ко}}$, которое можно оценить по результатам цикла измерений, также зависит от характеристик основных функциональных элементов БОЭС:

- оптической системы (ОС);
- матричного приемника оптического излучения (МПОИ);
- реализованного в вычислительном блоке алгоритма расчета энергетического центра «пятна рассеяния» КО в ПСК МПОИ (далее – алгоритм расчета центра «пятна рассеяния»).

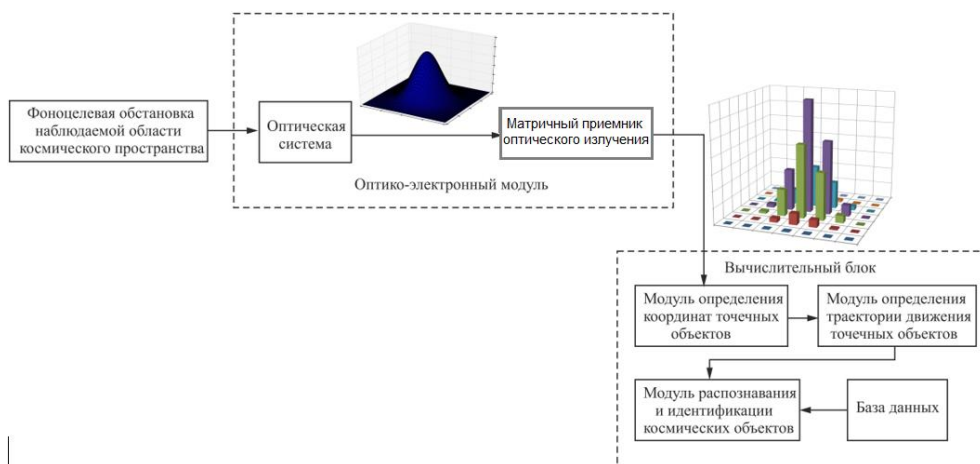


Рис. 1. Функциональная схема специализированной БОЭС

Для идентификации параметров БОЭС необходимо оценить влияние основных элементов БОЭС на оценку погрешности $\sigma_{\text{ко}}$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА «ПЯТНА РАССЕЯНИЯ» ЦЕНТРОИДНЫМ МЕТОДОМ

Расчет энергетического центра «пятна рассеяния» КО осуществляется в вычислительном блоке (рис. 1) посредством обработки специальными алгоритмами поступающего в вычислительный блок с каждого пикселя МПОИ цифрового сигнала $A_{\text{ко}}^{i,j}$, $i = \overline{1, v}$; $j = \overline{1, w}$ (где v, w – число строк и столбцов МПОИ). Центры каждого пикселя МПОИ имеют привязку к координатам x_i, y_j в ПСК БОЭС. Максимальный уровень цифрового сигнала $A_{\text{max}}^{i,j}$ определяется числом разрядов n аналого-цифрового преобразователя (АЦП) МПОИ:

$$A_{\text{max}}^{i,j} = 2^n. \tag{1}$$

Шаг квантования (дискретизации) h определяется коэффициентом преобразования МПОИ $k_{\text{мпои}}$ и энергетическим уровнем потенциальной ямы фоточувствительного слоя пикселя $E_{\text{фз}}$:

$$h = \frac{E_{\text{фз}} k_{\text{мпои}}}{2^n}. \tag{2}$$

На *первом этапе* обработки цифровых сигналов пикселей МПОИ в вычислительном блоке (рис. 1) проводится фильтрация только таких сигналов, уровень которых больше порогового:

$$A_{\text{ко}}^{i,j} > A_{\text{п}}. \tag{3}$$

На *втором этапе* цифровые сигналы $A_{\text{ко}}^{i,j}$ для всех пикселей уменьшаются на величину порога

$$A_{\text{ко}}^{i,j} = A_{\text{ко}}^{i,j} - A_{\text{п}}. \tag{4}$$

В связи с этим цифровые сигналы с пикселей, соответствующих наблюдаемому КО, будут больше нуля: $A_{\text{ко}}^{i,j} > 0$, а со всех остальных пикселей МПОИ равны нулю: $A_{\text{ко}}^{i,j} = 0$.

На *третьем этапе* обработки формируются кластеры пикселей размером $z \times z$, соответствующие наблюдаемому КО. Кластер представляет собой некоторую область пикселей МПОИ, в пределах которой производится расчет угловых координат КО с привязкой к ПСК. Число пикселей в кластере по двум осям координат ПСК постоянно, $z = 7$.

На четвертом этапе определяются оценки координат $\hat{x}_{\text{ко}}^k, \hat{y}_{\text{ко}}^k$ энергетического центра «пятна рассеяния» с привязкой к осям ПСК посредством обработки цифровых сигналов $A_{\text{ко}}^{i,j}$ пикселей в кластере размером $z \times z$:

$$\hat{x}_{\text{ко}}^k = \frac{\sum_{i=1}^7 x_i \sum_{j=1}^7 A_{\text{ко}}^{i,j}}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 A_{\text{ко}}^{i,j}}; \quad \hat{y}_{\text{ко}}^k = \frac{\sum_{j=1}^7 y_j \sum_{i=1}^7 A_{\text{ко}}^{i,j}}{\sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 A_{\text{ко}}^{i,j}}. \quad (5)$$

Средние значения оценок погрешности $\Delta \hat{x}_{\text{ко}}, \Delta \hat{y}_{\text{ко}}$ расчета координат энергетического центра «пятна рассеяния» КО находятся по результатам цикла вычислений из $K = 100$ итераций

$$\Delta \hat{x}_{\text{ко}} = \frac{\sum_{k=1}^{100} (x_{\text{ко}}^{\text{п}} - \hat{x}_{\text{ко}}^k)}{K}; \quad \Delta \hat{y}_{\text{ко}} = \frac{\sum_{k=1}^{100} (y_{\text{ко}}^{\text{п}} - \hat{y}_{\text{ко}}^k)}{K}, \quad (6)$$

где $x_{\text{ко}}^{\text{п}}, y_{\text{ко}}^{\text{п}}$ – координаты центра «пятна рассеяния» КО в ПСК БОЭС.

Оценки $\hat{\sigma}_{\text{ко}}^x, \hat{\sigma}_{\text{ко}}^y$ СКО координат энергетического центра «пятна рассеяния» КО по осям x, y определяются по формулам:

$$\hat{\sigma}_{\text{ко}}^x = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{100} (x_{\text{ко}}^{\text{п}} - \hat{x}_{\text{ко}}^k)^2}{K-1}}; \quad \hat{\sigma}_{\text{ко}}^y = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{100} (y_{\text{ко}}^{\text{п}} - \hat{y}_{\text{ко}}^k)^2}{K-1}}. \quad (7)$$

Оценка СКО $\hat{\sigma}_{\text{ко}}$ погрешности расчета энергетического центра «пятна рассеяния» КО в линейных размерах пикселя определяется максимальным из значений $\hat{\sigma}_{\text{ко}}^x, \hat{\sigma}_{\text{ко}}^y$, т. е. $\hat{\sigma}_{\text{ко}} = \max \{ \hat{\sigma}_{\text{ко}}^x, \hat{\sigma}_{\text{ко}}^y \}$. Как показали результаты исследований [4], для минимизации $\hat{\sigma}_{\text{ко}}$ необходимо установить определенное соотношение

$\frac{\rho_0}{d}$ между эффективным радиусом «пятна рассеяния» ρ_0 и линейным размером пикселя d . Для центроидного алгоритма расчета энергетического центра «пятна рассеяния» КО зависимость $\hat{\sigma}_{\text{ко}} \left(\frac{\rho_0}{d} \right)$ показана на рис. 2, из кото-

рой следует, что для минимизации $\hat{\sigma}_{\text{ко}}$ необходимо, чтобы величина $\frac{\rho_0}{d}$ находилась в диапазоне $\frac{\rho_0}{d} \in [0.7; 0.8]$.

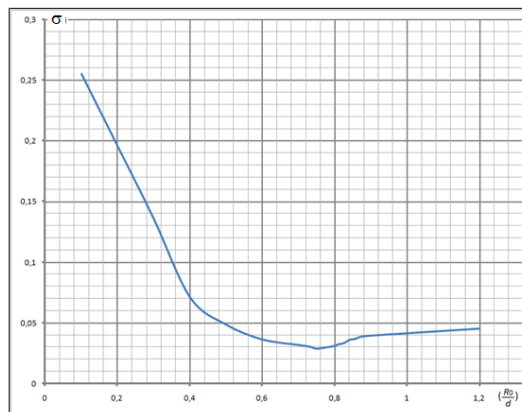


Рис. 2. Зависимость оценки СКО $\hat{\sigma}_{\text{ко}}$ от отношения $\frac{\rho_0}{d}$

Обеспечить выполнение указанного выше условия можно путем идентификации параметров БОЭС.

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА

Для идентификации параметров БОЭС с центроидным алгоритмом расчета энергетических центров изображений КО использованы следующие исходные данные:

– параметры точечного источника излучения (КО):

$m = 15$ – предельное значение звездной величины точечных источников излучения (ед.);

$\lambda = 0,555$ мкм – среднее значение длины волны в оптическом диапазоне;

– параметры топологии МПОИ:

$d \in [2; 20]$ мкм – диапазон значений линейных размеров пикселя МПОИ;

$M \in [1000; 30000]$ – диапазон значений по количеству пикселей в строке (столбце) МПОИ;

– параметры, характеризующие формирование сигнала пикселями МПОИ:

$t_n = 0,01$ с – время накопления заряда пикселем МПОИ;

$n = 12$ – количество разрядов АЦП МПОИ;

– параметры оптической системы БОЭС:

$2\omega = 38^\circ$ – угол поля зрения БОЭС КАИ;

$D \in [100; 500]$ мм – диапазон значений диаметра входного зрачка БОЭС;

$f \in [50; 950]$ мм – диапазон значений фокусного расстояния БОЭС.

Необходимо определить диапазоны изменения параметров БОЭС D, f, d, M , при которых $\hat{\sigma}_{\text{ко}}^r < \hat{\sigma}_{\text{тр}}^r$, где $r = \overline{1, 5}$ – номер ЗДО. Для решения этой задачи предлагается использовать методику, включающую ряд шагов.

1. Получение совокупности зависимостей $\frac{\rho_0}{d} = F(D, f, d)$ на основе следующего алгоритма.

1.1. Задание начального значения фокусного расстояния БОЭС $f_0 = 50$ мм из диапазона $f \in [50; 950]$ мм.

1.2. Задание начального значения диаметра входного зрачка БОЭС $D_0 = 100$ мм из диапазона $D \in [100; 500]$ мм.

1.3. Задание начального значения линейного размера пикселя $d_0 = 2$ мкм из диапазона $d \in [2; 20]$ мкм.

1.4. Расчет отношения $\frac{\rho_0}{d}$ по формуле

$$\frac{\rho_0}{d} = \frac{1,22\lambda f}{Dd}. \quad (8)$$

1.5. Повторение пп. 1.4 при изменении значения линейного размера пикселя $d \in [2; 20]$ мкм с шагом $\Delta d = 0,1$ мкм.

1.6. Повторение пп. 1.4, 1.5 при изменении значения диаметра входного зрачка БОЭС с шагом $\Delta D = 10$ мм до $D = 500$ мм.

1.7. Построение зависимостей $\frac{\rho_0}{d}(D, f = \text{const}, d)$.

1.8. Повторение пп. 1.2–1.7 при изменении значения фокусного расстояния БОЭС f от 50 мм до 950 мм с шагом $\Delta f = 10$ мм.

2. Определение диапазонов для значений линейного размера пикселя d , при которых $\frac{\rho_0}{d} \in [0,7; 0,8]$.

Например, для фокусного расстояния ОС $f = 0,7$ м зависимости $\frac{\rho_0}{d}(D, f = 0,7 \text{ м}, d)$ представлены на рис. 3.

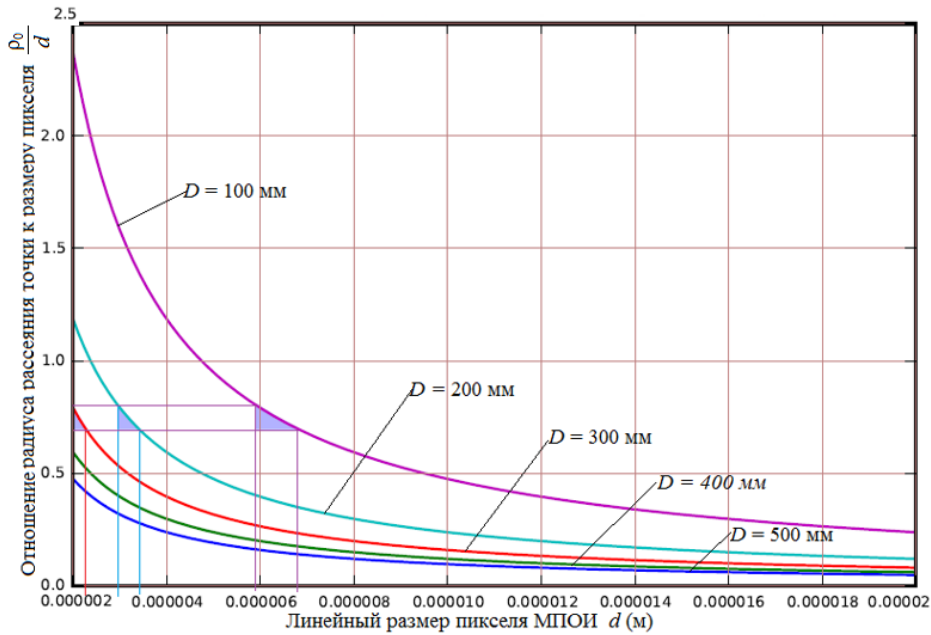


Рис. 3. Зависимости $\frac{\rho_0}{d}$ от D и d для $f = 0,7$ м

3. Определение количества элементов (пикселей) M в строке (столбце) МПОИ.

Размер поля зрения БОЭС 2ω зависит от размера поля зрения единичного пикселя КМОП-матрицы d/f [9] и от количества пикселей в строке (столбце) МПОИ.

Общее количество элементов M в строке (столбце) МПОИ можно найти из формулы

$$\omega = \frac{Md}{\sqrt{2}f}. \quad (9)$$

3.1. Получение зависимостей $\omega(f, M, d)$.

3.1.1. Задание начального значения $d_0 = 2$ мкм линейного размера пикселя.

3.1.2. Задание начального значения $f_0 = 50$ мм фокусного расстояния БОЭС.

3.1.3. Задание начального значения $M_0 = 1000$ количества пикселей в строке (столбце) МПОИ БОЭС из диапазона $M \in [1000; 30000]$.

3.1.4. Расчет величины поля зрения $\omega(f, M, d)$ по формуле (9).

3.1.5. Повторение пп. 3.1.4 при изменении значения фокусного расстояния БОЭС f от 50 мм до 950 мм с шагом $\Delta f = 10$ мм.

3.1.6. Повторение пп. 3.1.4, 3.1.5 при изменении значения количества пикселей в строке (столбце) МПОИ БОЭС от 1000 до 30000 с шагом $\Delta M = 1000$.

3.1.7. Построение зависимостей $\omega(f, M, d = \text{const})$.

3.1.8. Повторение пп. 3.1.5–3.1.7 при изменении значения размера пикселя от 2 мкм до 20 мкм с шагом $\Delta d = 0.1$ мкм.

3.2. Определение количества элементов (пикселей) M в строке (столбце) МПОИ из полученных зависимостей $\omega(f, M, d = \text{const})$, при которых $\omega = 19^\circ$.

Для $d = 10$ мкм эти зависимости представлены на рис. 4.

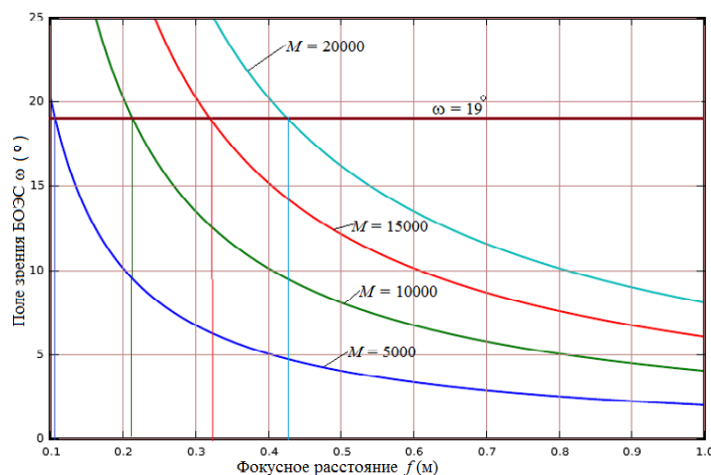


Рис. 4. Зависимости угла поля зрения ω от f и M при $d = 10$ мкм

При проведении угломерных измерений положений отметок от КО в ПСК БОЭС с требуемой погрешностью $\hat{\sigma}_{\text{тр}}^r$ (см. табл.1) параметры БОЭС должны иметь значения, которые можно определить с помощью полученных зависимостей. Количество пикселей в строке (столбце) МПОИ должно быть таким, чтобы полностью охватить поле зрения БОЭС в $2\omega = 38^\circ$. Например, для значений параметров БОЭС $d = 10$ мкм и $f = 0.22$ м количество пикселей в строках (столбцах) МПОИ должно быть $M = 11000$.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение разработанной методики идентификации параметров БОЭС показало, что при любых значениях параметров БОЭС из заданных диапазонов обеспечить проведение угломерных измерений положений отметок от КО в ПСК БОЭС с требуемой погрешностью $\hat{\sigma}_{\text{тр}}^r$, $r = 1,5$, без уменьшения поля зрения $2\omega = 38^\circ$ не представляется возможным, поскольку размер пикселя при этом должен быть $d < 2$ мкм, а их количество $M > 100000$. Технически реализовать МПОИ с такими параметрами на текущем этапе развития микроэлектроники проблематично.

Одним из путей решения такой задачи является расширение диапазона изменения линейного размера пикселя МПОИ d , например, посредством увеличения отношения $\frac{\rho_0}{d}$ эффективного радиуса рассеяния точки к линейному размеру пикселя МПОИ. Для этого необходимо сместить (расфокусировать) МПОИ относительно фокальной плоскости ОС на некоторое расстояние s [11]. Наличие смещения приводит к увеличению отношения $\frac{\rho_0}{d}$, а также к увеличению диапазонов изменений параметров БОЭС D , f и d .

Получить зависимости $\frac{\rho_0}{d}(D, f, d, s)$ можно по формуле, аналогичной (8), но учитывающей влияние смещения s :

$$\frac{\rho_0}{d} \approx \frac{1.22\lambda f}{Dd} + \frac{s}{d} \operatorname{arctg}\left(\frac{D}{2f}\right).$$

На рис. 5 показаны графики зависимостей отношения $\frac{\rho_0}{d}$ от линейного размера пикселя d и величины смещения s при $D = 0.15$ м и $f = 0.22$ м.

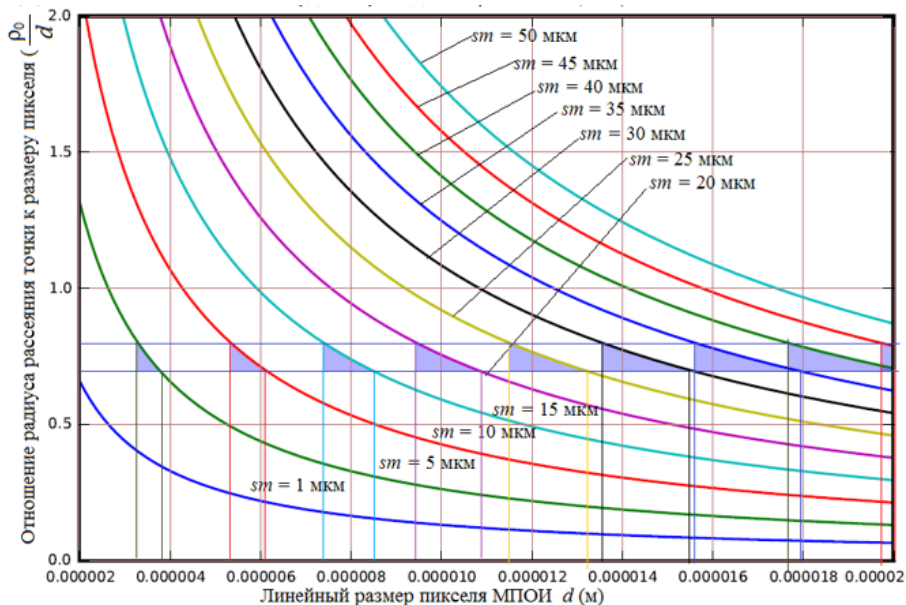


Рис. 5. Зависимости отношения $\frac{\rho_0}{d}$ от d и s при $D = 0.15$ м и $f = 0.22$ м

На основании полученных зависимостей $\frac{\rho_0}{d}(D, f, d, s)$ можно определить диапазоны изменения смещения s для обеспечения требуемой погрешности угломерных измерений $\sigma_{\text{тр}}$.

Например, для значений параметров БОЭС $d = 10$ мкм, $D = 0.15$ м и $f = 0.22$ м требуемая погрешность $\sigma_{\text{тр}}^4 = 0.00096$ угл. мин для ЗДО4 будет обеспечена, если величина смещения лежит в диапазоне $s \in [18; 22]$ мкм. Кроме того, были определены диапазоны для диаметра входного зрачка D , фокусного расстояния f и линейного размера пикселя d . В частности, для линейного размера пикселя при $D = 0.15$ м и $f = 0.22$ м они приведены в табл. 2.

Таблица 2

Диапазоны изменения линейного размера пикселя d
при $D = 0.15$ м и $f = 0.22$ м

s , МКМ	5	10	15	20	25	30	35	40
d_{\min} , МКМ	3.3	5.3	7.3	9.3	11.4	13.5	15.6	17.7
d_{\max} , МКМ	3.8	6.1	8.4	10.9	13.3	15.4	18.0	20.2

С помощью разработанной методики определены значения параметров БОЭС, при которых обеспечивается заданная погрешность расчета дальности КАИ-КО $\Delta L = 100$ м применительно для ЗДО 1-4. Они представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения параметров БОЭС для ЗДО1-ЗДО4 при $D = 0.31$ м и $f = 0.43$ м

Параметры БОЭС	Значения параметров БОЭС			
	ЗДО1	ЗДО2	ЗДО3	ЗДО4
	$\Delta L = 100$ м			
Угол поля зрения БОЭС 2ω (град)	38			
Фокусное расстояние f (м)	0.43			
Диаметр входного зрачка D (м)	0.31			
Линейный размер элемента МПОИ d (мкм)	15	10	10	10
Значение смещения МПОИ s (мкм)	30	20	20	20
Количество элементов в строках (столбцах) МПОИ M (ед)	14000	21000	21000	21000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методику идентификации значений параметров БОЭС с центроидным алгоритмом обработки изображений точечных источников излучения целесообразно использовать для решения практических задач:

- проектирования;
- обоснования технических характеристик;
- разработки специализированных оптико-электронных средств наблюдения и контроля КО в ОКП.

Список используемых источников

1. *Молотов И.Е.* Проблемы мониторинга ОКП и направления развития технологии наблюдений // Всероссийская научная конференция с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы». – М.: ИКИ РАН, 2019. – С. 10–11.
2. *Трещалин А.П.* Применение оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов для предварительного определения параметров орбит околоземных объектов // Труды МФТИ. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 122–131.
3. *Половников В.И., Скунццкий В.М.* Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции: моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 123 с.
4. Вариант баллистического построения орбитальной системы контроля космических объектов в ближней зоне околоземного космического пространства / В.К. Семенихин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 112–116.
5. *Арсеньев В.Н., Балугев С.Ю., Белихин Е.Н.* Обоснование требований к бортовым оптико-электронным средствам космических аппаратов наблюдения за обстановкой в космическом пространстве // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 167–172.

6. Оценивание характеристик точности определения координат космического объекта бортовыми оптико-электронными средствами космических аппаратов наблюдения за обстановкой в космическом пространстве / В.Н. Арсеньев [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 173–179.

7. *Арсеньев В.Н., Балухев 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. 234–238.

8. Исследование смещения энергетического центра изображений звезд относительно геометрического центра на ПЗС-матрице и коррекция методической ошибки / Г.А. Аванесов [и др.] // Сборник трудов конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов» / Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). – 2009. – С. 421–446.

9. Минимальные технические характеристики звездного датчика ориентации, необходимые для достижения заданной погрешности / А.И. Захаров [и др.] // Астрофизический бюллетень. – 2013. – Т. 68, № 4. – С. 507–520.

А.М. Астанков;
Н.В. Головчинская;
О.В. Мироненков,
кандидат химических наук

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА СРЕДСТВ И МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Разработаны математические модели для решения задач по оптимальному комплексованию набора средств и методов неразрушающего контроля для оценивания технического состояния технологического оборудования стартовых комплексов ракетно-космических комплексов на базе симплекс-метода и метода обобщенного понижающего градиента. Проведен сравнительный анализ эффективности использования метода дискретного программирования, симплекс-метода и метода обобщенного понижающего градиента при решении такого рода задач. На практическом примере показаны преимущества симплекс-метода и метода обобщенного понижающего градиента перед методом дискретного программирования при решении прямой и обратной задачи оптимального комплексования средств и методов неразрушающего контроля.

Ключевые слова: комплексование, методы неразрушающего контроля, оптимизация, дискретное программирование, симплекс-метод, метод обобщенного понижающего градиента.

ВВЕДЕНИЕ

Задача достижения необходимого и достаточного уровня достоверности оценивания и прогнозирования технического состояния (ТС) технологического оборудования стартовых комплексов (СК) ракетно-космических комплексов (РКК) с целью обеспечения его дальнейшей безопасной эксплуатации, а также обоснованного установления сроков обслуживания, ремонта и продления назначенных показателей ресурса является в настоящее время одной из наиболее актуальных, поскольку многие агрегаты из состава технологического оборудования СК были введены в эксплуатацию во второй половине 20 века и, соответственно, работают за пределами назначенных показателей ресурса. При этом закономерно увеличивается частота их отказов, что может приводить к незапланированным задержкам и даже отменам пуска ракеты-носителя. Поэтому с целью снижения риска эксплуатационных отказов технологического оборудования СК необходимо повышать достоверность мониторинга, его текущего ТС путем расширения применяемой номенклатуры методов неразрушающего контроля (МНК).

Анализ применения разных по физической природе МНК для оценивания ТС объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) [1–5] подтверждает целесообразность совместного использования функциональных возможностей средств неразрушающего контроля (НК).

Оптимальное сочетание средств и МНК, а именно комплексование МНК, позволит взаимно нивелировать недостатки применяемых методов, реализовать принцип «избыточности» при получении и интерпретации результатов измерений, что в конечном итоге позволит значительно повысить достоверность контроля диагностических параметров. При планировании диагностических мероприятий технологического оборудования СК с использованием средств и МНК необходимо учитывать экономическую составляющую для обеспечения разумного баланса между требуемой (достаточной) вероятностью достоверного контроля ТС ОНКИ и стоимостью проведения диагностических мероприятий.

Следовательно, задачу комплексования МНК следует рассматривать в оптимизационном аспекте, а именно как выбор оптимального набора средств и МНК при выполнении за-

данных требований по достоверности контроля и стоимости проведения диагностических мероприятий.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процесс оптимального комплексирования можно разделить на две задачи: прямую и обратную (по типу целевой функции).

Первая (прямая) задача – комплексировать МНК таким образом, чтобы вероятность достоверного измерения параметров ТС ОК была максимальной, а стоимость проведения диагностических мероприятий при этом не превышала заданную сумму.

Вторая (обратная) задача – комплексировать МНК таким образом, чтобы стоимость проведения диагностических мероприятий была минимальна, а вероятность достоверного измерения параметров ТС ОК при этом была не ниже заданной.

Для решения поставленных задач необходимо проведение следующих мероприятий:

- определение для выбранного объекта контроля (ОК) критически значимых диагностируемых параметров, являющихся достаточно информативными для оценки возможности его дальнейшей эксплуатации в безопасном режиме;
- оценка функциональных возможностей доступных средств и МНК для измерения критически значимых диагностируемых параметров выбранного ОК;
- составление первоначального плана проведения диагностических мероприятий;
- выбор оптимального набора средств и МНК для оценивания, текущего ТС ОК с заданием требуемых значений достоверности контроля или стоимости проведения диагностических мероприятий.

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Для решения подобного рода оптимизационных задач чаще всего используют метод дискретного математического программирования [6, 7], суть которого заключается в последовательном анализе текущего состава МНК и исключении наименее значимого средства контроля в соответствии со значением относительного коэффициента влияния. Для этого рассчитываются относительные показатели влияния i -го элемента агрегата при контроле j -м МНК. У элемента с наименьшим относительным показателем влияния удаляется соответствующий МНК. Такое итеративное сокращение набора МНК продолжается до достижения либо требуемого значения вероятности достоверного контроля агрегата, либо заданной суммы стоимости проведения диагностических мероприятий.

В данной работе для решения прямой задачи оптимального комплексирования МНК при контроле параметров элементов оборудования СК предлагается использовать симплекс-метод линейного целочисленного программирования, алгоритм которого решает оптимизационную задачу (глобальный экстремум) путем перебора вершин выпуклого многогранника, заданного системой n линейных равенств и неравенств, в многомерном пространстве. При этом строятся базисные решения, на которых монотонно убывает линейный функционал, до ситуации, при которой выполняются необходимые условия локальной оптимальности [8].

Для решения обратной задачи оптимального комплексирования МНК предлагается использовать метод обобщенного понижающего градиента, который позволяет искать локальные экстремумы для нелинейных функций [9].

Рассмотрим математические модели указанных методов оптимизации и проведем их сравнительный анализ.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Введем обозначения. Пусть $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множество всех доступных МНК, которые могут использоваться для обследования технического состояния исследуемого объекта (агрегата); p_{ij} – вероятность достоверного контроля i -го элемента агрегата j -м МНК из множества X ; C_{ij} – стоимость контроля i -го элемента агрегата j -м МНК из множества X ; $C_{\Sigma_{\text{пр}}}$ – требуемая суммарная стоимость проведения контроля всех критически значимых параметров элементов агрегата; $P_{\text{пр}}$ – требуемая вероятность достоверного контроля всех критически значимых параметров элементов агрегата; g_{ij} – булева переменная, которая принимает следующие значения:

$$g_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-ый МНК используется для контроля } i\text{-го параметра агрегата;} \\ 0, & \text{если } j\text{-ый МНК не используется для контроля } i\text{-го параметра агрегата.} \end{cases}$$

В результате получим матрицу использования МНК при контроле агрегата:

$$G_{nm} = \|g_{ij}\|, \quad (1)$$

где n – количество всех МНК, которые можно задействовать для контроля ТС агрегата;

m – количество контролируемых параметров элементов агрегата.

Решением задачи комплексирования МНК будет являться обновленная матрица использования МНК:

$$G_{km} = \|g_{ij}\|, \quad (2)$$

где k – количество МНК, задействованных для контроля i -го элемента агрегата после моделирования (применения одного из методов оптимизации).

По формуле (3) определяются вероятности достоверного контроля i -го элемента агрегата при совместном применении нескольких МНК [6, 7]:

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - p_{ij}). \quad (3)$$

По формуле (4) рассчитывается вероятность достоверного контроля всего агрегата (при условии независимости контроля параметров его элементов) [6, 7]:

$$P = \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^k (1 - p_{ij}) \right]. \quad (4)$$

Таким образом, в формализованном виде задачу по формированию оптимального набора МНК методом дискретного программирования можно представить следующим образом.

При решении прямой задачи:

$$P \rightarrow \max \quad (5)$$

при ограничении

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij} \leq C_{\Sigma_{\text{пр}}}. \quad (6)$$

При решении обратной задачи:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij} \rightarrow \min \quad (7)$$

при ограничении

$$P \geq P_{\text{тр}}. \quad (8)$$

Оптимизация набора МНК в данном случае проводится следующим образом [6, 7].

1. По формуле (3) для каждого контролируемого элемента агрегата рассчитывается значение p_i .

2. Через частные производные по формуле (9) рассчитывается коэффициент влияния i -го элемента агрегата при контроле j -м МНК:

$$k_{ij} = \frac{\partial p_i}{\partial p_{ij}} p_{ij}. \quad (9)$$

3. По формуле (10) рассчитывается относительная стоимость контроля i -го элемента агрегата j -м МНК:

$$\overline{C}_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^m C_{ij}}. \quad (10)$$

4. По формуле (11) рассчитывается относительный коэффициент влияния i -го элемента агрегата при контроле j -м МНК:

$$\overline{k}_{ij} = \frac{k_{ij}}{C_{ij}}. \quad (11)$$

5. Средство НК с наименьшим относительным коэффициентом влияния удаляется из первоначального набора, и осуществляется пересчет значений P и $\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij}$ при новом составе

МНК. При этом, если $\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij} > C_{\Sigma_{\text{тр}}}$ (в случае решения прямой задачи) или $P > P_{\text{тр}}$ (в случае решения обратной задачи), представленная выше итерация (п. 1–5) повторяется.

При решении обратной задачи, когда минимизируется стоимость проведения диагностических мероприятий агрегата при требуемой достоверности контроля его ТС, налицо противоречие между ограничением в математической модели (8) и условием исключения МНК из текущего набора в процессе итеративного отбора (п. 5). При таком подходе весь процесс оптимального комплексирования представленным способом некорректен, так как противоречит поставленной задаче. В данном случае процесс оптимизации останавливается фактически только тогда, когда текущая вероятность достоверного контроля ТС агрегата P станет меньше $P_{\text{тр}}$.

При решении прямой задачи следует использовать симплекс-метод линейного программирования, так как целевую функцию для определения глобального экстремума можно представить в виде линейного отображения в n -мерном пространстве как сумму произведений:

$$W(p) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m p_{ij} g_{ij}. \text{ При этом управляемые параметры } g_{ij} \text{ будут принадлежать множеству,}$$

которое задается системой линейных неравенств.

Таким образом, математическая модель прямой задачи оптимального комплексирования МНК примет вид

$$W(p) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m p_{ij} g_{ij} \rightarrow \max \quad (12)$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij} g_{ij} \leq C_{\Sigma_{\text{тр}}}, \\ g_{ij} \in \{0,1\}, \quad j \in [1,k], \quad i \in [1,m], \\ \sum_j g_{ij} p_{ij} \geq \max(p_i), \quad i \in [1,m]. \end{cases} \quad (13)$$

Очевидно, что при такой формализации задачи оптимальный план решения для целевой функции $W(p)$ обеспечит тенденцию к максимизации значения P ($P \rightarrow \max$).

Последнее условие в ограничениях (13) является гарантией того, что, хотя бы один МНК будет задействован для контроля любого i -го параметра агрегата. Кроме того, данное условие не позволит сформировать оптимальный план решения с наименьшими значениями p_{ij} для каждого контролируемого элемента агрегата (при условии, что он контролируется несколькими МНК с различными p_{ij}).

Для решения обратной задачи симплекс-метод уже не применим, так как в процессе нахождения оптимального плана для целевой функции, которая задается сложным (нелинейным) отношением, необходимо вычислять истинные значения вероятности достоверного контроля всего агрегата P (для сравнения с $P_{\text{тр}}$). Поэтому в данном случае целесообразно использовать метод обобщенного понижающего градиента. Математическая модель обратной задачи оптимального комплексирования при этом будет выглядеть следующим образом:

$$W(C) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij} g_{ij} \rightarrow \min \quad (14)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^k (1 - p_{ij} g_{ij}) \right] \geq P_{\text{тр}}, \\ g_{ij} \in \{0, 1\}, \quad j \in [1, k], \quad i \in [1, m], \\ \sum_j^k g_{ij} p_{ij} > 0, \quad i \in [1, m]. \end{cases} \quad (15)$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведем оптимальное комплексирование МНК для диагностирования параметров ТС элементов насосного агрегата СК и проанализируем полученные результаты.

В ходе анализа конструктивных особенностей НА были определены возможные дефекты, служащие причиной отказов:

- потеря прочности фундамента;
- аварийный отказ в результате трещины в корпусе агрегата;
- разрушение подшипника электродвигателя;
- разрушение вала электродвигателя;
- разрушение соединительной муфты.

На основании этого были выбраны требующие повышенного контроля типовые элементы НА, определен и поставлен им в соответствие первоначальный набор МНК, посредством которого можно провести полноценную диагностику данных элементов:

- метод акустической эмиссии (АЭ);
- ультразвуковой контроль (УЗК);
- визуально-измерительный контроль (ВИК);
- тепловизионный контроль (ТВ);
- виброакустическая диагностика (ВД).

Следует отметить, что при формировании первоначального набора МНК для измерения критически значимых диагностируемых параметров выбранного ОК необходимо включать в его состав все доступные средства и МНК, которые могут быть использованы при проведении диагностических мероприятий.

В табл. 1 приведены данные по основным типовым элементам НА, применяемым для их контроля методами, а также номинальным оценкам вероятностей достоверного измерения параметров используемыми МНК и округленным значениям стоимости проведения диагностических мероприятий [10].

Таблица 1

Типовые элементы НА СК, МНК и их характеристики

№ п/п	Элементы	Количество элементов	Определяющий отказ процесс	МНК	Номинальная оценка достоверности контроля	Оценка стоимости контроля, руб.
1	Фундамент	1	Разупрочнение	УЗК	0,94	112
				ВИК	0,90	439
2	Корпус	1	Хрупкое растрескивание	АЭ	0,90	1000
				ВИК	0,90	40
				УЗК	0,94	112
3	Подшипник	4	Износ	АЭ	0,90	1000
				ТВ	0,96	780
				ВД	0,97	895
4	Вал (ротор)	1	Износ	ВД	0,97	895
				АЭ	0,90	1000
				ТВ	0,96	780
				ВИК	0,90	40
5	Муфта	1	Износ	УЗК	0,94	112
				ВИК	0,90	40
				ВД	0,97	895
				АЭ	0,90	1000
				ТВ	0,96	780

Представим пошагово процесс подготовки данных для оптимального комплексирования МНК при оценке ТС НА СК.

Шаг 1. Проводим детализацию элементов контроля по дефектам и строим матрицу вероятностей достоверного контроля дефектов агрегата (табл. 2). При этом под достоверностью контроля следует понимать не только установление факта наличия неисправности в каком-либо узле НА, но и определение ее причины.

Обратим внимание, что не все значения вероятностей для МНК в табл. 2 (закрашенные ячейки) совпадают с номинальными значениями вероятностей в табл. 1. Это связано с тем, что при формировании второй таблицы применялся экспертный подход. При этом учитывались такие факторы, как условия применения МНК, доступность элемента контроля для измерений, возможности МНК для выявления того или иного дефекта в конкретном типовом элементе агрегата и т. п. Например, для метода УЗК, чтобы достоверно установить факт коррозионных процессов, требуется качественная очистка поверхности и контактная жидкость. Визуально-измерительным контролем не всегда можно полностью выявить дефекты корпуса НА (глубинное хрупкое растрескивание, межкристаллитную коррозию). Кроме того, такие методы как ТВ и ВД, одновременно проводят измерения и получают данные для системы «подшипники–вал–муфта» (ячейки с курсивным шрифтом в табл. 2), поэтому достоверно локализовать причину неисправности весьма затруднительно. В данном случае вполне логично разделить номинальные значения вероятностей достоверного контроля этих методов на шесть (в соответствии с количеством элементов в системе «подшипники–вал–муфта», принимая во внимание, что подшипников в этой системе четыре штуки).

Таблица 2

Вероятности достоверного контроля дефектов агрегата

МНК	Типовые элементы насосного агрегата									
	Фундамент		Корпус			Подшипники	Вал	Муфта		
	Дефекты типовых элементов									
	Несплошности, трещины наружные	Несплошности, трещины в объеме	Хрупкое растрескивание	Коррозия (внешняя)	Межкристаллитная коррозия	Износ	Износ	Износ	Коррозия (внешняя)	Межкристаллитная коррозия
УЗК	0,94	0,94	0,94	0,50	0,50	0	0,94	0,94	0,50	0,50
ВИК	0,90	0	0,50	0,90	0,50	0	0,20	0,50	0,90	0,50
АЭ	0	0	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
ТВ	0	0	0	0	0	0,16	0,16	0,16	0	0
ВД	0	0	0	0	0	0,16	0,16	0,16	0	0
p_i	0,994	0,940	0,997	0,995	0,975	0,929	0,997	0,998	0,995	0,975
$P = 0,810$										

Нулевые значения в ячейках указывают на то, что данный МНК принципиально не может использоваться для контроля соответствующего параметра типового элемента.

Шаг 2. Строим матрицу стоимостей использования МНК для контроля НА (табл. 3). При этом учитываем количество параметров, контролируемых одновременно одним диагностическим методом.

Таблица 3

Стоимости использования МНК для контроля типовых элементов НА (руб.)

МНК	Типовые элементы насосного агрегата									
	Фундамент		Корпус			Подшипники	Вал	Муфта		
	Дефекты типовых элементов									
	Несплошности, трещины наружные	Несплошности, трещины в объеме	Хрупкое растрескивание	Коррозия (внешняя)	Межкристаллитная коррозия	Износ	Износ	Износ	Коррозия (внешняя)	Межкристаллитная коррозия
УЗК	56,0	56,0	37,3	37,3	37,3	0	112	37,3	37,3	37,3
ВИК	439,0	0	13,3	13,3	13,3	0	40	13,3	13,3	13,3
АЭ	0	0	333,3	333,3	333,3	1000	1000	333,3	333,3	333,3
ТВ	0	0	0	0	0	260	260	260	0	0
ВД	0	0	0	0	0	298,3	298,3	298,3	0	0
Общая стоимость работ: $\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ij} g_{ij} = 6681,3$ руб.										

Шаг 3. Строим матрицу G_{nm} начального плана использования МНК, заменяя в табл. 3 (или в табл. 2) значения ненулевых ячеек на единицу:

$$G_{nm} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{16}$$

Номера столбцов и номера строк в матрице (16) соответствуют табл. 3.

Далее проведем комплексирование МНК для решения прямой задачи – максимизации вероятности достоверного измерения параметров ТС ОК при заданной стоимости проведения диагностических работ. При этом для оптимизации набора МНК будем использовать симплекс-метод линейного программирования и метод дискретного программирования.

В табл. 4 и на рис.1 представлены результаты комплексирования при разных значениях заданной стоимости проведения работ ($C_{\Sigma_{\text{пр}}}$): левые значения в таблице по каждой колонке соответствуют данным, полученным при оптимизации симплекс-методом, а правые – методом дискретного программирования.

Таблица 4

Результаты комплексирования МНК при заданной стоимости проведения работ

$C_{\Sigma_{\text{пр}}}$, руб.	$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij} g_{ij}$, руб.		P		Количество МНК		G_{km}	
5300	5266,4	5231,4	0,78	0,78	26	26	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
5000	4966,4	4898,1	0,78	0,76	24	25	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
4300	4266,4	3783,5	0,75	0,71	25	21	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
4000	3966,4	3783,5	0,74	0,71	23	21	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0	1 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
3300	3234,1	3046,2	0,55	0,66	22	19	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0	1 1 1 0 1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
2500	2494,2	2452,9	0,50	0,60	20	17	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 1 0 1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0
2000	1900,9	1685,1	0,38	0,25	18	11	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0	1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0

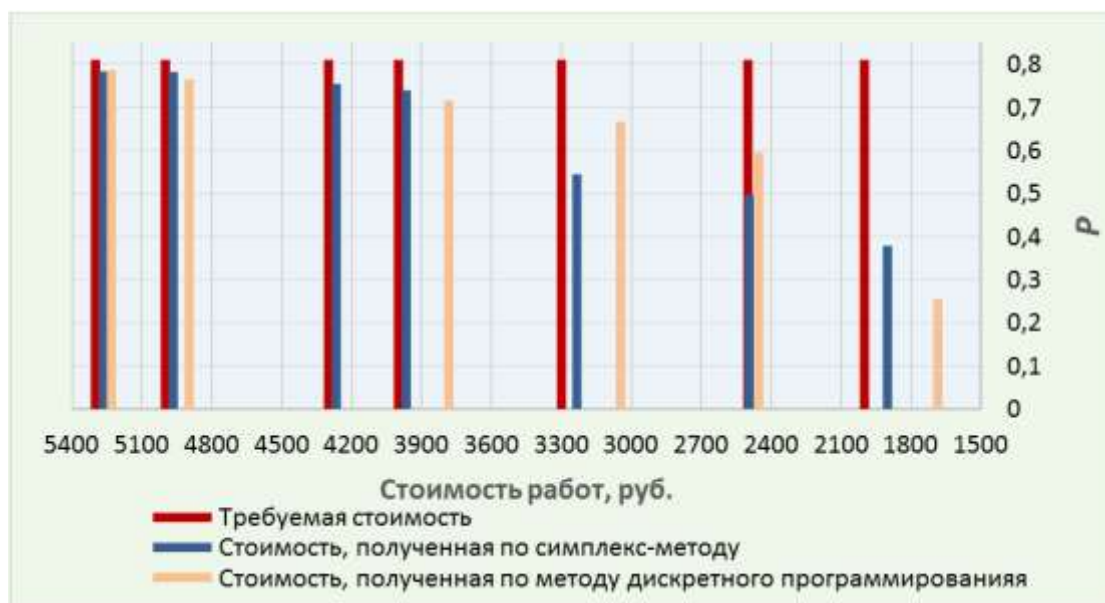


Рис. 1. Результаты комплексирования МНК при заданной стоимости проведения работ

Проанализируем представленные результаты комплексирования МНК.

В целом оба метода оптимизации достаточно эффективны для решения прямой задачи по комплексированию МНК и могут успешно применяться при составлении оптимального плана проведения мероприятий по контролю ТС. Однако при достаточно большом количестве средств НК в первичном плане проведения диагностических мероприятий (по несколько МНК на каждый элемент контроля) симплекс-метод выглядит предпочтительнее для оптимизации, так как в его основе лежит принцип последовательного улучшения плана, т. е. во время выполнения алгоритма симплекс-метода ищется не единственное решение (как в методе дискретного программирования), а множество допустимых решений, из которых затем выбирается оптимальный вариант. При этом обеспечивается лучшая сходимость при заданных ограничениях. На рис.1 видно, что значения стоимости проведения измерительных работ, полученные при комплексировании МНК посредством симплекс-метода, практически совпадают с заданной стоимостью ($C_{\Sigma_{тр}}$) в отличие от значений стоимости, полученных в

результате применения метода дискретного программирования. На практике, как правило, прослеживается следующая корреляция: чем ближе полученная стоимость проведения диагностических мероприятий к $C_{\Sigma_{тр}}$, тем больше средств НК задействовано для контроля

критически значимых параметров элементов агрегата, что в итоге способствует повышению вероятности достоверного выявления его фактического технического состояния (P). Из табл. 4 видно, что значительная экономия средств ($6681,3 - 4266,4 = 2414,9$ руб.) при приемлемом уровне снижения P (до 0,75) может быть обеспечена планом использования МНК для контроля технического состояния НА, полученным в результате оптимального комплексирования на базе симплекс-метода. Комплексирование же с использованием метода дискретного программирования при практически таком же значении P (0,76) даст значительно меньший экономический эффект – всего в 1783,2 руб. ($6681,3 - 4898,1 = 1783,2$ руб.). При этом и в том, и в другом случае использован набор МНК из 25 средств.

Кроме того, симплекс-метод является более гибким методом для решения задач оптимального комплексирования в отличие от метода дискретного программирования, так как позволяет задавать дополнительные ограничения в исходной математической модели, например, по количеству МНК для контроля определенного параметра агрегата. Наконец,

алгоритм симплекс-метода (как и метода обобщенного понижающего градиента) реализован во многих программных продуктах, в том числе и в MS Excel, что делает его более доступным для использования.

Для решения обратной задачи – минимизации стоимости проведения диагностических работ при заданном значении вероятности достоверного измерения параметров ТС ОК – оптимизация первоначального набора МНК по методу обобщенного понижающего градиента в силу причин, указанных выше, предпочтительнее, чем оптимизация по методу дискретного программирования. Ключевой фактор данного утверждения – работа алгоритма метода дискретного программирования, поскольку он реализован таким образом, что процесс оптимизации набора МНК останавливается фактически только тогда, когда текущая вероятность достоверного контроля ТС агрегата P станет меньше $P_{тр}$, в отличие от алгоритма метода обобщенного понижающего градиента, при работе которого граничные условия соблюдаются строго.

В табл. 5 и 6 представлены результаты оптимального комплексования МНК для НА при $P_{тр} = 0,75$, выполненные по методу обобщенного понижающего градиента и методу дискретного программирования соответственно.

Таблица 5

**Результаты оптимального комплексования МНК
по методу обобщенного понижающего градиента**

МНК	Типовые элементы насосного агрегата									
	Фундамент		Корпус			Подшипники	Вал	Муфта		
	Дефекты типовых элементов									
	Несплошности, трещины наружные	Несплошности, трещины в объеме	Хрупкое растрескивание	Коррозия (внешняя)	Межкристаллитная коррозия	Износ	Износ	Износ	Коррозия (внешняя)	Межкристаллитная коррозия
УЗК	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1
ВИК	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
АЭ	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
ТВ	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ВД	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$P = 0,750$										
Общая стоимость работ: $\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij} g_{ij} = 4165,2$ руб.										
Количество МНК = 21										

Из данных, представленных в табл. 5 и 6, видно, что оптимальное комплексование МНК по методу обобщенного понижающего градиента обеспечило заданное значение вероятности достоверного измерения параметров ТС НА ($P_{тр} = 0,75$). Комплексование МНК по методу дискретного программирования сформировало набор из такого же количества МНК (21 средство), но при этом значение P оказалось значительно ниже значения $P_{тр}$ ($P = 0,716$). Таким образом, данный пример показывает очевидные преимущества метода обобщенного понижающего градиента перед методом дискретного программирования при решении обратной задачи оптимального комплексования МНК.

Чтобы исключить противоречие по выполнению граничного условия в методе дискретного программирования, предлагается модифицировать его алгоритм следующим образом: ес-

ли после очередной итерации алгоритма значение P становится ниже $P_{тр}$, то следует в качестве решения оставлять набор МНК, полученный на предыдущей итерации.

Таблица 6

**Результаты оптимального комплексирования МНК
по методу дискретного программирования**

МНК	Типовые элементы насосного агрегата									
	Фундамент		Корпус			Подшипники	Вал	Муфта		
	Дефекты типовых элементов									
	Несплошности, трещины наружные	Несплошности, трещины в объеме	Хрупкое растрескивание	Коррозия (внешняя)	Межкристаллитная коррозия	Износ	Износ	Износ	Коррозия (внешняя)	Межкристаллитная коррозия
УЗК	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1
ВИК	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
АЭ	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1
ТВ	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ВД	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$P = 0,716$										
Общая стоимость работ: $\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m C_{ij} g_{ij} = 3783.5$ руб.										
Количество МНК = 21										

Отметим, что оба метода являются универсальными, т. е. применимы для решения как прямой, так и обратной задачи оптимального комплексирования. Недостатком метода обобщенного понижающего градиента является значительное время выполнения алгоритма, особенно в случае его применения для оптимизации набора МНК при планировании диагностических мероприятий крупных ОНКИ с большим количеством типовых элементов, подлежащих контролю их ТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили:

– на основе оптимизационных алгоритмов симплекс-метода и метода обобщенного понижающего градиента разработать математические модели для решения прямой и обратной задачи по формированию оптимальных наборов средств и МНК при диагностировании текущего ТС технологического оборудования СК РКК;

– провести сравнительный анализ эффективности использования метода дискретного программирования, симплекс-метода и метода обобщенного понижающего градиента при планировании задействования МНК для проведения диагностических мероприятий с соблюдением требуемых ограничений по стоимости проведения работ и уровню достоверности оценивания ТС ОК. На практическом примере по формированию оптимальных наборов МНК для оценивания ТС элементов НА СК показаны преимущества симплекс-метода и метода обобщенного понижающего градиента перед методом дискретного программирования для решения такого рода задач.

Предложенные математические модели по формированию оптимального плана задействования МНК применимы для всего парка технологического оборудования СК РКК и позволя-

ют обеспечить разумный баланс между требуемой (достаточной) вероятностью достоверного контроля ТС ОНКИ и стоимостью проведения соответствующих работ, что особенно важно как при оценивании остаточного ресурса технологического оборудования СК, функционирующего за пределами назначенных показателей ресурса, так и при проведении мероприятий безопасного сопровождения пусков РКН на эксплуатируемых и модернизируемых СК РКК.

Список используемых источников

1. Особенности проведения обследования технического состояния строительных конструкций стартовых космических комплексов с последующим проведением поверочных расчетов для обеспечения их безотказной эксплуатации или реконструкции / Ю.Е. Тупицин [и др.]. // *Не разрушающий контроль композиционных материалов: сб. трудов 1-й дистанционной научно-технической конференции НККМ-2014 «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов»*. – СПб.: изд-во СВЕН, 2015. – С. 129–138.
2. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 12 с.
3. Методики оценивания эффективности функционирования системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры, находящихся за пределами назначенных показателей ресурсов: науч.-техн. отчет. – Юбилейный: НИИ КС, 2011. – 60 с.
4. Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring / P. Kot [et al.] // *Applied Sciences*. – 2021. – 11(6). – 2750. – URL: <https://doi.org/10.3390/app11062750> (дата обращения: 12.07.2021).
5. Rens K.L., Wipf T.J., Klaiber F.W. Review of nondestructive evaluation techniques of civil infrastructure // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. – 1997. – N 11. – P. 152–160.
6. Алгоритм оптимизации комплекса средств инструментального контроля для диагностики объектов наземной космической инфраструктуры / В.В. Букрин [и др.] // *Известия высших учебных заведений*. – 2012. – № 1 (21). – С. 72–81.
7. Обоснование оптимального набора методов неразрушающего контроля для получения требуемой информации о техническом состоянии объектов / Н.Д. Аникейчик [и др.] // *Труды научно-технического семинара «Не разрушающий контроль объектов наземной космической инфраструктуры»*. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 2004. – С. 79–85.
8. Данциг Дж. Линейное программирование. Его применения и обобщения. – М.: Прогресс, 1966. – 590 с.
9. Шор Н. Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. – Киев: Наукова Думка, 1979. – 200 с.
10. Единые нормы времени и расценки на техническое диагностирование оборудования, сооружений и трубопроводов / ООО «СПКТБ НЕФТЕГАЗМАШ», 2021. – 91 с.

А.И. Башилов*,
доктор технических наук, профессор;

М.В. Огороков**,
кандидат технических наук;

Б.И. Сухорученков**,
доктор технических наук, профессор

*АО «Корпорация «Московский институт теплотехники», г. Москва.

** Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха Московской обл.

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОГРАНИЧЕННОГО ПЕРИОДА ОТРАБОТКИ

В статье предложен метод повышения точности статистического оценивания переменных показателей безотказности (ПБ) восстанавливаемых технических систем ракетно-космической техники по результатам отработки. Метод основан на использовании математической модели динамики интенсивности отказов восстанавливаемых технических систем с учетом возможных невыявленных (скрытых) дефектов и статистического метода несмещенных оценок, который обеспечивает более высокую точность оценивания показателей безотказности технических систем по результатам ограниченного периода отработки.

Ключевые слова: восстанавливаемая техническая система, динамика показателей безотказности, плотность вероятности оценок, метод несмещенных оценок.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность технических систем (ТС) является одним из важнейших свойств, которая включает безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, восстанавливаемость и готовность [2]. Для восстанавливаемых ТС ракетно-космической техники, функционирующих непрерывно или отдельными циклами, определяющим свойством надежности является безотказность, включающая несколько показателей, основными из которых являются: вероятность безотказной работы (ВБР) в течение заданного (требуемого) периода целевого использования, интенсивность отказов (ИО) и средняя наработка между отказами (СНО) [9, 11]. Для приема таких ТС в эксплуатацию осуществляется контроль показателей безотказности (ПБ) ТС по результатам экспериментальной отработки [9, 10]. Подход, используемый в середине прошлого века, по обеспечению высокой надежности ТС за счет закладывания многократного запаса прочности элементов и ТС в целом для современных сложных ТС не приемлем. Это связано с высокой стоимостью создания ТС и ограниченными массогабаритными показателями. Для обеспечения выполнения современными ТС поставленных задач требуются высокие значения ПБ в течение гарантированного (требуемого, заданного) периода эксплуатации, которые оцениваются по результатам отработки. Основные трудности, снижающие точность и достоверность оценивания ПБ ТС, возникают из-за различного рода возможных дефектов. Поэтому важной задачей в период отработки является проведение мероприятий по выявлению и устранению возможных дефектов в ТС и их подсистемах. Однако из-за ограниченных временных и технико-экономических ресурсов, выделяемых на создание ТС, полностью выявить и исключить дефекты не всегда удается.

Для повышения точности и достоверности оценок показателей безотказности ТС в данных условиях необходимо иметь адекватные математические модели динамики ПБ восстанавливаемых ТС, которые позволяют учитывать возможные дефекты ТС, а также точный метод

оценивания параметров моделей ПБ по результатам экспериментальной отработки. Для этого приняты следующие допущения и ограничения:

- отработка ТС проводится в течение достаточного периода, необходимого для достоверного подтверждения требований к ПБ;
- время безотказной работы (ВБР) ТС соответствует экспоненциальному распределению;
- проявления возможных дефектов ТС являются взаимно независимыми событиями, проведения доработок они полностью устраняются;
- если при отработке ТС причина отказа не установлена, то отказ признается случайным;
- после отработки ТС может остаться R невыявленных дефектов.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ

Для контроля безотказности восстанавливаемых ТС планируется отработка в течение периода S , которая может проводиться непрерывно или отдельными (равными) циклами.

Если в ТС отсутствуют дефекты, то ее безотказность характеризуется ИО Λ_c . Если в ТС имеется Q дефектов, то каждый дефект имеет интенсивность проявления дефекта (ИПД) Λ_q , $q = 1, \dots, Q$. При функционировании ТС, с начала ее работы, могут происходить отказы в моменты t . После отказов работоспособность ТС восстанавливается и ТС снова продолжает работу. Если причина отказа ТС в момент времени $t = t_{\text{сл}}$ не была установлена, то такой отказ признается случайным (зачетным). Если отказ ТС произошел в момент времени $t = t_q$ из-за дефекта (конструктивного или производственного), то соответствующий q -й дефект полностью устраняется за счет проведенных эффективных доработок, при этом ИПД становится равной нулю. Обозначим число выявленных и устраненных дефектов в виде $Q_B \leq Q$. Некоторые дефекты ТС могут остаться невыявленными даже после длительного периода отработочных испытаний. Обозначим число таких дефектов в виде $R = Q - Q_B$, а их ИПД в виде Λ_r , $r = 1, 2, \dots, R$. При принятых обозначениях и допущениях математическая модель динамики суммарной ИО ТС с учетом возможных дефектов в период отработочных испытаний имеет следующий вид:

$$\Lambda_{\Sigma}(t) = \Lambda_c + \sum_{q=1}^{Q_B} \Lambda_q(t) + \sum_{r=1}^R \Lambda_r, \quad (1)$$

где $\Lambda_q(t) = \Lambda_q$ при $t \leq t_q$; $\Lambda_q(t) = 0$ при $t > t_q$.

Изменение СНО ТС в процессе отработки строится на основе (1) по зависимости

$$T_{\text{CP}}(t) = 1 / \Lambda_{\Sigma}(t). \quad (2)$$

Если отработка ТС производится в течение суммарного периода S , то ВБР восстанавливаемой ТС в течение заданного (требуемого) периода выполнения целевой задачи (ЦЗ) $T_{\text{ЦЗ}}$ в период отработки при $t \leq S$ определяется по зависимости

$$P_c(T_{\text{ЦЗ}} / t) = \exp \left(- \int_t^{t+T_{\text{ЦЗ}}} \Lambda_{\Sigma}(t) dt \right). \quad (3)$$

Если параметры моделей (1)–(3) ПБ ТС неизвестны, то их можно оценить по результатам отработочных испытаний ТС на основе статистических методов [1, 3–7].

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОТРАБОТКИ

Для оценивания ИО ТС и ИПД рассмотрим возможные результаты (события) отработки восстанавливаемой ТС в течение суммарного периода S : моменты случайных отказов t_i ,

$i = 1, \dots, m$, моменты отказов из-за дефектов $t_q, q = 1, \dots, Q_B$, безотказная работа восстанавливаемой ТС в течение периода после последнего случайного отказа $T = S - t_m$ и возможные невыявленные после периода S дефекты $r = 0, 1, \dots, R$. В [6] приведено обоснование метода несмещенных оценок (МНО), на основе которого обеспечивается наибольшая точность и достоверность оценивания ПБ ТС по результатам данных, полученных при экспериментальной обработке. Для использования данного метода необходимо рассмотреть вероятности возможных результатов испытаний при известных ИО ТС, ИПД и R . Плотности вероятности моментов случайных отказов и отказов из-за дефектов от начала обработки ТС определяются на основе экспоненциального распределения:

$$f(t_i) = \Lambda_C \cdot e^{-\Lambda_C t_i}; \quad f(t_q) = \Lambda_q \cdot e^{-\Lambda_q t_q}, \quad i = 1, \dots, m, \quad q = 1, \dots, Q_B. \quad (4)$$

ВБР восстанавливаемой ТС в течение периода $T = S - t_m$ и вероятность не проявления возможного r -го дефекта в течение периода S определяются по зависимостям:

$$P_C(T) = e^{-\Lambda_C T}; \quad P_r(S) = e^{-\Lambda_r S}, \quad r = 1, 2, \dots, R. \quad (5)$$

При всех возможных результатах обработки ТС априорная ПВ всех моментов отказов и априорная вероятность безотказной работы ТС и не проявления дефектов с учетом взаимной независимости результатов обработки определяются с учетом (4) и (5) по зависимостям:

$$f(\{t_i\}, \{t_q\}) = \prod_{i=1}^m \Lambda_C \cdot e^{-\Lambda_C t_i} \cdot \prod_{q=1}^{Q_B} \Lambda_q \cdot e^{-\Lambda_q t_q}; \quad (6)$$

$$\text{Вер}(T, S) = e^{-\Lambda_C T} \cdot \prod_{r=0}^R e^{-\Lambda_r S}. \quad (7)$$

Если показатели $\Lambda_C, \Lambda_q, \Lambda_r$ неизвестны, но получены результаты обработки ТС, то в соответствии с МНО [6] ПВ возможных оценок ИО и ИПД, которые будем обозначать в виде $\lambda_C, \lambda_q, \lambda_r$ соответственно, пропорциональны ПВ (6) и вероятности (7), в которые подставляются данные, полученные при обработке, а вместо неизвестных параметров модели (1) подставляются их возможные оценки. В результате получаются следующие зависимости для ПВ возможных оценок неизвестных параметров модели (1) с учетом равенства $T = S - t_m$:

$$f_1(\lambda_C, \{\lambda_q\}) = k_1 \prod_{i=1}^m \lambda_C \cdot e^{-\lambda_C t_i} \cdot \prod_{q=1}^{Q_B} \lambda_q \cdot e^{-\lambda_q t_q}; \quad (8)$$

$$f_2(\lambda_C, \{\lambda_r\}) = k_2 e^{-\lambda_C (S - t_m)} \cdot \prod_{r=1}^R e^{-\lambda_r S}, \quad (9)$$

где k_1, k_2 – нормирующие коэффициенты.

ПВ оценок ИО ТС и ИПД можно определить с учетом всех результатов обработки на основе произведения ПВ (8) и (9):

$$f_\Sigma(\lambda_C, \{\lambda_q\}, \{\lambda_r\}) = k_\Sigma \prod_{i=1}^m \lambda_C \cdot e^{-\lambda_C t_i} \cdot \prod_{q=1}^{Q_B} \lambda_q \cdot e^{-\lambda_q t_q} \times e^{-\lambda_C (S - t_m)} \cdot \prod_{r=1}^R e^{-\lambda_r S}, \quad (10)$$

где k_Σ – нормирующий суммарный коэффициент.

Проведенные исследования структуры зависимости (10) показали, что ее можно записать в виде произведения отдельных (независимых) ПВ возможных оценок ИО ТС и ИПД в следующем виде:

$$f_\Sigma(\lambda_C, \{\lambda_q\}, \{\lambda_r\}) = f_C(\lambda_C) \cdot \prod_{q=1}^{Q_B} f_q(\lambda_q) \cdot \prod_{r=0}^R f_r(\lambda_r). \quad (11)$$

Здесь автономные ПВ оценок параметров строятся по зависимостям:

$$f_C(\lambda_C) = k_C e^{-\lambda_C (S - t_m)} \prod_{i=1}^m \lambda_C \cdot e^{-\lambda_C t_i}; \quad (12)$$

$$f_q(\lambda_q) = k_q \lambda_q \cdot e^{-\lambda_q t_q}, \quad q = 1, \dots, Q_B; \quad (13)$$

$$f_r(\lambda_r) = k_r e^{-\lambda_r \cdot S}, r = 1, 2, \dots, R, \quad (14)$$

где k_C, k_q, k_r – нормирующие коэффициенты, которые вычисляются по зависимостям:

$$k_C^{-1} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_C \cdot (S-t_m)} \prod_{i=1}^m \lambda_C \cdot e^{-\lambda_C \cdot t_i} d\lambda_C; \quad (15)$$

$$k_q^{-1} = \int_0^{\infty} \lambda_q \cdot e^{-\lambda_q \cdot t_q} d\lambda_q, q = 1, \dots, Q_B; \quad (16)$$

$$k_r^{-1} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_r \cdot S} d\lambda_r, r = 1, 2, \dots, R. \quad (17)$$

После проведенных преобразований зависимостей (11)–(17) получаются простые конечные зависимости для ПВ возможных оценок ИО ТС и ИПД:

$$f(\lambda_C) = S^{m+1} (m!)^{-1} \lambda_C^m e^{-\lambda_C \cdot S}; \quad (18)$$

$$f(\lambda_q) = t_q^2 (m!)^{-1} \lambda_q e^{-\lambda_q \cdot t_q}, q = 1, \dots, Q_B; \quad (19)$$

$$f(\lambda_r) = S e^{-\lambda_r \cdot S}, r = 1, 2, \dots, R. \quad (20)$$

ПВ оценок ИО, построенные по зависимостям (18)–(20), при периоде отработки $S = 1000$ ч показаны на рис. 1.

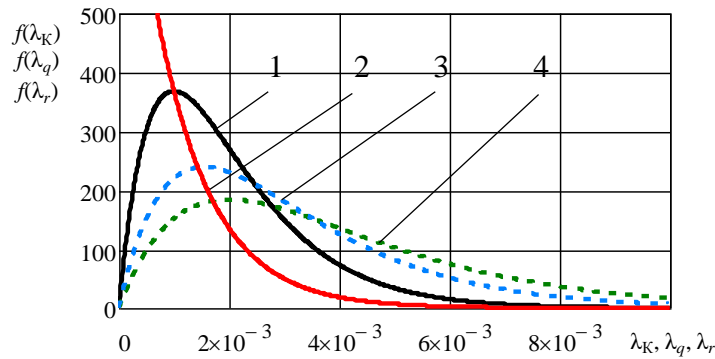


Рис. 1. Вид ПВ возможных оценок ИО ТС:
1 – $f(\lambda_C)$ при $m = 1$; 2 – $f(\lambda_{r1})$ при $S = 1000$ ч;
3 – $f(\lambda_{q1})$ при $t_{q1} = 500$ ч, 4 – $f(\lambda_{q2})$ при $t_{q2} = 650$ ч

На основе построенных по зависимостям (18)–(20) ПВ оценок параметров модели, определяются их точечные оценки и среднеквадратические отклонения (СКО), которые удовлетворяют требованиям по несмещенности и эффективности даже при ограниченной выборке:

$$\bar{\Lambda}_C = \int_0^{\infty} \lambda_C \cdot f(\lambda_C) d\lambda_C = (m+1) / S; \quad (21)$$

$$\sigma_{\bar{\Lambda}_C}^2 = \int_0^{\infty} (\lambda_C - \bar{\Lambda}_C)^2 \cdot f(\lambda_C) d\lambda_C = (m+1) / S^2; \quad (22)$$

$$\bar{\Lambda}_q = \int_0^{\infty} \lambda_q \cdot f(\lambda_q) d\lambda_q = 2 / t_q, q = 1, \dots, Q_B; \quad (23)$$

$$\sigma_{\bar{\Lambda}_q}^2 = \int_0^{\infty} (\lambda_q - \bar{\Lambda}_q)^2 \cdot f(\lambda_q) d\lambda_q = 2 / t_q^2, q = 1, \dots, Q_B; \quad (24)$$

$$\bar{\Lambda}_r = \int_0^{\infty} \lambda_r \cdot f(\lambda_r) d\lambda_r = 1 / S, r = 1, 2, \dots, R; \quad (25)$$

$$\sigma_{\bar{\lambda}_r}^2 = \int_0^{\infty} (\lambda_r - \bar{\lambda}_r)^2 \cdot f(\lambda_r) d\lambda_r = 1/S^2, r = 1, 2, \dots, R. \quad (26)$$

Интервальные оценки неизвестных параметров модели (1) можно получить численным методом, если проинтегрировать ПВ возможных оценок (18)–(20) [6, 7].

Анализ модели (1) показывает, что оценка суммарной ИО ТС зависит от оценок ИО ТС и ИПД, а также от числа возможных скрытых дефектов, вероятности которых определяются по зависимости [8]:

$$\text{Вер}(R_K) = k_R e^{-\lambda_c \cdot T} \cdot e^{-\bar{\lambda}_r \cdot S \cdot R_K} = e^{-R_K} / \sum_{R_K=0}^{R_M} e^{-R_K}. \quad (27)$$

где R_M – максимально возможное число невыявленных дефектов.

Из (27) видно, что оценки вероятностей $\text{Вер}(R_K)$ зависят только от числа возможных дефектов R_M , значения которых можно определить на основе априорных данных об отработке и эксплуатации аналогов и прототипов ТС.

Оценки динамики ИО и ВБР ТС в течение периода выполнения целевой задачи (ЦЗ) $T_{ЦЗ}$ в процессе отработки можно определять по зависимостям (1) и (3) при оценках параметров и при различных значениях числа невыявленных дефектов R_K . При $R_K = 0$ получаются оптимистические оценки показателей безотказности ТС. При $R_K \geq 1$ определяются гарантированные оценки. Учитывая, что возможное число невыявленных дефектов имеет разные вероятности, то при оценивании ИО ТС целесообразно использовать математическое ожидание ИПД невыявленных дефектов. Ожидаемая оценка ИПД и ее СКО определяются с учетом оценок вероятностей числа невыявленных дефектов по зависимостям:

$$\bar{\lambda}_{\text{дож}} = \sum_{R_K=0}^{R_M} R_K \cdot \text{Вер}(R_K) \cdot \bar{\lambda}_r = M[R_K] \cdot \bar{\lambda}_r; \quad (28)$$

$$\sigma_{\bar{\lambda}_{\text{дож}}}^2 = (M[R_K])^2 \cdot \sigma_{\bar{\lambda}_r}^2, \quad (29)$$

где $M[R_K]$ – математическое ожидание числа невыявленных дефектов.

Ожидаемые оценки динамики показателей безотказности ТС определяются на основе зависимостей (1), (3) при оценках (21)–(24), а также (28) и (29):

$$\bar{\lambda}_{\Sigma}(t) = \bar{\lambda}_C + \sum_{q=0}^{Q_B} \bar{\lambda}_q(t) + \bar{\lambda}_{\text{дож}}; \quad (30)$$

$$\sigma_{\bar{\lambda}_{\Sigma}(t)}^2 = \sigma_{\bar{\lambda}_C}^2 + \sum_{q=0}^{Q_B} \sigma_{\bar{\lambda}_q(t)}^2 + \sigma_{\bar{\lambda}_{\text{дож}}}^2; \quad (31)$$

$$\bar{P}_C(T/t) = \exp\left(-\int_t^{t+T} \bar{\lambda}_{\Sigma}(t) dt\right). \quad (32)$$

Оценка ожидаемой вероятности выполнения целевой задачи ТС, достигнутой в конце отработки, и ее СКО определяются по методу линеаризации по зависимостям:

$$\bar{P}_C(T_{ЦЗ}) = \exp\left[-(\bar{\lambda}_C + \bar{\lambda}_{\text{дож}})T_{ЦЗ}\right]; \quad (33)$$

$$\sigma_{\bar{P}_C(T_{ЦЗ})}^2 = \bar{P}_C(T_{ЦЗ})^2 T_{ЦЗ}^2 \left(\sigma_{\bar{\lambda}_C}^2 + \sigma_{\bar{\lambda}_{\text{дож}}}^2\right). \quad (34)$$

На основе оценок (33) и (34) осуществляется обоснование решения о соответствии ПВ ТС предъявляемым (заданным) требованиям. Из зависимостей (30)–(34) следует, что при учете возможных невыявленных дефектов оценки показателей безотказности ТС, достигаемых после отработки, и их точность снижаются. Однако если не учитывать возможные дефекты, то возрастает риск заказчика, что при принятии ТС в эксплуатацию ее безотказность не будет соответствовать предъявляемым требованиям.

ДЕМОНСТРАЦИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ТОЧНОСТИ МЕТОДА

Для демонстрации работоспособности и точности изложенного метода рассмотрим следующий пример. Проведена отработка ТС в течение суммарного периода $S = 1000$ ч. При этом зафиксировано 2 отказа в моменты от начала отработки $t_1 = 500$ и $t_2 = 650$ ч. Установлено, что отказы произошли из-за дефектов, которые были устранены путем доработок. Также установлено, что при отработке ТС был зафиксирован один случайный отказ ($m = 1$). Предполагается, что ТС будет использована для работы в течение требуемого периода выполнения ЦЗ $T = 24$ ч. Необходимо оценить динамику ИО ТС и ВБР ТС в процессе отработки с учетом выявленных и возможных невыявленных дефектов, а также достигнутый уровень показателей безотказности ТС.

По зависимостям (21)–(26) вычисляются реализации оценок ИО ТС и ИПД дефектов и их СКО:

$$\hat{\Lambda}_C = 2 / 1000 = 0,002; \quad \sigma_{\hat{\Lambda}_C} = \sqrt{2 / 1000^2} = 0,0014; \quad (35)$$

$$\hat{\Lambda}_{q1} = 2 / 500 = 0,004; \quad \sigma_{\hat{\Lambda}_{q1}} = \sqrt{2 / 500^2} = 0,0028; \quad (36)$$

$$\hat{\Lambda}_{q2} = 2 / 650 = 0,0031; \quad \sigma_{\hat{\Lambda}_{q2}} = \sqrt{2 / 650^2} = 0,0023; \quad (37)$$

$$\hat{\Lambda}_r = 1 / 1000 = 0,001; \quad \sigma_{\hat{\Lambda}_r} = \sqrt{1 / 1000^2} = 0,001. \quad (38)$$

Реализация оценки ожидаемого числа невыявленных дефектов и ожидаемой ИПД оставшихся дефектов и ее СКО определяются при полученных результатах отработки ТС по зависимостям (28) и (29):

$$M[R_K] = 0,58; \quad \hat{\Lambda}_{\text{дож}} = 0,00058; \quad \sigma_{\hat{\Lambda}_{\text{дож}}} = 0,00058. \quad (39)$$

Реализация оценки динамики суммарной ИО ТС с учетом выявляемых и возможных невыявленных (скрытых) дефектов и ее СКО в процессе отработочных испытаний определяется по приведенной математической модели (1) при реализациях оценок параметров (35)–(38) с учетом данных значений в (39). Реализации оценок ИО ТС и их СКО при ожидаемом числе невыявленных дефектов (39) показаны на рис. 2,а.

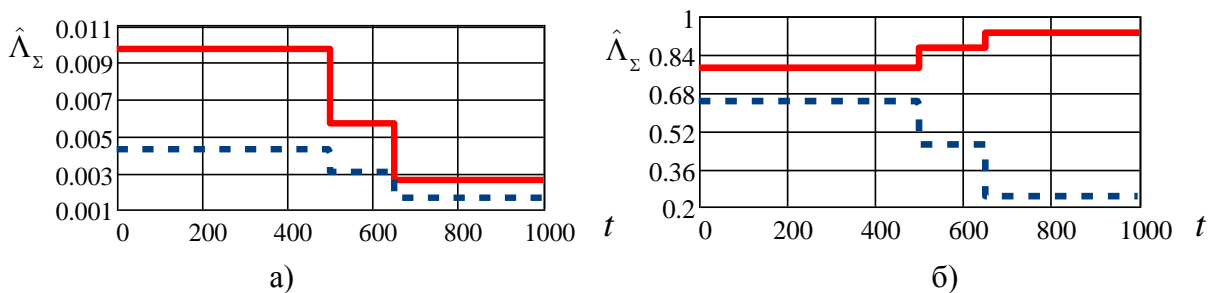


Рис. 2. Значения реализации оценок динамики ИО (а) и ВБР (б) ТС (сплошные линии) и их СКО (пунктирные линии) с учетом невыявленных (скрытых) дефектов

Видно, что точность оценок ИО ТС при увеличении периода отработки возрастает.

Оценка динамики ВБР ТС и ее СКО в течение $T_{ЦЗ} = 24$ ч в процессе отработки определяется по зависимости (3) при возможных оценках динамики ИО ТС, показанных на рис. 2,а. Реализации оценок динамики ВБР ТС и их СКО при ожидаемом ИПД оставшихся дефектов показаны на рис. 2,б.

Анализ рис. 2,б показывает, что точность оценки ВБР ТС к концу отработки увеличивается. Оценки достигнутых показателей безотказности и их СКО можно определить по приведенным зависимостям (30)–(32) при $t = S$, которые равны:

– без учета возможных невыявленных дефектов (при $R_K = 0$):

$$\hat{\Lambda}_C = 2 / 1000 = 0,002; \quad \sigma_{\hat{\Lambda}_C} = \sqrt{2 / 1000^2} = 0,0014;$$

$$\hat{P}_C(24) = \exp(-0,002 \cdot 24) = 0,953; \quad \sigma_{\hat{P}_C(T)} = \hat{P}_C(T) \cdot 24 \cdot 0,0014 = 0,032;$$

– при ожидаемом числе невыявленных дефектов:

$$\hat{\Lambda}_\Sigma = 0,002 + 0,00058 = 0,0026; \quad \sigma_{\hat{\Lambda}_\Sigma}^2 = \sigma_{\hat{\Lambda}_C}^2 + 0,00058^2; \quad \sigma_{\hat{\Lambda}_\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\hat{\Lambda}_\Sigma}^2} = 0,0045;$$

$$\hat{P}_C(24) = \exp(-\hat{\Lambda}_\Sigma \cdot 24) = 0,94; \quad \sigma_{\hat{P}_C(24)} = \hat{P}_C(24) \cdot 24 \cdot \sigma_{\hat{\Lambda}_\Sigma} = 0,102.$$

Анализ полученных результатов показал, что возможные оценки ПБ ТС с учетом невыявленных (скрытых) дефектов снижаются, а их погрешности возрастают. В конце отработки оценки ПБ ТС с учетом возможных невыявленных (скрытых) дефектов ухудшаются примерно в 1,3 раза. Поэтому, если учитывать возможные невыявленные дефекты, то оценки достигаемых при отработке показателей безотказности ТС заметно ухудшаются. Если при оценивании достигнутых показателей безотказности ТС принять $R_K = 0$, то ожидаемый риск заказчика, что оценки ИО и ВБР ТС при принятии системы в эксплуатацию будут занижены по сравнению с действительными, определяется на основе вероятностей (27) по зависимости

$$\beta = \text{Вер}(R \geq 1) = \sum_{R=1}^{R_M} \text{Вер}(R) = 1 - \text{Вер}(0). \quad (40)$$

При $R_M = 3$ риск заказчика по зависимости (40) имеет значительный уровень $\beta = 0,27$, пренебрегать которым не следует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Обоснованы математические модели динамики ПБ восстанавливаемых ТС, которые адекватно описывают изменение ПБ в период отработочных испытаний, за счет учета показателей выявляемых и возможных невыявленных (скрытых) дефектов, которые могут остаться из-за ограниченного периода отработки.

2. Предложен точный метод оценивания динамики ПБ восстанавливаемых ТС в период отработочных испытаний, основанный на использовании МНО, обладающего широкими возможностями.

3. На примере показана работоспособность и точность предлагаемого метода оценивания показателей безотказности ТС с учетом дефектов.

Разработанный метод оценивания динамики ПБ может найти широкое применение при контроле безотказности восстанавливаемых ТС по результатам экспериментальной отработки, для которых средства и время на разработку ограничены.

Список используемых источников

1. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия / под ред. Ю.В. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. – 911 с.
2. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 22 с.
3. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности / под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: URSS, 2017 – 382 с.
4. Михайлов В.С., Юрков Н.К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 152 с.

5. *Савчук В.П.* Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. – М.: Наука, 1989. – 323 с.
6. *Сухорученков Б.И.* Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. – М.: Вузовская книга, 2010. – 382 с.
7. *Сухорученков Б.И.* Методы контроля безотказности. – М.: Вузовская книга, 2017. – 320 с.
8. *Сухорученков Б.И., Окороков М.В.* Оценки показателей возможных дефектов технических систем, не выявленных после отработочных испытаний // Двойные технологии. – 2014. – № 1 (66). – С. 12–18.
9. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие / Л.Н. Александровская [и др.]. – М.: Логос, 2003. – 736 с.
10. *Труханов В.М., Матвеев А.М.* Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла: монография / под ред. В.М. Труханова. – М.: Издательский дом «Спектр». – 2012. – 663 с.
11. *Шишонко Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л.* Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники: монография / под ред. Н.А. Шишонка. – М.: Сов. радио, 1964. – 551 с.

М.В. Ведерников*,

кандидат технических наук, доцент;

К.А. Степанова**,

кандидат технических наук;

Л.А. Сырцов*,

кандидат технических наук, доцент

* ВКА им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

** СПб НИУ ИТМО, г. Санкт-Петербург.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ЧЕРЕЗ РАДИОПРОЗРАЧНЫЙ КУПОЛ

Предложена методика моделирования процессов теплообмена через радиопрозрачный купол (РПК). Разработана математическая модель теплообмена на поверхности РПК. Произведен расчет теплообмена на поверхности радиопрозрачного купола гипотетического РПК.

Ключевые слова: теплообмен, математическая модель, коэффициент теплоотдачи, критерии подобия.

ВВЕДЕНИЕ

Надежное функционирование радиоаппаратуры, размещенной непосредственно на антенне радиолокатора, возможно при обеспечении необходимого температурно-влажностного режима. Внутренний объем под оболочкой радиопрозрачного купола (РПК) находится в условиях теплообмена с окружающей средой. В связи с этим радиолокационные комплексы, включающие РПК, должны оснащаться системами обеспечения температурного режима (СОТР) подкупольного объема.

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определения основных требований к СОТР необходимо:

- разработать математическую модель теплообмена;
- разработать методику определения величин, входящих в математическую модель.

Рассматриваются следующие основные случаи:

- 1) при благоприятных климатических условиях СОТР отключен. При этом определяется равновесная температура наружной поверхности купола в условиях естественной конвекции.
- 2) при неблагоприятных климатических условиях СОТР включен. При этом определяются потребной мощности для компенсации тепловых потоков через РПК.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ РПК ПРИ ОТКЛЮЧЕННОЙ СОТР (случай 1)

Основные допущения:

- температура воздуха внутри купола одинаковая;
- равновесная температура одинаковая по всей наружной поверхности РПК;
- тепловыделения под куполом нет;
- теплообмен стационарный.

Температура наружной поверхности купола РПК определяется из уравнения теплового баланса для тепловых потоков, поступающих и уходящих с поверхности РПК.

Согласно закону сохранения энергии при стационарном теплообмене на наружной поверхности РПК встречные тепловые потоки равны (рис. 1):

$$Q_{\text{приток}} = Q_{\text{отток}} \quad (1)$$

В этом случае уравнение теплового баланса можно записать в виде составляющих притоков и оттоков тепловой мощности:

$$Q_{\text{солн.рад.}} = Q_{\text{конв.нар.}} + Q_{\text{изл.нар.}} \quad (2)$$

Тепловой поток от воздействия солнечной радиации определяется по следующей формуле:

$$Q_{\text{солн.рад.}} = \xi \cdot H_{\text{накл.}} \cdot S_{\text{возд.}} \quad (3)$$

где ξ – коэффициент поглощения солнечной радиации для материала РПК, ед;
 $H_{\text{накл.}}$ – излучение на поверхность, перпендикулярную падению лучей, Вт/м²;
 $S_{\text{возд.}}$ – площадь, эквивалентная криволинейной поверхности, воспринимающей солнечную радиацию [1], м².

Излучение на поверхность, перпендикулярную падению лучей находится по формуле

$$H_{\text{накл.}} = \frac{H_{\text{гор.}}}{\sin \theta} \quad (4)$$

где $H_{\text{гор.}}$ – прямая солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, Вт/м²;
 θ – высота Солнца над горизонтом, град.

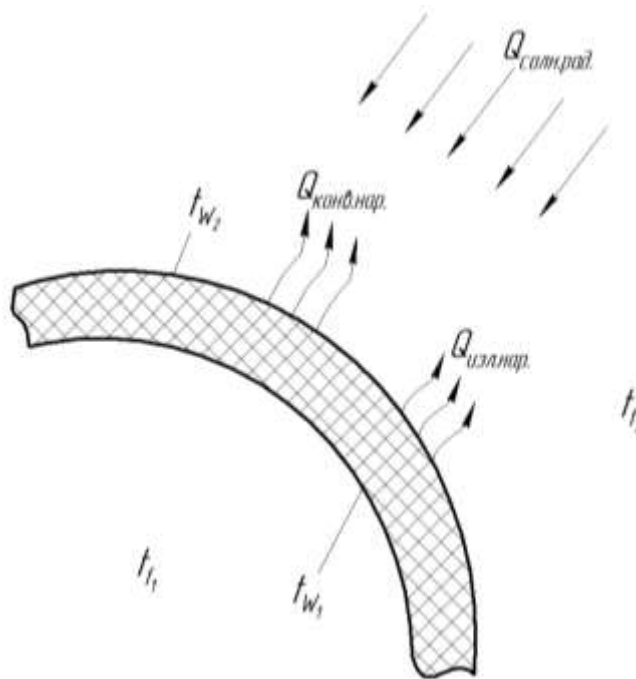


Рис. 1. Равновесный теплообмен на внешней поверхности РПК: $t_{с1}$ – температура воздуха внутри РПК; $t_{с2}$ – температура воздуха окружающей среды; $t_{в1}$ – температура внутренней поверхности; $t_{в2}$ – температура наружной поверхности РПК; $Q_{\text{солн.рад.}}$ – тепловой поток инсоляции (солнечная радиация); $Q_{\text{конв.нар.}}$ – тепловой поток конвективного теплообмена с окружающей средой; $Q_{\text{изл.нар.}}$ – тепловой поток лучистого теплообмена с окружающей средой

Площадь, эквивалентная криволинейной поверхности, воспринимающей солнечную радиацию, находится по формуле [1]

$$S_{\text{возд.}} = \frac{S_{\text{шар.н.}} / 2}{\pi / 2} = \frac{S_{\text{шар.н.}}}{\pi} = D^2, \quad (5)$$

где $S_{\text{шар.н.}}$ – площадь наружной поверхности шара, м²;

D – наружный диаметр РПК, м.

Тепловая мощность, передаваемая от внешней стенки РПК в окружающую среду конвекцией, определяется по формуле

$$Q_{\text{конв.нар.}} = \pi \cdot D^2 \cdot \alpha_2 \cdot (t_{w_2} - t_{f_2}), \quad (6)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности к окружающей среде, Вт/(м²·град);

t_{f_2} – температура воздуха окружающей среды, °С;

t_{w_2} – температура наружной стенки РПК, °С.

Тепловая мощность, снимаемая с наружной поверхности РПК излучением, определяется по формуле

$$Q_{\text{изл.нар.}} = \varepsilon \cdot \varphi \cdot c_0 \cdot S_n \cdot \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{f_2}}{100} \right)^4 \right], \quad (7)$$

где ε – коэффициент излучения материала РПК (степень черноты), ед.;

φ – угловой коэффициент;

c_0 – постоянная теплового излучения, Вт/(м²·К⁴);

S_n – площадь шаровой поверхности РПК с учетом ее усечения опорным основанием, м²;

T_p – равновесная температура, $T_p = t_p + 273,15$ К;

T_{f_2} – температура окружающей среды, $T_{f_2} = t_{f_2} + 273,15$ К.

С учетом принятого допущения о равномерности равновесной температуры по всей наружной поверхности РПК запишем

$$t_p = t_{w_2}. \quad (8)$$

После подстановки формулы (3–7) в формулу теплового баланса (2) и с учетом допущения (8), получим

$$\xi \cdot \frac{H_{\text{гор.}}}{\sin \theta} \cdot \frac{S_{\text{шар.н.}}}{\pi} = \varepsilon \cdot \varphi \cdot c_0 \cdot S_n \cdot \left[\left(\frac{t_p + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{f_2}}{100} \right)^4 \right] + \pi \cdot D^2 \cdot \alpha_2 \cdot (t_p - t_{f_2}). \quad (9)$$

Расчет теплообмена на поверхности гипотетического РПК. Для нахождения равновесной температуры необходимо задаваться значениями температуры окружающей среды. Задача решается методом последовательных приближений с использованием онлайн-решателя уравнений Wolframalpha.

Исходные данные. РПК представляет собой укрытие из синтетического материала в виде усеченной сферы диаметром 10 м, расположенной на опорном основании.

Для расчета были использованы следующие теплофизические характеристики [3]:

– коэффициент поглощения солнечной радиации материала РПК $\xi = 0,2$;

- коэффициент теплоотдачи от воздуха к внутренней стенке РПК $\alpha_1 = 2,0 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$;
- коэффициент теплоотдачи от внешней стенки РПК к окружающей среде (первого приближения) $\alpha_2 = 2,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$;
- температура окружающего воздуха лежит в интервале $-30^\circ\text{C} \dots +45^\circ\text{C}$;
- температура в подкупольном пространстве $0^\circ\text{C} \dots +45^\circ\text{C}$.

Климатические характеристики для расчета солнечной радиации представлены в табл. 1.

Дополнительно учитываются следующие характеристики РПК: R – радиус РПК, м; δ – толщина РПК, м; r – радиус основания РПК, м; h – высота шарового сектора, усеченного основанием, м, и др.

Таблица 1

Параметры для расчета солнечной радиации

Вариант воздействия солнечной радиации	Максимум для летнего периода	Минимум для зимнего периода (средние широты [1])
Прямая солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, Вт/м^2	1000	32
Высота солнца над горизонтом, град	90	16

Принималось: скорость обтекания воздухом $W < 1,0 \text{ м/с}$, т. е. случай теплообмена рассматривается в варианте свободного конвективного движения воздуха в неограниченном пространстве.

Для этого случая теплообмена коэффициент теплоотдачи от стенки РПК к окружающей среде определялся по формуле

$$Nu_m = C \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (10)$$

где m – индекс, показывающий, что определяющим параметром является средняя температура;

Gr – число Грасгофа;

Pr – число Прандтля;

C, n – вспомогательные коэффициенты, принимаемые по табл. 2.

Определяющая температура находится по формуле

$$t_m = \frac{t_{w_2} + t_{f_2}}{2}, \quad (11)$$

где t_{w_2} – температура наружной поверхности РПК, принимаемая равновесной по формуле (8) и используемая далее в формуле (9), $^\circ\text{C}$;

t_{f_2} – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Число Прандтля определяется по формуле

$$Pr_m = \frac{\mu_m \cdot c_{p_m}}{\lambda_m}, \quad (12)$$

где μ_m – динамический коэффициент вязкости воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

c_{p_m} – изобарная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

λ_m – коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Физические свойства воздуха и значения чисел Прандтля представлены в [1, 2]. Число Грасгофа определяется по формуле

$$Gr_m = \frac{g \cdot D^3}{\nu_m^2} \cdot \beta \cdot \Delta t, \quad (13)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;
 D – диаметр РПК, м;
 ν_m – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с;
 β – коэффициент температурного расширения воздуха, 1/К;
 Δt – разница температур поверхности РПК и окружающей среды, град.

Коэффициент температурного расширения воздуха определяется по формуле

$$\beta = \frac{1}{273,15 + t_m}, \quad (14)$$

где t_m – определяющая температура, вычисляемая по формуле (12), град.

Вспомогательные коэффициенты C и n находятся из табл. 2.

Таблица 2

Значения вспомогательных коэффициентов [3]

Область применения	C	n
$(Gr \cdot Pr)_m = 1 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$(Gr \cdot Pr)_m = 5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$(Gr \cdot Pr)_m = 2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{13}$	0,135	0,33

Коэффициент теплоотдачи получали из определения для числа Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha_2 \cdot D}{\lambda_m}, \quad (15)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи от внешней стенки РПК к окружающей среде, Вт/(м²·град);

D – диаметр РПК, м;

λ_m – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Расчет коэффициента α_2 по формуле (15) проведен путем последовательных приближений. Для этого в (9) необходимо задавать значения коэффициента α_2 и полученную равновесную температуру t_p наружной поверхности РПК использовать для дальнейшего расчета по формулам (11)–(14). Расчет вести до тех пор, пока значения коэффициента α_2 не станут равными заданным. Окончательные значения равновесной температуры и коэффициента α_2 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения температуры поверхности РПК и коэффициента α_2 (для случая 1)

Температура окружающей среды, °С	Температура поверхности РПК, °С	α_2 , Вт/м ² ·К
0	8,3774	3,172
5	13,2123	3,11
10	18,0412	3,054
15	22,8652	2,999
20	27,6923	2,945
25	32,5156	2,892
30	37,3361	2,844
35	42,1573	2,798
40	46,9828	2,747
45	51,8133	2,693

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВКЛЮЧЕННОЙ СОТР (случай 2)

В ряде практических случаях величину α_2 необходимо уточнять с использованием числа Нуссельта, исходя из условий обтекания купола снаружи – ветром, а внутри купола – потоком воздуха, создаваемого СОТР. При этом пренебрегаем кривизной поверхности РПК и полагаем ее плоской стенкой. Соответственно, при обтекании поверхности воздухом со скоростью $W \geq 1,0$ м/с расчеты ведутся по критериальным уравнениям для случая обтекания плоской стенки.

В математической модели для случая 2 расчетная формула для вычисления числа Нуссельта находится из выражения

$$Nu_f = C \cdot Re_f^n, \quad (16)$$

где f – индекс, показывающий, что определяющим параметром является температура окружающей среды;

Re – число Рейнольдса;

C, n – вспомогательные коэффициенты принимаемые по [3].

Число Рейнольдса находится по формуле

$$Re_f = \frac{W \cdot L}{\nu_f}, \quad (17)$$

где W – скорость обтекания поверхности воздухом, м/с;

L – определяющий размер, м;

ν_f – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с;

В качестве определяющего размера длины наружной и внутренней стенок по направлению соответствующих потоков принята четверть окружности РПК [1, 2]:

$$L_{\text{нар.}} = \frac{\pi \cdot D}{2};$$

$$L_{\text{вн.}} = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot \delta)}{4}.$$

Начальные значения приняты $\alpha_1 = 15,0$ Вт/м²·град и $\alpha_2 = 25,0$ Вт/м²·град.

Результаты расчетов для α_1 сведены в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты теплоотдачи α_1 при работе СОТР (для случая 2)

Температура окружающей среды внутри РПК, °С	$L_{\text{вн.}}$	$Re \cdot 10^{-6}$	C	n	Nu	α_1 , Вт/м ² ·К
-5	5,5292	2,120906	0,032	0,8	3684,403	15,992
0		2,081778			3629,924	16,019
5		2,015016			3536,492	15,830
10		1,952402			3448,303	15,654
15		1,892267			3363,069	15,510
20		1,835725			3282,434	15,376
25		1,780168			3202,719	15,234
30		1,727876			3127,231	15,101
35		1,677549			3054,149	14,997
40		1,630072			2984,801	14,899
45		1,583845			2916,891	14,745

Аналогичные вычисления приведем для внешней поверхности РПК. Следует отметить, что скорость обтекания сферы может изменять в различных пределах $W = 0,5 \div 20$ м/с.

Результаты этих расчетов для α_2 представлены в табл. 5.

Таблица 5

Вычисление коэффициента теплоотдачи α_2 от наружной стенки к окружающей среде при работе СОТР (для случая 2)

Температура окружающей среды, °С	$W = 1,0$ м/с	$W = 2,0$ м/с	$W = 5,0$ м/с	$W = 10,0$ м/с	$W = 15,0$ м/с	$W = 20,0$ м/с
α_2 , Вт/м ² ·К						
-5	3,835	6,678	13,899	24,199	33,471	42,133
0	3,842	6,689	13,921	24,238	33,526	42,202
5	3,796	6,61	13,758	23,953	33,131	41,705
10	3,754	6,536	13,604	23,686	32,762	41,24
15	3,72	6,476	13,479	23,469	32,461	40,862
20	3,687	6,42	13,363	23,266	32,18	40,508
25	3,653	6,361	13,239	23,051	31,883	40,134
30	3,622	6,305	13,124	22,85	31,605	39,784
35	3,596	6,262	13,033	22,692	31,387	39,51
40	3,573	6,221	12,948	22,545	31,183	39,252
45	3,536	6,157	12,814	22,311	30,86	38,846

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика моделирования теплообмена через РПК. Определены параметры теплообмена для типового радиолокационного комплекса без включения СОТР для летнего периода и с включением СОТР для зимнего и летнего периодов.

Список используемых источников

1. А.Г. Сотников. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 4. – С. 21–30.
2. Строительная климатология: справочник / под ред. А.Б. Федорова, А.И. Тютюнникова. – М.: Евроклимат, 2006. – 510 с.

З.С. Великий,*

И.В. Шакмаев**

*В/ч 75117, г. Мирный-12 Архангельской обл.

**В/ч 13991, г. Мирный-12 Архангельской обл.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ТЯГИ МАРШЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ РАЗГОННОГО БЛОКА «ФРЕГАТ»

Предложена методика расчета удельного импульса тяги маршевой двигательной установки разгонного блока «Фрегат». Проанализированы другие методы расчета удельного импульса тяги. Выявлены особенности, накладывающие ограничения на применение предложенной методики. Методика иллюстрируется графиками работы двигателя на нескольких включениях, оценивается удельный импульс тяги на этих участках и сделаны выводы. Составлена таблица по десяти запускам, с нахождением средних значений.

Ключевые слова: удельный импульс тяги, двигательная установка, анализ в реальном масштабе времени, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка функционирования двигателя производится по результатам анализа соответствия его рабочих процессов прошедшим командам системы управления (СУ) изделия, а также предусмотренным его конструкцией принципам работы. Параметры и характеристики двигателя подлежат обязательной оценке для заключения о соответствии испытанного образца двигателя требованиям технической документации.

Одной из важнейших характеристик жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), наряду с тягой, коэффициентом полезного действия, удельной массой и удельным расходом топлива, является удельный импульс тяги (УИТ). Он определяет совершенство двигателя, его исправность, а также оптимальность выбора конструктивно-компоновочной схемы. Выражаясь техническим языком, величину удельного импульса тяги можно толковать как время в секундах, в течение которого камера, создающая тягу в 1 кгс, израсходует 1 кг топлива [1].

Существующие методики позволяют оценить удельный импульс тяги маршевой двигательной установки (МДУ) по заданным соотношениям, номинальным расходным характеристикам и при условии нормальной работы двигателя. Но такие методики громоздки, а расчеты плохо автоматизируются.

Между тем, в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) бортовой аппаратуры системы управления (БАСУ) разгонного блока «Фрегат» (РБФ) рассчитывается текущее значение параметра T_{gq} (веса израсходованного топлива, отнесенного к номинальному весовому расходу). Значение параметра T_{gq} передается в потоке цифровой телеметрической информации БЦВМ (рис. 1). Результаты расчета в математическом представлении имеют вид

$$\Delta M / (dm_{\text{ном}} / dt). \quad (1)$$

Исходя из программы полета, если маршевый двигатель (МД) разгонного блока (РБ) отработал на данном активном участке скоростную уставку от навигационного контура за время указанное в полетном задании (ПЗ), а затратил при этом меньше топлива, то его удельный импульс тяги выше, чем расчетный. Верно и обратное утверждение.

На основании этого нами были разработаны методические рекомендации по расчету удельного импульса МД С5.92 РБФ.

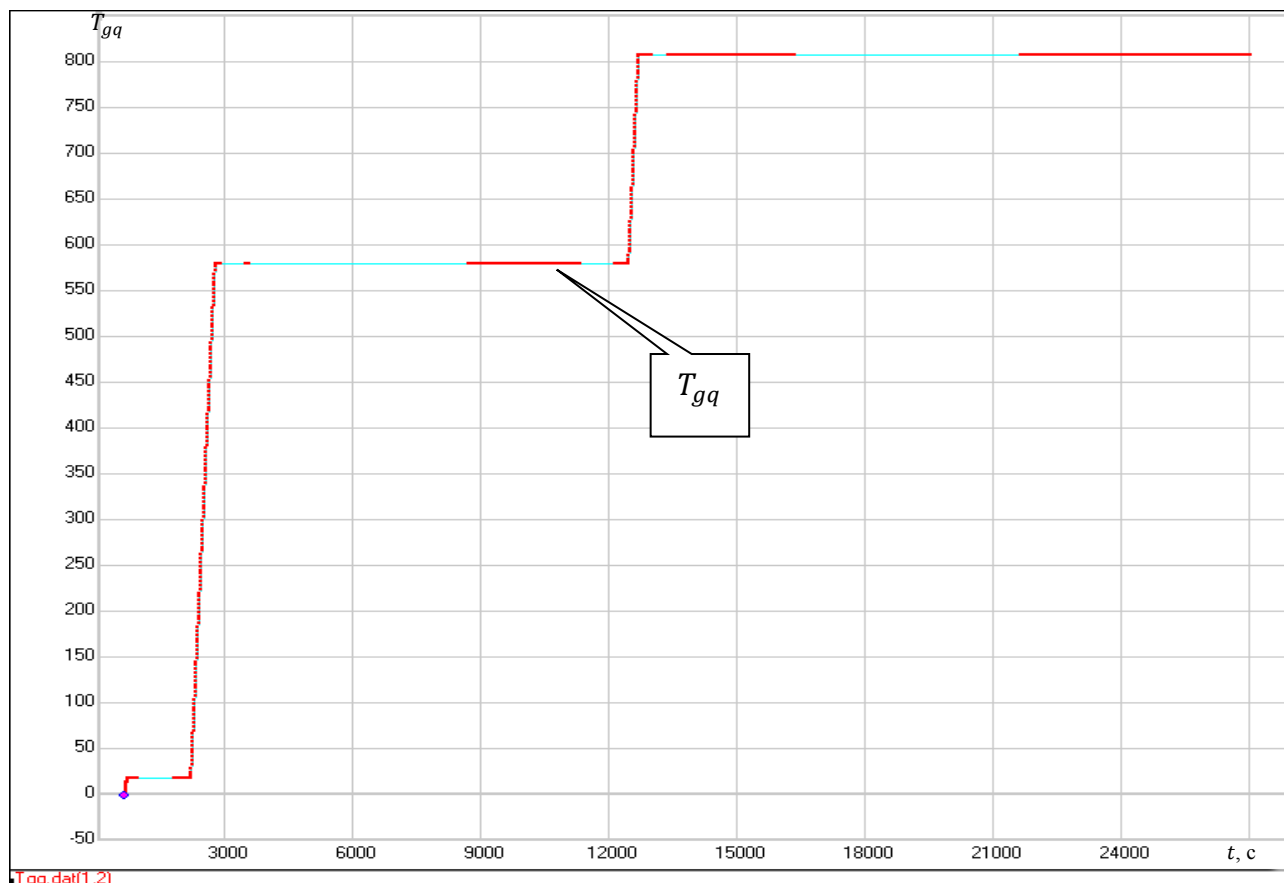


Рис. 1. График параметра T_{gq} для МДУ РБФ С5.92 на всех включениях

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА

Были проанализированы методики расчета УИТ двигательных установок (ДУ) ракет космического назначения (РКН) 14А14 и 14А15 [3, 4].

Определение УИТ двигателей ракет производится по известному соотношению К.Э. Циолковского, при этом для его расчета необходимо определение в ходе полета значений кажущейся скорости и расхода топлива. На РБ расходомеры топлива отсутствуют, поэтому для расчета УИТ необходимы аналитические зависимости, не включающие в себя эти замеры. На основе таких зависимостей в конструкторском бюро (КБ) «Салют» построен метод расчета удельной пустотной тяги (УПТ) МДУ РБ «Бриз-КМ» и «Бриз-М». Результаты, полученные в КБ «Салют», подтверждают возможность разработки методик расчета УИТ для МД РБ.

В качестве примера рассмотрим методику расчета аналитической зависимости УПТ $P_{уд.п.}$ от величины кажущегося ускорения КБ «Салют», разработанную для МДУ РБ «Бриз-КМ» [5].

Уравнение Мещерского для РБ, движущегося в поле земного тяготения за пределами атмосферы Земли, записывается в виде

$$M \dot{V} = P_m - Mg \sin \Theta \tag{2}$$

где \dot{V} – ускорение РБ в направлении действия суммарной силы;
 M – текущая масса РБ;

- P_m – тяга МДУ РБ в пустоте;
 g – ускорение свободного падения РБ на траектории полета;
 Θ – текущее значение угла тангажа РБ на траектории полета.

В свою очередь

$$P_m = P_{m.\text{дин.}} + P_{m.\text{н.статич.}},$$

Здесь $P_{m.\text{дин.}}$ – динамическая составляющая тяги МДУ:

$$P_{m.\text{дин.}} = \frac{dM}{dt} W,$$

где $\frac{dM}{dt}$ – секундный массовый расход топлива, $\frac{dM}{dt} = m$;

W – скорость истечения топлива;

$P_{m.\text{н.статич.}}$ – статическая составляющая тяги МДУ в пустоте, $P_{m.\text{н.статич.}} = S_a P_a$,

где S_a – площадь среза сопла ДУ;

P_a – давление продуктов сгорания топлива на срезе сопла.

Тогда

$$P_m = mW + S_a P_a \text{ или } P_m = mW_e, \quad (3)$$

где W_e – эффективная скорость истечения топлива, $W_e = W + \frac{S_a P_a}{m}$.

Уравнение (2) с учетом уравнения (3) можно представить в следующем виде:

$$M \dot{V} = mW_e - Mg \sin \Theta. \quad (4)$$

Разделив уравнение (4) на M и перенеся член, определяющий гравитационное влияние, в левую часть уравнения получим

$$\dot{V} + g \sin \Theta = \frac{m}{M} W_e. \quad (5)$$

Левая часть уравнения представляет собой кажущееся ускорение, значение которого можно вычислять по данным телеизмерений:

$$\dot{V} + g \sin \Theta = \dot{V}_{\text{каж.}}. \quad (6)$$

Текущее значение массы РБ можно представить в виде

$$M = M_0 - mt, \quad (7)$$

где M_0 – начальное значение массы РБ;

t – текущее значение времени полета РБ.

Теперь уравнение (5) с учетом уравнений (6) и (7) можно представить в виде

$$\dot{V}_{\text{каж.}} = \frac{mW_e}{M_0 - mt}. \quad (8)$$

Или после преобразования в виде

$$\frac{1}{\dot{V}_{\text{каж.}}} = \frac{M_0}{mW_e} - \frac{t}{W_e}. \quad (9)$$

В данном уравнении величины M_0 , m и W_e можно считать постоянными, поэтому уравнение (9) является линейным уравнением с угловым коэффициентом. Это обстоятельство крайне благоприятно с точки зрения аппроксимации дискретной телеметрической информации.

Продифференцировав уравнение (9), получим

$$\left(\frac{1}{\dot{V}_{\text{каж}}} \right)' = -\frac{1}{W_e} \quad (10)$$

или

$$W_e = -\frac{1}{\left(\frac{1}{\dot{V}_{\text{каж}}} \right)'}. \quad (11)$$

Переходя к удельной тяге МДУ в пустоте, можно записать

$$P_{\text{уд.п.}} = \frac{P_m}{mg_0} = \frac{mW_e}{mg_0} = \frac{W_e}{g_0}. \quad (12)$$

Таким образом, с учетом уравнений (11) и (12) получаем зависимость УПТ МДУ от кажущегося ускорения:

$$P_{\text{уд.п.}} = -\frac{1}{\left(\frac{1}{\dot{V}_{\text{каж}}} \right)' g_0}. \quad (13)$$

При этом очевидно, что под значением $\dot{V}_{\text{каж}}$ в расчетах рационально использовать модуль кажущегося ускорения, что избавляет от необходимости учитывать текущее значение углового положения камеры МДУ.

Тогда окончательно запишем расчетную зависимость $P_{\text{уд.п.}}$ от модуля кажущегося ускорения:

$$P_{\text{уд.п.}} = -\frac{1}{\left(\frac{1}{\dot{V}_{\text{каж.мод.}}} \right)' g_0}. \quad (14)$$

Следовательно, для расчета $P_{\text{уд.п.}}$ достаточно по данным ТМИ получить или вычислить составляющие кажущегося ускорения по осям любой системы координат, вычислить модуль ускорения, не зависящий от системы координат, а затем последовательно провести ряд описанных математических действий.

Анализ формулы (14) показывает, что для нахождения УПТ необходимо будет дважды дифференцировать один параметр. Каждая такая операция требует предварительной подготовки этого параметра, его фильтрацию и сглаживание. Так как опросность параметров на участке полета РБ снижена, то алгоритмы цифровых фильтров низкой частоты потребуют предварительного накопления данных. При повторном дифференцировании задержка будет увеличиваться, так как следующая фильтрация будет производиться после накопления данных от первой производной.

В качестве примера: пусть настройка фильтра низкой частоты $F_{s1} = 0,25$ Гц. Тогда требуется накопление данных в течение $1/F_{s1} \geq 4$ с. Фильтрация производной от таких данных с большей частотой, чем $F_{s1} = 0,25$ Гц смысла не имеет, так что и $F_{s2} \leq 0,25$ Гц. Тогда общая задержка составит не менее 8 с от начала сеанса. При этом сбои в потоке недопустимы, так как отклик от сбоев исказит весь фильтрованный поток, начиная с точки сбоя [6].

Из анализа приведенной методики можно сделать вывод, что для расчета УПТ ДУ достаточно трех составляющих кажущейся скорости. Однако требуется предварительная подготовка параметров, которая предусматривает режекцию сбоев и восстановление всех данных потока ТМИ с обеспечением постоянной опросности. Очевидно и то, что методика КБ «Салют» имея достаточную функциональность, не позволяет создать такой программно-математический аппарат, который можно было использовать не только для оперативного анализа ТМИ, но и для оценки летно-технических характеристик (ЛТХ) в режиме реального времени, ввиду трудоемкого процесса подготовки исходных данных.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ

Исходя из общетехнических сведений производная от параметра T_{gq} (обозначим как dT_{gq}) будет безразмерным соотношением реального расхода к номинальному (рис. 2). При этом предварительно фильтровать T_{gq} на всем интервале оценки не требуется.

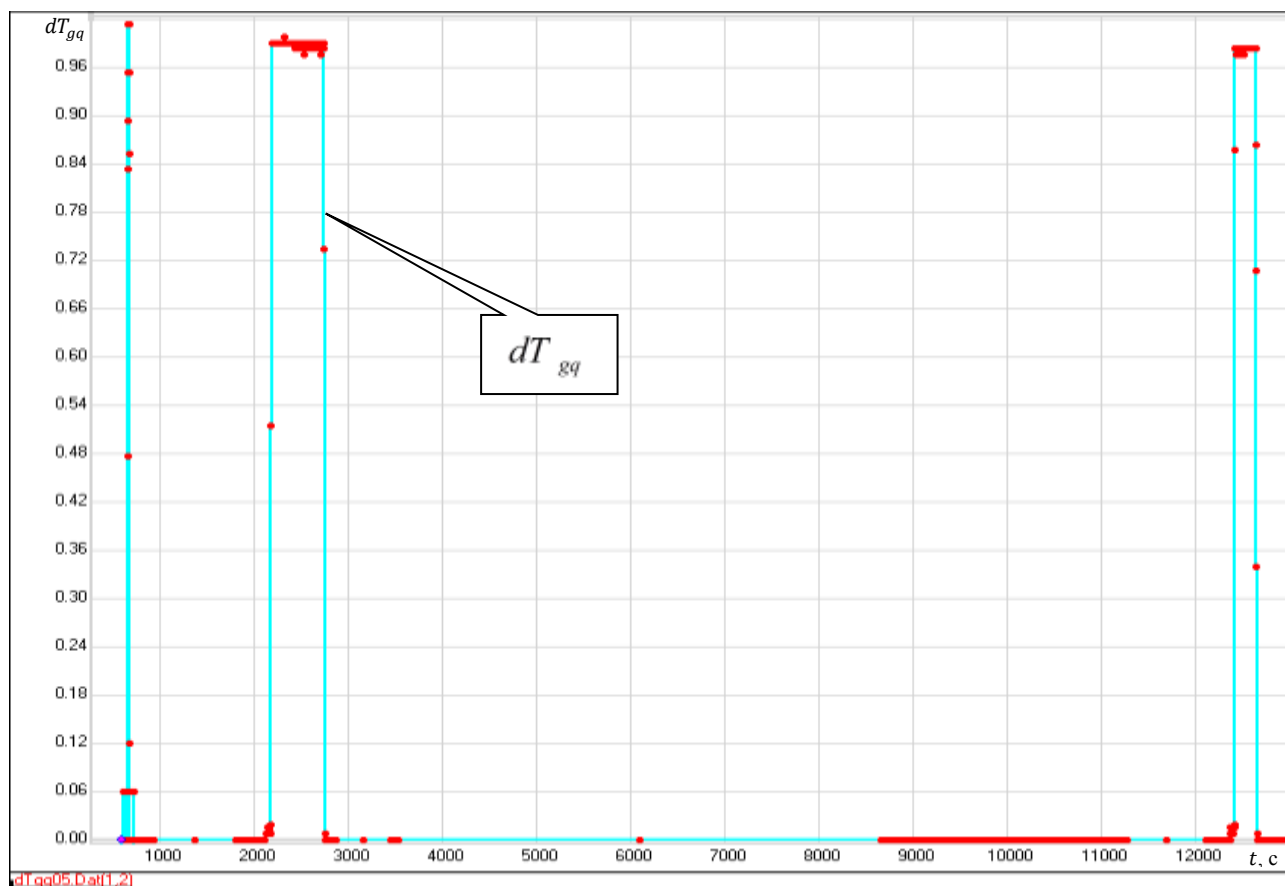


Рис. 2. Производная от T_{gq} – параметр dT_{gq}

Так как $T_{gq} = \Delta M / (dm_{\text{ном.}}/dt)$ следовательно при $(dm_{\text{ном.}}/dt)$ – постоянная производная $T_{gq} = (dM/dt) / (dm_{\text{ном.}}/dt)$ – безразмерная величина. (dM/dt) – текущий секундный расход компонентов ракетного топлива (КРТ) работающего двигателя.

Тогда

$$J_r = J_n / dT_{gq}, \quad (15)$$

где J_r – расчетная оценка удельного импульса;

J_n – номинальное значение удельного импульса тяги ($J_n = 331,0$ с в интервале 328,0÷333,0 с для режима большой тяги (БТ)) [7].

С учетом номинальных значений удельного импульса и защиты от «разрывных» точек формула (15) приобретает вид

$$J_r = 331,0 / (dT_{gq} + 0,001). \quad (16)$$

Следует учесть и фактор продолжительности работы МД РБ. Если МД отработал номинальную уставку ПЗ по скорости ($\Delta W_{S_пз}$) дольше чем задано, то удельный импульс МД меньше расчетного (номинального). Исходя из этого, введем поправочный коэффициент K_τ :

$$K_\tau = \tau_{пз} / \tau_{мду}, \quad (17)$$

где $\tau_{пз}$ – время, заданное в ПЗ на отработку импульса;

$\tau_{мду}$ – опытное время отработки указанного импульса.

Кроме того, следует учесть также и то обстоятельство, что точно отработать уставку по скорости невозможно и всегда имеет место разброс набранной скорости за конкретное включение МД РБ. Учтем и этот фактор поправочным коэффициентом K_w :

$$K_w = \Delta W_{Si} / \Delta W_{S_пз}, \quad (18)$$

где ΔW_{Si} – приращение скорости, набранное на i -м активном участке;

$\Delta W_{S_пз}$ – уставка ПЗ на приращение скорости для i -го активного участка.

С учетом всех поправок формула (16) примет вид

$$J_r = 331,0 \tau_{пз} \Delta W_{Si} / \left(\tau_{мду} \Delta W_{S_пз} (dT_{gq} + 0,001) \right). \quad (19)$$

Упростим (19) за счет того, что в соотношении $\tau_{пз} / \Delta W_{S_пз}$ все задано в ПЗ и поэтому такую константу можно рассчитать заранее.

Пусть

$$K_{пз} = \tau_{пз} / \Delta W_{S_пз}. \quad (20)$$

С учетом (20) итоговое соотношение для оценки УИТ МДУ РБ примет вид

$$J_r = 331,0 (K_{пз} \Delta W_{Si}) / \left(\tau_{мду} (dT_{gq} + 0,001) \right). \quad (21)$$

Графики расчетных значений УИТ МДУ РБФ при пуске 3 ноября 2018 г. на всем промежутке полета РБ и на активных участках траектории (АУТ) представлены на рис. 3–6.

Расчет по формуле (21) дает массив значений, так как ТМИ позволяет получить поток входных данных, а для получения точечной оценки на локальном участке целесообразно использовать статистическую обработку результатов. Это даст возможность оценить среднее значение и выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО) удельного импульса МДУ РБ, реализовавшихся на данном включении. Подобные результаты позволят сделать вывод о достоверности полученных оценок и совершенстве рабочих процессов двигателя.

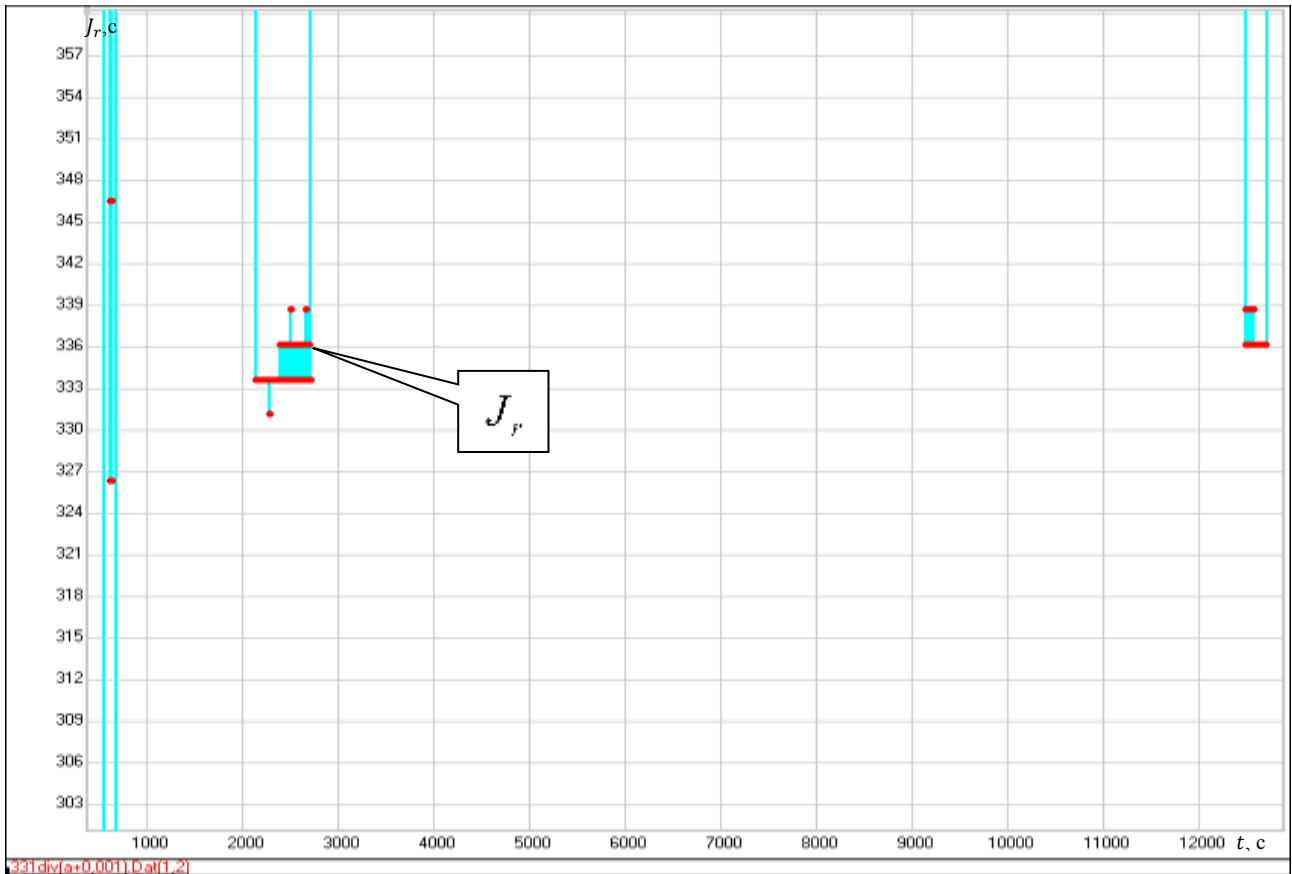


Рис. 3. Расчетное значение J_r при пуске 3 ноября 2018 года

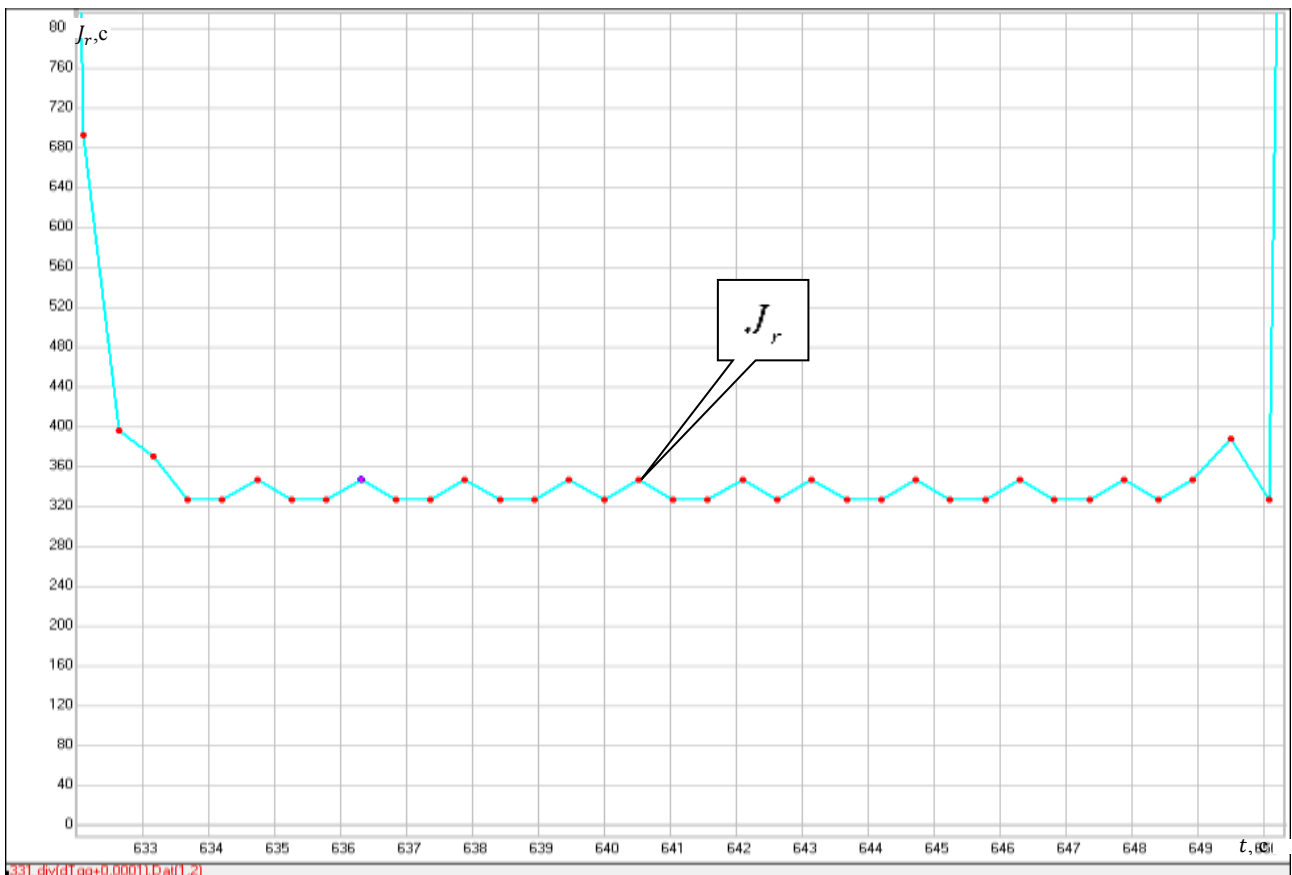


Рис. 4. Расчетное значение J_r на АУТ1 при пуске 3 ноября 2018 года

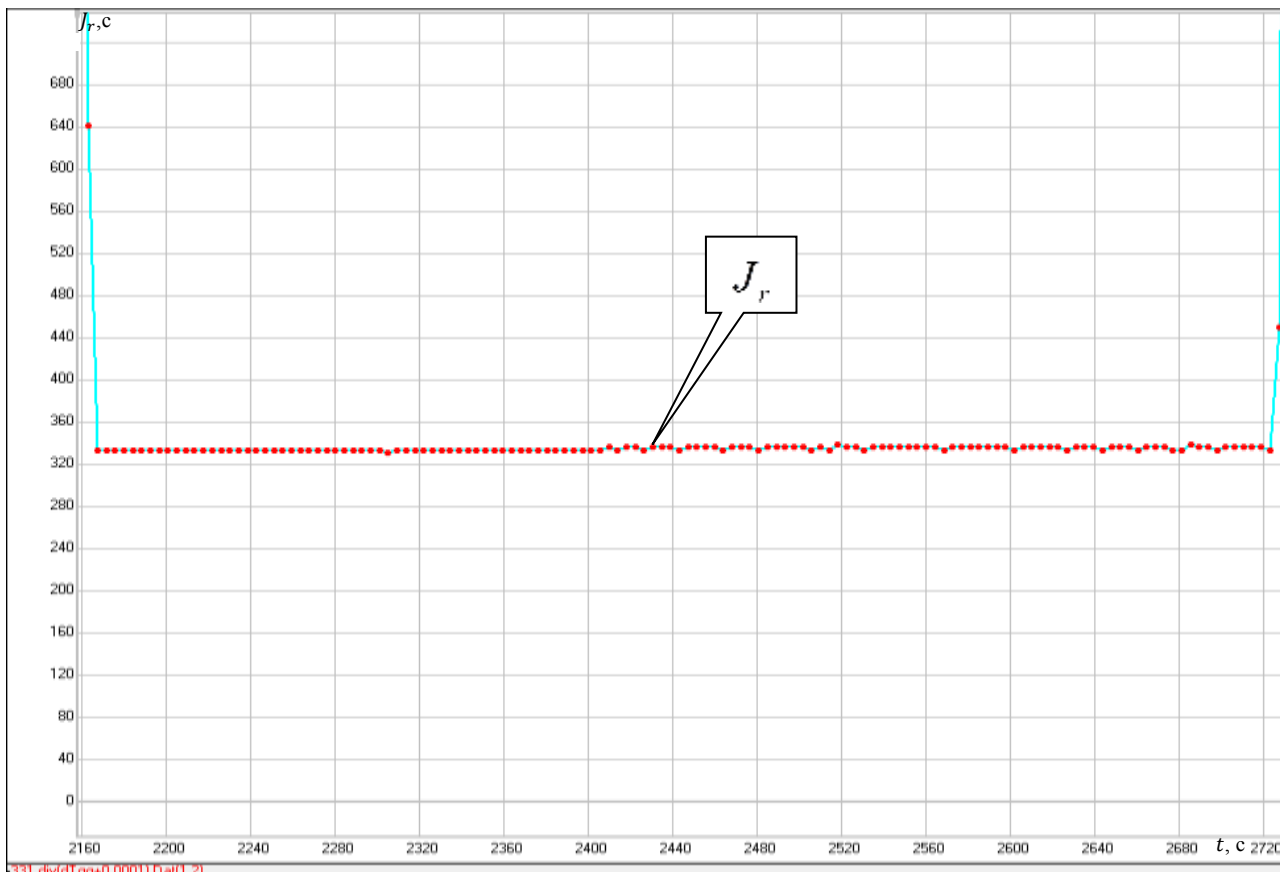


Рис. 5. Расчетное значение J_r на АУТ2 при пуске 3 ноября 2018 года

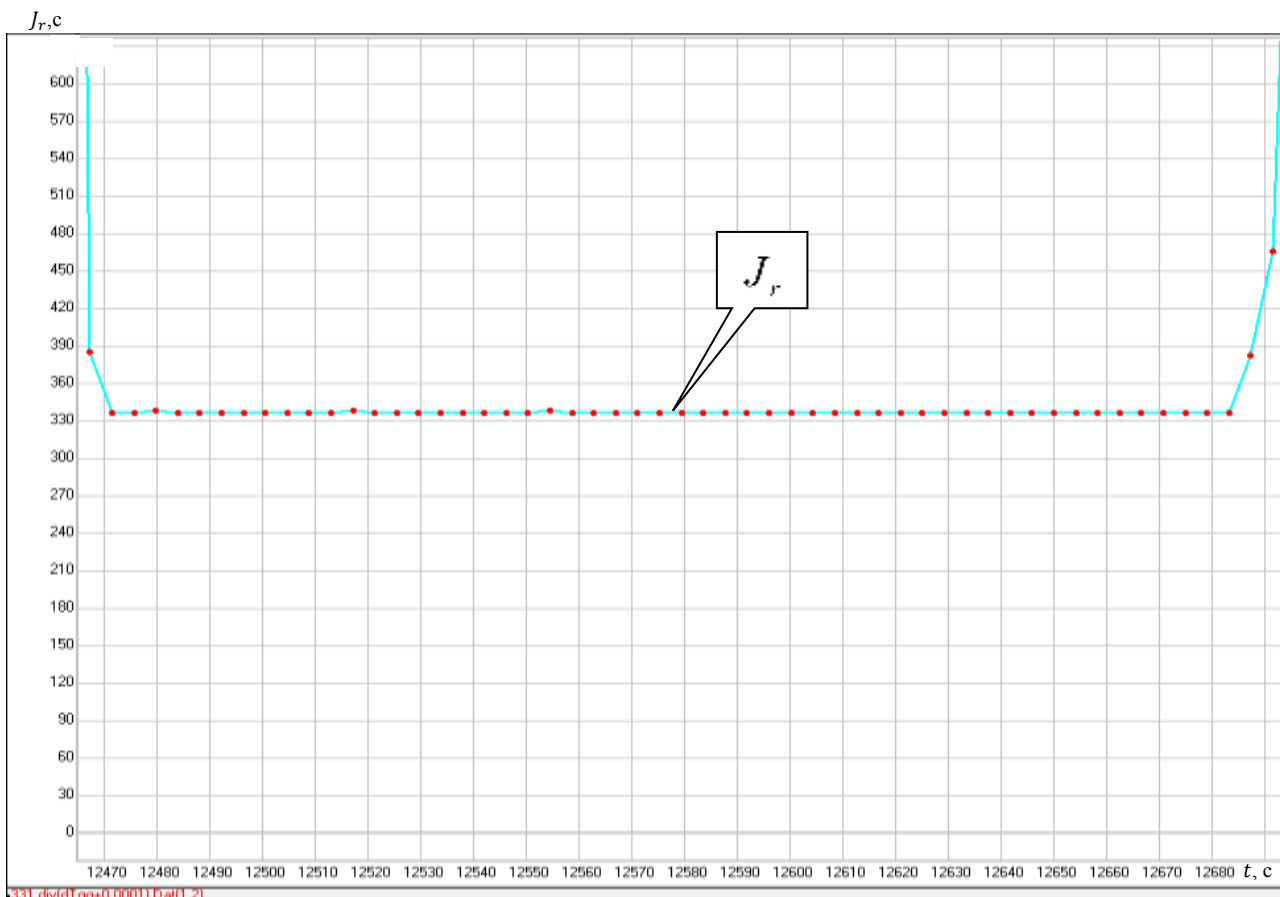


Рис. 6. Расчетное значение J_r на АУТ3 при пуске 3 ноября 2018 года

ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ

Анализ режимов работы и полученных результатов расчета УИТ выявил особенности:

- при первом включении МД РБ АУТ1 в течение 3–4 с происходит прогрев элементов конструкции и выход на установившийся режим двигательной установки;
- в течение 3 с после запуска МДУ РБ происходит его совместная работа с ДУ системы обеспечения запуска (СОЗ), что искажает объективную оценку УИ. Такая совместная работа на АУТ1, при аномалиях в ориентации РБФ, может длиться от запуска и вплоть до выключения МД;
- второе включение МД РБ АУТ2 происходит через полчаса после первого включения, в результате чего элементы конструкции двигателя имеют более высокую начальную температуру, чем при первом включении, следовательно выход на установившийся режим работы происходит за 1–2 с;
- пауза после второго включения до АУТ3 составляет около трех часов. За это время конструкция МД остывает, так что на АУТ3 разогрев и выход на режим происходит за 3–4 с;
- на АУТ3 происходит переход МД на режим малой тяги (МТ) с последующим выключением. Длительность участка работы на МТ может составлять от 5 до 27 с. При этом расход КРТ падает и соответственно расчетный удельный импульс будет завышен, следовательно этот участок необходимо исключить из расчета.

Исходя из перечисленных особенностей, сформулируем следующие ограничения применения предлагаемой методики:

- 1) на АУТ1 в зачет брать измерения с четвертой секунды от команды на запуск или с момента отключения СОЗ по каналам тангажа и рысканья и до команды на выключение МД [8];
- 2) на АУТ2 в зачет брать измерения с четвертой секунды от команды на запуск и до команды на выключение МД [9];
- 3) на АУТ3 в зачет брать измерения с четвертой секунды от команды на запуск и до момента перехода МД на МТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ТЯГИ

С учетом ограничений по результатам десяти испытаний получены оценки УИТ МДУ РБФ (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные значения УИТ J_r МДУ РБФ С5.92

Дата пуска	АУТ1		АУТ2		АУТ3	
	среднее	СКО	среднее	СКО	среднее	СКО
17.09.2009	-	-	344,51	±1,02	342,02 ¹⁾	±1,76
02.11.2010	-	-	334,14	±1,08	342,02 ¹⁾	±1,76
04.05.2011	336,01	±10,31	336,49	±0,86	343,06 ¹⁾	0
03.11.2011	-	-	332,55	±1,34	332,99	±1,24
28.11.2011	-	-	331,32	±0,73	331,76	±0,78
23.04.2014	334,19	±10,04	335,09	±1,26	334,80	±1,19
29.05.2016	-	-	333,52	±0,79	334,0	±0,21
07.02.2016	-	-	338,07	±1,26	337,89	±1,30
17.06.2018	334,98	±10,27	333,11	±1,27	334,16	±0,63
03.11.2018	334,12	±10,01	335,13	±1,37	336,68	±0,61
Выборочные средние	334,85		335,39		334,61 ²⁾	
Генеральное среднее	335,03					

¹⁾ Значение УИТ по результатам работы МДУ только на режиме МТ.

²⁾ Значение УИТ без учета работы МДУ на режиме МТ.

ВЫВОДЫ

Проанализировав полученные результаты расчетов (табл.1), можно сделать следующий вывод: участок АУТ2 самый продолжительный среди всех включений МДУ, на нем формируется наиболее представительная выборка значений УИТ и, как следствие, он является оптимальным для проведения оценки J_r . Максимальное СКО на АУТ2 составляет 1,373 с при среднем СКО 1,097 с. Эта оценка больше нормативного СКО $\sigma = \pm 0,93$ с (получено из интервала допуска для УИТ режима БТ 328–333 с) [10], но такое значение СКО оправдано тем, что на единичных испытаниях трудно набрать большую статистику измерений. С набором статистических данных по испытаниям, расчет будет корректироваться.

Отметим и то, что для АУТ1 часто отсутствует полная ТМИ, а там где присутствует, имеет место большой разброс оценок, СКО выше 10 с, т. е. достоверность мала [10], по причине низкой опросности ТМИ. Также выяснено, что между включениями характеристики МДУ значительно меняются и нужно рассматривать работу двигателя на каждом АУТ отдельно.

Предлагаемый подход к расчету удельного импульса тяги маршевой двигательной установки разгонного блока «Фрегат» в отличие от других методик позволяет оперативно оценивать его значение. Это позволит идентифицировать в процессе полета РБФ режим работы двигателя, осуществить оценку гарантийных запасов КРТ на борту изделия, выявить аномалии в работе ДУ, сравнить экспериментальные значения, полученные по результатам опытно-исследовательских работ, с экспериментальными значениями, полученными по результатам огневых стендовых испытаний, и сделать выводы о совершенстве рабочего процесса в камере сгорания, влиянии внешних и внутренних факторов на работу ДУ в условиях космического пространства. С учетом перечисленных ограничений данную методику расчета можно адаптировать для применения в ходе репортажа о пуске и полете изделия 14С44 в режиме реального времени по направлениям анализа ЛТХ ДУ и баллистико-навигационного обеспечения, а так же включить в инструкцию по оценке работы бортовых систем [11].

Список используемых источников

1. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1980. – 533 с.
2. ЕФИТ 11-Э21Б/06. Исходные данные по структуре и составу ТМ кадра [редакция 3]. – Самара: ЦСКБ «Прогресс», 2017. – 16 с.
3. Инструкция по оценке бортовых систем [14А14 ИЭ20 ч. 3, кн. 4] – Изд. первое. – Самара: ЦСКБ «Прогресс», 2002. – 40 с.
4. Инструкция по оценке бортовых систем [14А15 ИЭ20 ч. 3, кн. 4]. – Изд. первое. – Самара: ЦСКБ «Прогресс», 2012. – 26 с.
5. Вывод аналитической зависимости $u_{уд}$ от величины кажущегося ускорения / КБ «Салют». – М., 2003. – 15 с.
6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2005. – 604 с.
7. Техническое описание разгонного блока «Фрегат». Основные характеристики / АО «НПО им. Лавочкина». – М., 2008. – 72 с.
8. 14С44-000-0 РО2-4. Расчет общий / АО «НПО имени С.А. Лавочкина». – М., 2011. – 21 с.
9. Факс по вопросам уточнения инструкции ИЭ65 ч.4 / АО «НПО имени С.А. Лавочкина». – М., 2016. – 3 с.
10. ГОСТ 11.004-74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 20 с.
11. 14С44. Инструкция по оценке бортовых систем в полете. ИЭ65. Ч. 4. Оценка состояния СУ 14Л322 [приложение Д] / АО «НПО имени С.А. Лавочкина». – М., 2011 г. – 83 с.

Д.И. Казанцев*;

А.А. Карытко*,

кандидат технических наук;

Е.С. Карытко**

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

**В/ч 28289, г. Ногинск-9 Московской обл.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНОЙ LSTM-СЕТИ СО СЛОЕМ ВНИМАНИЯ

Представлены результаты решения задачи прогнозирования временных рядов, характеризующих загрузку вычислительной системы серверного класса на основе многомерных данных. Для решения задачи используется математический аппарат рекуррентных LSTM-сетей. Рассмотрены три варианта архитектуры нейронных сетей: без использования слоя внимания, с использованием слоя внимания на основе функции softmax, а также с использованием слоя внимания на основе сверточной нейронной сети. В статье представлены результаты вычислительного эксперимента, проведенного на основе статистической информации, собранной системой мониторинга компьютерных систем и сетей zabbix. Полученные результаты могут быть использованы в системах динамического реконфигурирования аппаратных ресурсов, распределяемых гипервизором между множеством виртуальных машин.

Ключевые слова: LSTM-сеть, вычислительная система, временной ряд, внимание нейронной сети.

ВВЕДЕНИЕ

Факторами, оказывающими ключевое влияние на эффективность функционирования вычислительных систем, развернутых на базе технологий виртуализации, являются:

- 1) распределение микропроцессорных ядер между гостевыми операционными системами;
- 2) распределение оперативной памяти между гостевыми операционными системами;
- 3) пропускная способность подсистемы ввода-вывода аппаратного обеспечения, на базе которого развернуты гипервизор и гостевые операционные системы.

Ошибки в распределении аппаратных ресурсов между гостевыми операционными системами провоцируют рост числа переключений контекста исполняемых процессов, кэш-промахов во время выполнения загрузки данных в регистровый файл микропроцессора, увеличение длительности нахождения процессов в состоянии ожидания по причине обработки прерываний, отвечающих за обмен данными между микропроцессором и подсистемой ввода-вывода.

Задача распределения аппаратных ресурсов вычислительных систем между гостевыми хостами решается на основе анализа и прогнозирования нагрузки на гипервизор и гостевые операционные системы в процессе эксплуатации системы. В условиях отсутствия стационарности потоков данных, обрабатываемых вычислительной системой, целесообразно использовать процедуру масштабирования аппаратных ресурсов. Масштабирование аппаратных ресурсов заключается в их динамическом перераспределении между гостевыми операционными системами таким образом, чтобы для каждого хоста, управляемого гипервизором, выполнялся критерий стационарности режима работы:

$$\frac{\lambda}{\mu} < 1, \quad (1)$$

где λ – интенсивность поступления заявок;

μ – интенсивность обслуживания заявок вычислительной системой.

Выполнение данного критерия возможно обеспечить за счет использования проактивной системы автоматического управления (масштабирования) аппаратными ресурсами F , т. е. системы, обладающей возможностями прогноза величины загрузки вычислительной системы ρ :

$$F(g | \rho_{t-\Delta t_1, t+\Delta t_2}),$$

где g – распределение аппаратных ресурсов в момент времени t ;
 Δt_1 – интервал времени, на котором осуществляется сбор данных, необходимых для прогноза нагрузки на вычислительную систему;
 Δt_2 – интервал времени прогнозирования значений ρ .

Таким образом, задача обеспечения выполнения критерия (1) сводится к решению задачи распределения аппаратных ресурсов в вычислительной системе, а также задачи прогноза величины загрузки системы. В данном исследовании представлена методика решения задачи прогноза величины ρ на основе LSTM-сетей. Рассмотрены два варианта нейронной сети – с использованием механизма внимания и без использования механизма внимания. Величина ρ – средняя загрузка системы за последние пятнадцать минут. Дискретность времени в проводимом исследовании принимается равной одной минуте.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходными данными рассматриваемой методики являются:

– множество результатов мониторинга состояния вычислительной системы на интервале времени Δt , задаваемое матрицей X_t :

$$X_t = \begin{pmatrix} x_1^{t-\Delta t} & x_2^{t-\Delta t} & x_3^{t-\Delta t} & x_4^{t-\Delta t} & x_5^{t-\Delta t} & x_6^{t-\Delta t} & x_7^{t-\Delta t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{t-1} & x_2^{t-1} & x_3^{t-1} & x_4^{t-1} & x_5^{t-1} & x_6^{t-1} & x_7^{t-1} \\ x_1^t & x_2^t & x_3^t & x_4^t & x_5^t & x_6^t & x_7^t \end{pmatrix},$$

здесь $x_i^j \in X_t$ – значение i -го признака, характеризующего состояние вычислительной системы в момент времени j ;

– Δt^* – длительность интервала прогноза величины ρ ;

– $\rho_{t+1}, \rho_{t+2}, \dots, \rho_{t+\Delta t^*}$ – множество результатов мониторинга средней загрузки вычислительной системы за последние пятнадцать минут на интервале времени Δt^* .

Всего в рассматриваемой методике учитывается семь признаков:

- 1) x_1^t – число прерываний, выполненных микропроцессорными ядрами системы;
- 2) x_2^t – число активных процессов в системе;
- 3) x_3^t – интенсивность исходящего сетевого трафика;
- 4) x_4^t – интенсивность входящего сетевого трафика;
- 5) x_5^t – средняя загрузка системы за последнюю минуту;
- 6) x_6^t – средняя загрузка системы за последние пять минут;
- 7) x_7^t – средняя загрузка системы за последние пятнадцать минут.

Каждый из перечисленных признаков характеризует объем соответствующих данных, поступивших в течение одной минуты.

Введем неизвестную функцию $P(X_t, \Delta t^* | t \in \{t - \Delta t, t\})$, значения которой для момента времени t имеют вид вектора-строки $\bar{\rho} = (\bar{\rho}_{t+1}, \bar{\rho}_{t+2}, \dots, \bar{\rho}_{t+\Delta t^*})$, т. е. $P(X_t, \Delta t^* | t \in \{t - \Delta t, t\}) \rightarrow \bar{\rho}$.

Тогда решение задачи прогноза величины ρ на интервале времени Δt^* сводится к решению задачи выбора варианта искусственной нейронной сети, реализующей такую функцию P , для которой квадрат ошибки предсказания значения величины ρ является минимальным:

$$P = \min_{\rho} \sum_{i=t}^{t+\Delta t^*} [\rho_i - \bar{\rho}_i]^2, \quad (2)$$

где ρ_i – наблюдаемое значение средней загрузки вычислительной системы за последние пятнадцать минут в момент времени i .

Решение задачи (2) осуществляется за счет использования рекуррентных искусственных нейронных сетей и алгоритмов глубокого машинного обучения.

АРХИТЕКТУРЫ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Реализация функции (преобразования) $P(X_t, \Delta t^* | t \in \{t - \Delta t, t\})$ осуществляется рекуррентной искусственной нейронной сетью, состоящей из двух LSTM-сетей, соединенных последовательно – энкодера и декодера. Подобная архитектура получила название автоэнкодера, или автокодировщика. Обе сети задаются числом внутренних слоев N_{layers} , числом нейронов в каждом внутреннем слое H_{size} , а также количеством признаков, описывающих каждую точку входной последовательности I_{size} , подаваемой на вход нейронной сети. В момент времени t LSTM-сети принимают в качестве аргументов вектор скрытого состояния h_{t-1} , вектор состояния ячеек c_{t-1} , соответствующую строку матрицы X_t . Выходом LSTM-сети являются векторы h_t, c_t .

Итоговое значение $\bar{\rho}_t$ образуется за счет преобразования персептроном выхода последнего слоя LSTM-сети декодера согласно выражению

$$\bar{\rho}_t = \sigma(Wh_t + b),$$

где σ – функция активации сигмоида;
 W – обучаемая матрица весовых коэффициентов;
 b – вектор коэффициентов смещения.

Энкодер $LSTM_E$ используется для создания внутреннего представления истории мониторинга вычислительной системы $X_t - h_E$. Роль энкодера – создание сжатого представления истории загрузки системы на интервале времени Δt . Декодер принимает на вход внутреннее состояние энкодера в момент времени t , а также последнее известное значение предсказываемого параметра ρ_t .

Архитектура нейронной сети представлена на рис. 1. Для обучения нейронной сети используются три алгоритма, производные от классического алгоритма обучения нейронных сетей с учителем.

Первый алгоритм обучения основан на использовании механизма рекурсии, которая заключается в подаче на вход первого слоя сети-декодера в момент времени t_i выхода последнего слоя сети-декодера в момент времени t_{i-1} , т. е. предсказанной сетью-декодером величины $\bar{\rho}_i$.

Второй алгоритм на каждой итерации обучения сети-декодера предполагает случайное использование для предсказания величины $\bar{\rho}_{i+1}$ как априори известных истинных значений ρ_i , так и предсказанных самой сетью значений $\bar{\rho}_i$. При этом в рамках каждой итерации используются либо только значения величины ρ_i , либо только значения величины $\bar{\rho}_i$.

Третий алгоритм отличается от второго алгоритма тем, что принятие решения об использовании для предсказания величины $\bar{\rho}_{i+1}$ либо известного истинного значения ρ_i , либо предсказанного сетью значения $\bar{\rho}_i$, происходит случайно в ходе выполнения цикла по длине предсказываемой последовательности.

Последний алгоритм позволил получить наилучшие результаты в ходе проводимых вычислительных экспериментов.

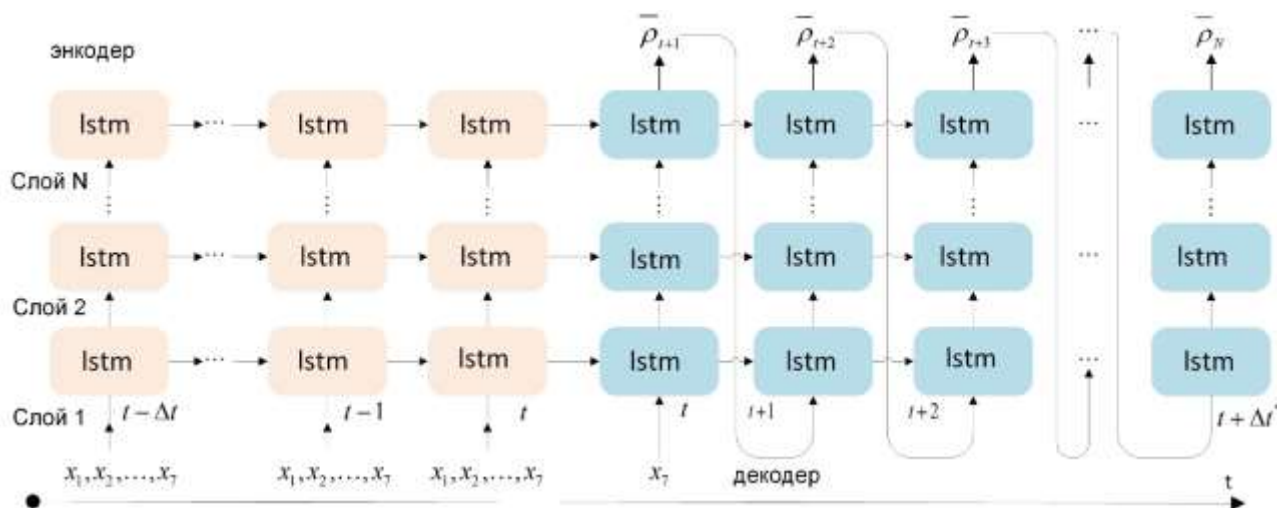


Рис. 1. Автоэнкодер прогноза загрузки системы без слоя внимания

Дальнейшим развитием архитектуры нейронной сети, представленной на рис. 1, является добавление в ее состав слоя внимания. Усовершенствованная архитектура нейронной сети представлена на рис. 2.

Предсказание значения $\bar{\rho}_{t+j}$ сетью с механизмом внимания основывается на использовании векторов скрытого состояния энкодера h_i^1 , $i \in [t - \Delta t, t]$ и одного вектора скрытого состояния декодера для момента времени $j - h_j^2$. Размер каждого из указанных векторов – H_{size} .

В работе рассмотрены два алгоритма расчета величины $\bar{\rho}_{t+j}$ с использованием механизма внимания. Первый – классический алгоритм внимания нейронной сети, используемый в задачах машинного перевода [1], второй алгоритм основывается на свертке скрытых состояний энкодера с использованием 2D сверточной нейронной сети, основным настраиваемым параметром которой является количество фильтров сети.

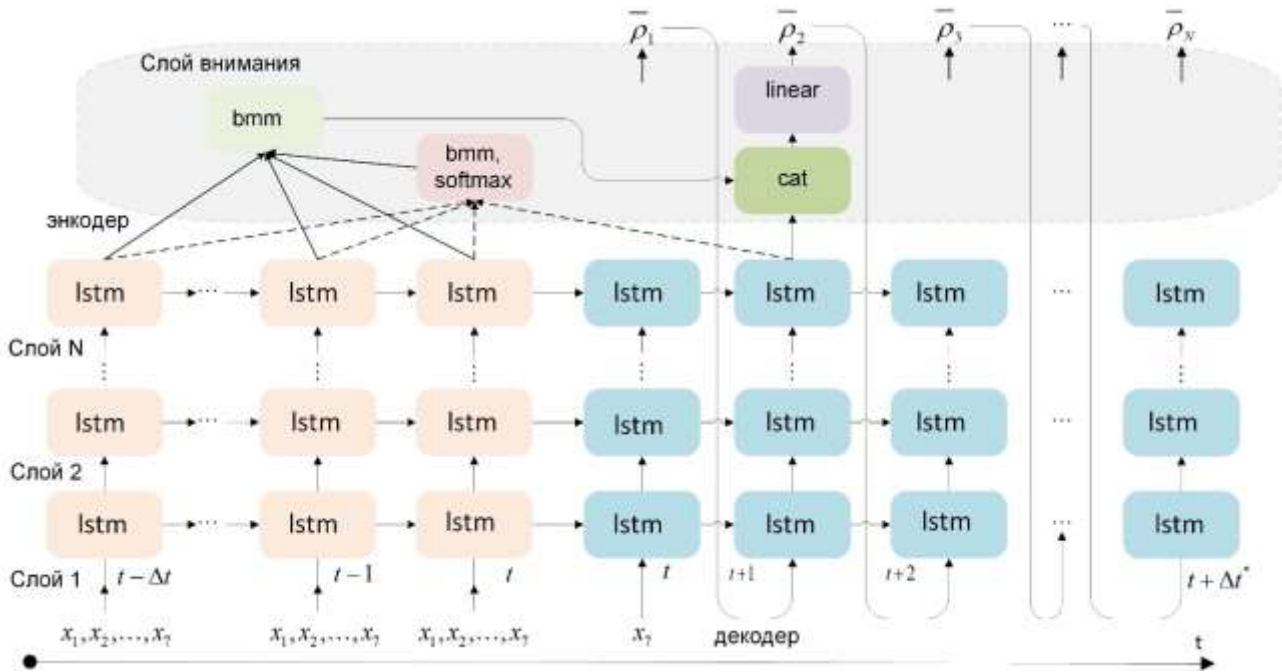


Рис. 2. Автоэнкодер прогноза загрузки системы с добавлением слоя внимания (на рисунке детализирован процесс формирования выхода $\bar{\rho}_2$)

Первый алгоритм состоит из следующих шагов.

Шаг 1. На основе векторов h_i^1 формируется матрица H размерностью $k \times H_{size}$, где k – длительность интервала наблюдения данных, используемых для прогноза, Δt в минутах.

Шаг 2. Матрица H преобразуется в матрицу размерностью $1 \times k$ путем произведения матриц $H = h_j^2 H^T$.

Шаг 3. Элементы матрицы H уточняются согласно выражению

$$h_{ij} = \frac{\exp(h_{ij})}{\sum_{k=1}^{\Delta t} \exp(h_{ik})}.$$

В результате выполнения шага 3 матрица H представляет собой матрицу весовых коэффициентов, характеризующих меру влияния i -го элемента входной последовательности на значение величины $\bar{\rho}_{t+j}$.

Шаг 4. Выполняется расчет вектора внимания h_a , $h_a = Hh_j^2$, после чего выполняется его конкатенация с вектором h_j^2 , $h = h_a \cup h_j^2$.

Шаг 5. Итоговое значение образуется за счет преобразования вектора h согласно выражению

$$\bar{\rho}_t = \sigma(Wh + b).$$

Детальное описание второго алгоритма представлено в работе [2].

ДЕТАЛИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Параметрами рассматриваемых нейронных сетей являются:

- скорость обучения;
- параметры LSTM-сети N_{layers} , H_{size} ;
- число элементов обучающей выборки B_s , используемых для одного обратного прохода по нейронной сети.

В нейронной сети со слоем внимания на основе сверточной нейронной сети дополнительным гиперпараметром является число используемых фильтров N_f .

Настройка параметров осуществлялась в соответствии с методикой сеточного поиска [3]. Рассматривались варианты нейронных сетей, построенных на базе LSTM-сетей, для которых величина H_{size} устанавливалась кратной степеням двойки от 2^5 до 2^{10} , $N_{layers} \in \overline{1,6}$.

Скорость обучения сети устанавливалась кратной десяти в интервале значений от 0,1 до 0,0001.

Размер порции данных для обучения устанавливался кратным степени двойки от 2^4 до 2^9 . Количество фильтров устанавливалось кратным степеням двойки в интервале значений от 2^0 до 2^5 . Длина последовательности данных, подаваемых на вход энкодера, устанавливается равной 60, длина прогноза принимается равной 30 минутам. Исходные данные предварительно подвергались процедуре нормирования в диапазоне значений от -1 до 1.

Множество исходных данных, подаваемых на вход нейронной сети, сформировано с использованием системы распределенного мониторинга вычислительных систем и сетей zabbix. В качестве объекта мониторинга рассматривался вычислительный стенд, характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики вычислительного стенда – объект исследования

Наименование параметра	Значение параметра
Модель центрального процессора	Intel® Xeon® CPU E5-2690
Количество процессоров в системе	2
Количество вычислительных ядер/потоков на одном процессоре	14/28
Операционная система	Astra Linux 1.6 SE
Объем оперативной памяти	128 Gb

Мощность множества исходных данных составила 16437 записей, из них для тренировки нейронных сетей использовалось 13000 записей, для валидации – 1500 записей, остальные записи использовались для выполнения процедуры тестирования. Дополнительно сформировано множество тестовых данных D_{spec} , содержащее участок данных, для которого характерна максимальная дисперсия наблюдаемых и прогнозируемых значений. Множество D_{spec} использовалось для оценки эффективности применения механизмов внимания нейронной сети.

Реализация программного кода нейронных сетей осуществлена на языке программирования python версии 3.9.5 с использованием фреймворка pytorch, библиотек pandas и matplotlib в среде операционной системы Debian 11. Характеристики вычислительного стенда, используемого для обучения, валидации и тестирования нейронных сетей, представлены в табл. 2.

В качестве функции потерь предсказания величины \bar{p}_i использовалась функция расчета среднеквадратичной ошибки MSELoss фреймворка pytorch. Для расчета градиента функции потерь при обратном распространении ошибки использовался алгоритм Adam и его соответствующая реализация в фреймворке pytorch.

Таблица 2

Характеристики вычислительного стенда – рабочая станция, реализующая процесс обучения, валидации и тестирования нейронных сетей

Наименование параметра	Краткая характеристика
Модель центрального процессора	Intel(R) Xeon(R) Silver 4210 CPU
Количество процессоров в системе	1
Количество вычислительных ядер/потоков на одном процессоре	10/20
Операционная система	Debian 11 Bullseye
Объем оперативной памяти	32 Gb
GPU Nvidia Quadro RTX 4000 память/частота/число ядер	8 Gb/1545 MHz/2304

Гистограммы, характеризующие ошибки тренировки и тестирования нейронной сети в зависимости от значений гиперпараметров N_{layers} , H_{size} , представлены на рис. 3, 4. Количество эпох тренировки нейронных сетей устанавливалось равным 150.

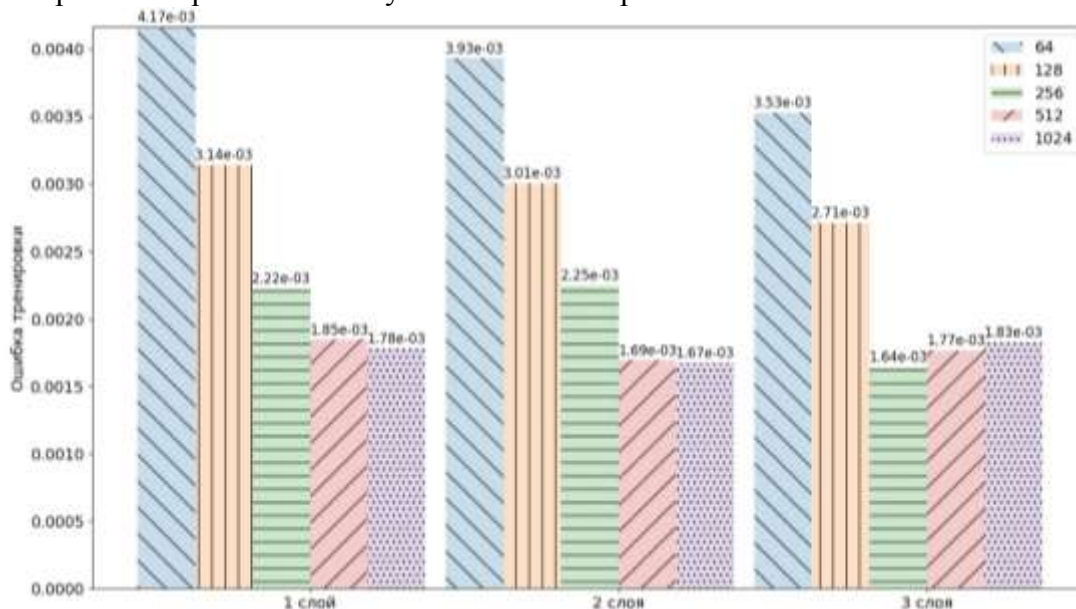


Рис. 3. Ошибка тренировки нейронной сети

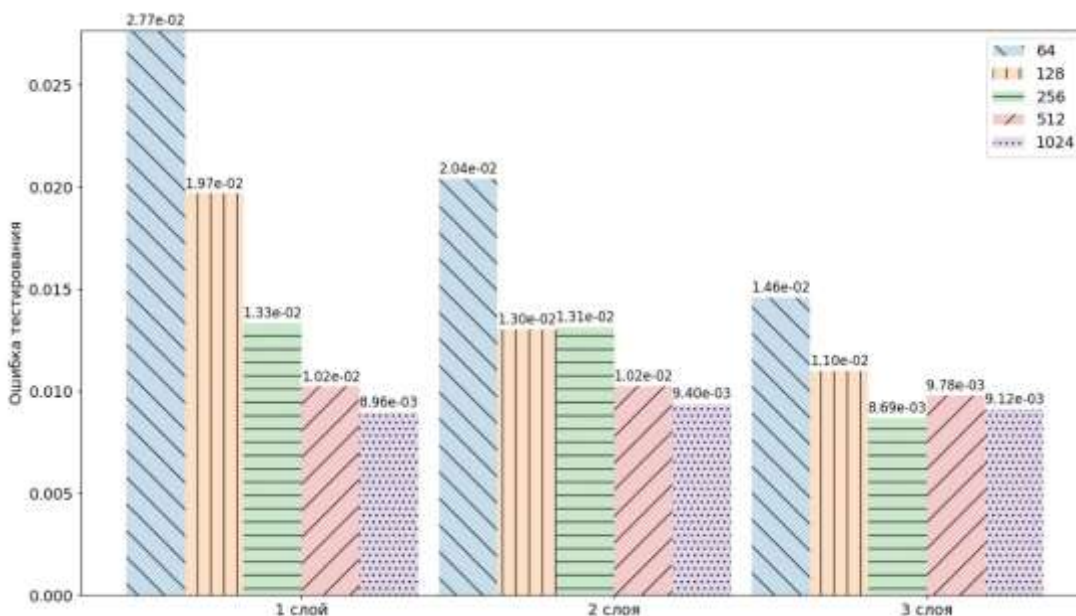


Рис. 4. Ошибка тестирования нейронной сети

В процессе вычислительного эксперимента установлено, что увеличение глубины нейронной сети за счет повышения числа слоев свыше трех не приводит к уменьшению ошибки тестирования сети и существенно увеличивает время выполнения процедуры обучения. На основании данных, представленных на рис. 3, 4, выбрана архитектура трехслойной нейронной сети A^* , с параметром H_{size} , равным 512. Представленные ниже результаты тренировки нейронных сетей получены для длительности тренировки, равной 300 эпохам.

Скорость обучения и величина параметра B_s оказывают определяющее влияние на число итераций, необходимых для обучения нейронной сети, а также на длительность выполнения одной эпохи обучения. Для вычислительного стенда, характеристики которого представлены в табл. 2, значение параметра B_s принималось равным 512.

Динамика обучения варианта нейронной сети N_1 без использования механизма внимания представлена на рис. 5. Здесь и далее величина ошибок приведена для нормированных данных.

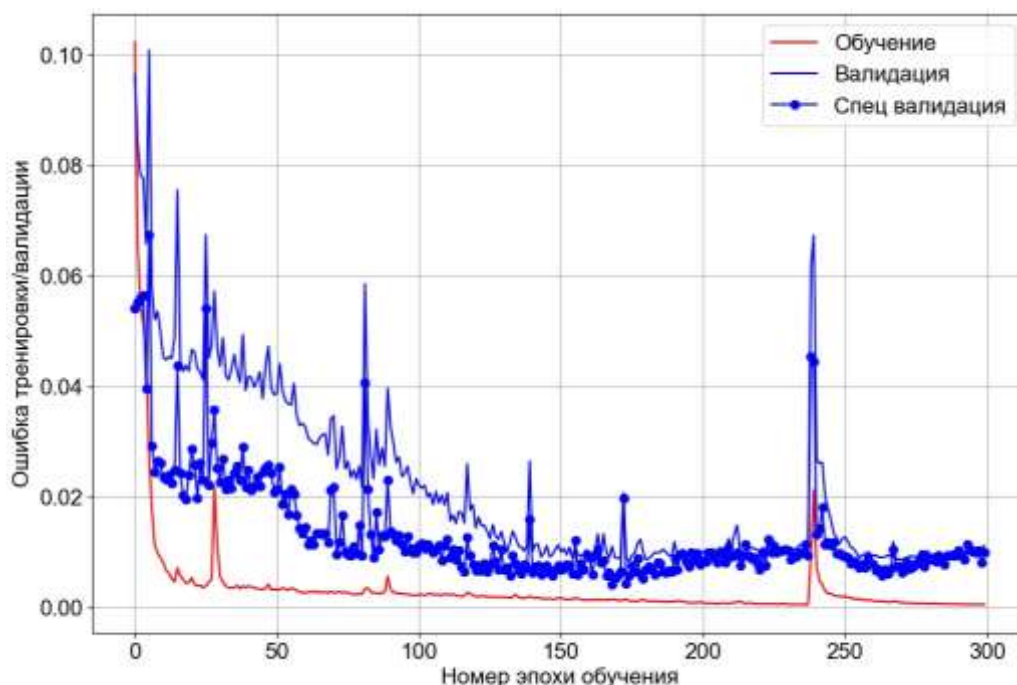


Рис. 5. Функции ошибок тренировки и валидации нейронной сети (без механизма внимания, минимальная ошибка 0,0088)

Согласно данным, представленным на рис. 5, переобучение нейронной сети происходит после 230 эпох тренировок. На рис. 5 также представлен тренд ошибки валидации, сформированной на данных множества D_{spec} . В условиях отсутствия механизма внимания нейронной сети после 150 эпох обучения наблюдается тенденция увеличения ошибки прогноза сети на данных множества D_{spec} , в то время как общая ошибка предсказания для валидационных данных продолжает уменьшаться, т. е. сеть хорошо предсказывает загрузку системы в большинстве возможных ситуаций, но на данных множества D_{spec} ошибка предсказания существенно выше среднестатистической. Применение механизма внимания позволяет разрешить данную особенность процесса обучения. Результаты обучения нейронных сетей с двумя видами механизма внимания представлены на рис. 6, 7.

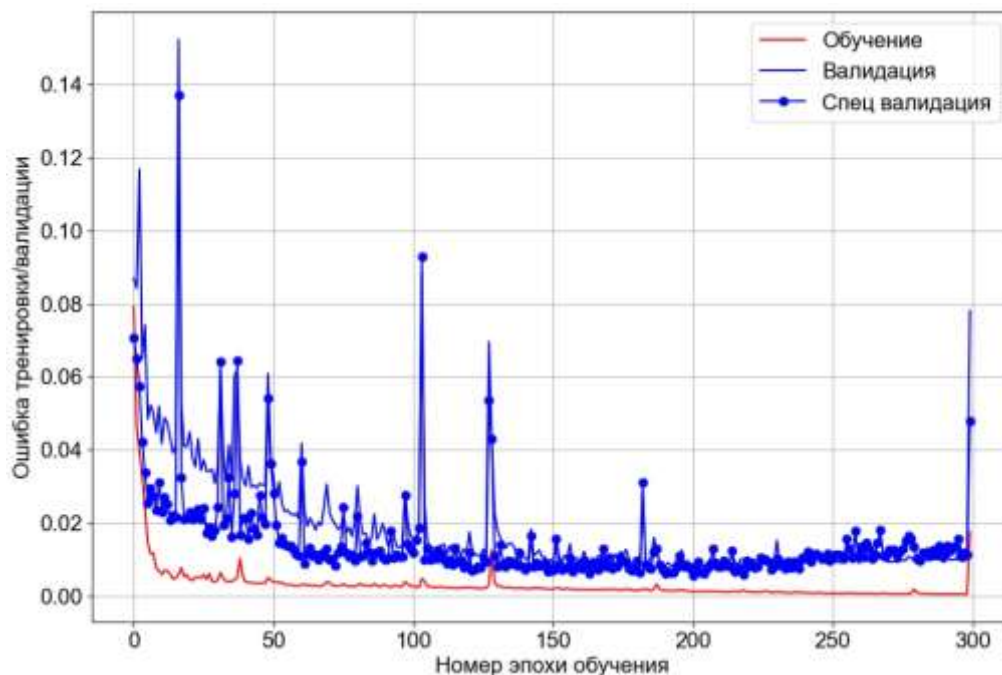


Рис. 6. Функции ошибок тренировки и валидации нейронной сети (с использованием механизма внимания, минимальная ошибка 0,0085)

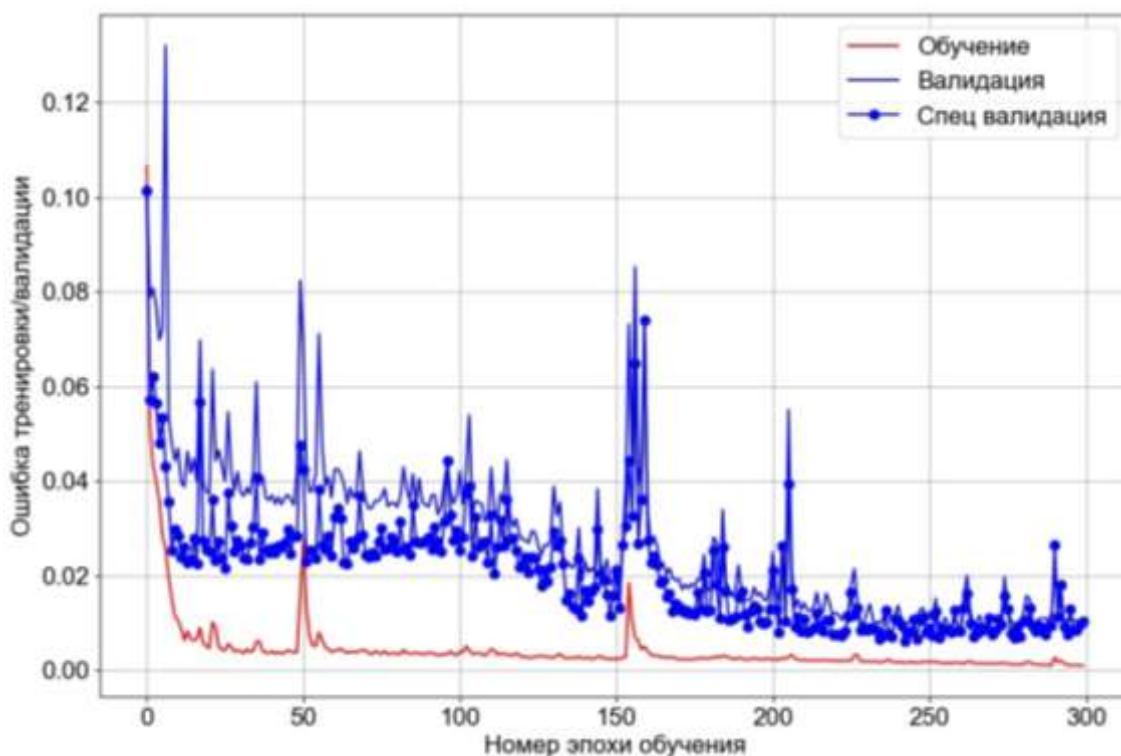


Рис. 7. Функции ошибок тренировки и валидации нейронной сети (с использованием механизма внимания на основе сверточной нейронной сети, минимальная ошибка 0,0089)

Для классического механизма внимания искусственной нейронной сети N_2 характерна высокая стабильность процесса обучения, вместе с тем после 220 эпохи обучения вновь наблюдается тенденция увеличения ошибки прогноза сети на данных множества D_{spec} , в то

время как общая ошибка предсказания для валидационных данных продолжает уменьшаться. Наиболее стабильные результаты прогноза достигаются с использованием механизма внимания на основе сверточной нейронной сети N_3 . Время выполнения одной эпохи обучения нейронных сетей N_1 , N_2 , N_3 составило 2,46 секунды, 4,98 секунды и 10,17 секунд соответственно. Точность предсказания всех трех типов нейронных сетей приблизительно одинакова, вместе с тем на данных множества D_{spec} точность сети N_3 равна итоговой точности на общем тестовом и валидационном множествах.

Сравнение результатов прогноза нейронной сетью N_3 на множестве тренировочных и тестовых данных представлено на рис. 8.

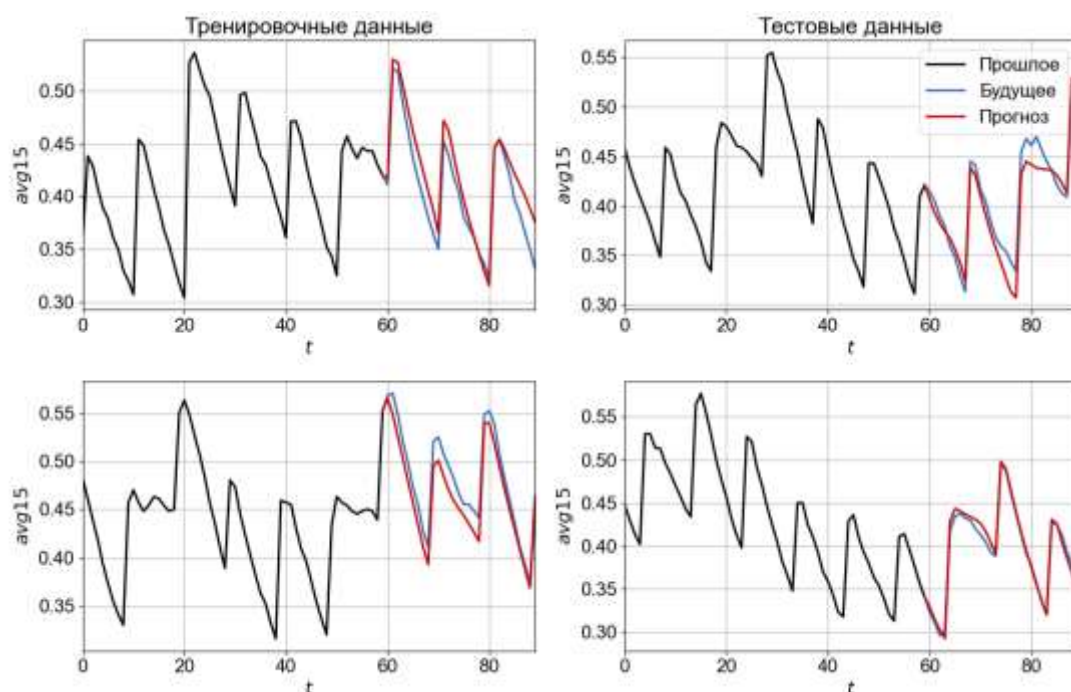


Рис. 8. Прогноз величины загрузки вычислительной системы на 30-минутный интервал времени

На рис. 8 представлен тренд колебания средней загрузки вычислительной системы, спецификация которой представлена в табл. 1. Значение тренда, равное 1, соответствует 100%-ной (сто процентной) загрузке всех 56 микропроцессорных ядер системы. Из данных, представленных на рис. 8, следует, что нейронная сеть достоверно предсказывает тренд изменения средней загрузки вычислительной системы на 30-минутном интервале времени. Средняя квадратичная ошибка предсказания значения загрузки системы не превышает 0,009. Данное качество нейронной сети позволяет строить на ее основе диспетчер распределения аппаратных ресурсов системы гипервизором между гостевыми операционными системами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика обеспечивает достоверный прогноз загрузки вычислительной системы на основе истории событий о состоянии вычислительной системы. Рассмотренные нейронные сети легко масштабируются с целью увеличения числа учитываемых параметров, могут быть обучены особенностям функционирования вычислительных систем, используемых для сбора, обработки и анализа данных в любой сфере автоматизации. Применение ме-

ханизма внимания повышает обобщающую способность нейронной сети и достоверность результатов прогноза средней загрузки вычислительной системы в условиях обслуживания нестационарных потоков заявок.

В ходе дальнейших исследований является целесообразным выполнить сравнительный анализ результатов прогноза средней загрузки вычислительных систем, формируемых рассмотренными выше нейронными сетями и другими методами прогноза временных рядов, например, методами двойного и тройного экспоненциального сглаживания.

Список используемых источников

1. *Luong M., Pham H., Manning C.* Effective approaches to attention-based neural machine translation. – URL: <https://arxiv.org/abs/1508.04025>, 2015 (дата обращения: 15.11.2021).
2. *Shin S.Y., Sun F.K., Lee H.Y.* Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting. *Mach Learn* 108, 1421–1441 (2019). – URL: <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05815-0> (дата обращения: 15.11.2021).
3. *Аггарвал Ч.* Нейронные сети и глубокое обучение: учеб. курс: пер. с англ. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 752 с.

В.В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
А.В. Лагун,
кандидат технических наук, доцент;
А.Д. Сыров

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА И СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ ПРИ СТАРТЕ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

В статье обозначена роль пускового оборудования в составе стартового комплекса. Проведен тепловой расчет металлооблицовки газового отражателя при воздействии на него газовой струи продуктов сгорания двигательной установки ракеты космического назначения и последующего остывания. Показаны результаты моделирования тепловых деформаций. Проведена оценка влияния теплового нагружения на металлооблицовку. Разработан и описан способ снижения деструктивного воздействия на элементы пускового оборудования газовой струи продуктов сгорания двигательной установки путем создания пленочной водяной завесы.

Ключевые слова: газодинамические нагрузки, тепловые нагрузки, ракета космического назначения, двигательная установка, пусковые установки, газоотражатель.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее опасным этапом функционирования стартового комплекса (СК) является пуск ракеты космического назначения (РКН). Воздействие сверхзвуковой струи продуктов сгорания двигательной установки (ДУ) РКН может нести разрушительный характер не только для технологического оборудования (ТО) СК, но и для ракеты в целом. Поэтому при пуске РКН технологическим оборудованием СК решается несколько задач, связанных как с защитой РКН, так и элементов СК от возникающих деструктивных воздействий [1]. Наибольшему деструктивному воздействию при старте подвергаются элементы пускового оборудования. При проектировании современного СК на космодроме Восточный был проведен всесторонний анализ деструктивных воздействий от работы ДУ РКН при старте на элементы стартового сооружения и пускового устройства (ПУ).

Расчеты тепловых режимов металлооблицовки газоотражателя показали, что при пусках РКН «Союз-2» (варианты 1А, 1Б, 1В) [5] максимальные значения температуры поверхности металлооблицовки T_w составляют:

1) для РКН «Союз-2» (этапов 1А, 1Б):

$T_w \approx 630^\circ\text{C}$ – в «ближних пятнах струй» боковых двигателей 14РД22;

$T_w \approx 260^\circ\text{C}$ – в «пятнах струй» центрального двигателя 14РД21;

2) для РКН «Союз-2» (этапа 1В):

$T_w \approx 1400^\circ\text{C}$ – в «пятне струи» двигателя НК33А.

При таком уровне теплового воздействия на металлооблицовку газоотражателя в данной зоне ее наружный приповерхностный слой будет прогреваться до высоких температур от 550°C до 1400°C , что может привести к изменению структуры и постепенному (от пуска к пуску) ухудшению прочностных свойств стали в этом слое, а также появлению в данной зоне металлооблицовки температурных напряжений и деформаций.

В связи с этим возникает необходимость разработки в составе ТО СК дополнительной системы, обеспечивающей снижение температурных нагрузок на газодуод ПУ, что позволит решить задачу увеличения долговечности элементов ПУ при существующих условиях эксплуатации. Применение такой системы позволит при пуске РКН также выполнить задачу защиты днища ступени РН от возникающих пусковых нагрузок.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБОРУДОВАНИЕ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА

При старте РН технологическое оборудование, системы и сооружения стартовых ракетных комплексов работают в весьма специфических условиях, что определено воздействием высокотемпературной газовой струи при запуске двигательной установки РН. Решению проблемы снижения температурных нагрузок отводится отдельная задача.

Постановка задачи для расчета тепловой нагрузки на элементы ПУ. Квадратная пластина, изготовленная из материала Ст3, лежащая на недеформируемом основании, нагружена по своей наружной поверхности равномерно распределенным давлением, зависящим от времени, $P_0(t)$. Давление противодействия – давление при нормальных условиях $P_{\text{нУ}} = 0,1$ МПа. Через наружную поверхность пластины (стенку) задан тепловой поток $q_2 = q_{\text{в0}}(t)$ при температуре стенки, равной температуре нормальных условий $T_{\text{нУ}} = 300^\circ\text{К}$.

Поток вычислен по температуре газа T_e и коэффициенту теплоотдачи, являющемуся функцией T_e . Основание консервативно считается абсолютно нетеплопроводным $q_1 = 0$.

Тепловое и механическое воздействия длятся в течение заданного диапазона времени. Считается, что в начальный момент времени ($t = 0$) температура пластины равна температуре нормальных условий $T_{\text{нУ}} = 300^\circ\text{К}$. После окончания воздействия пластина остывает до температуры нормальных условий.

Нагрев листа. Результаты газодинамических расчетов показывают, что температурные поля и поля скоростей газа около стенок металлической облицовки существенно неравномерны как по длине газохода, так и на каждой из панелей [4]. Исходя из этого в качестве допущений теплового расчета принято условие о том, что расчет проводится при осредненных равномерных по площади листов облицовки значениях скоростей газового потока и температуры газа (рис.1).

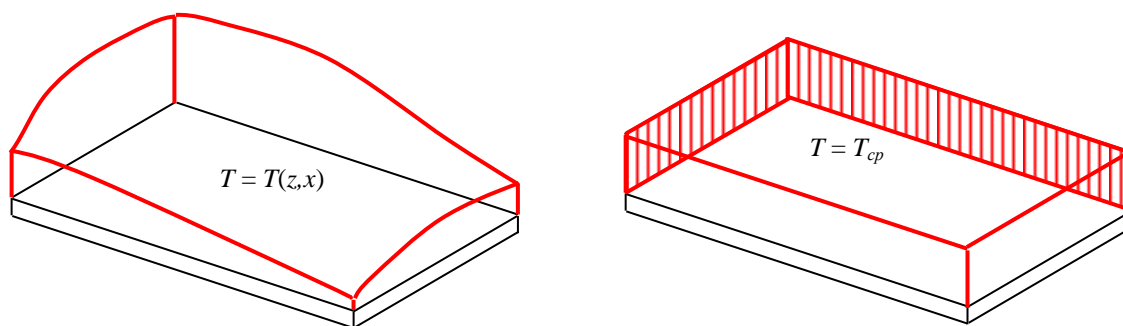


Рис. 1. Распределение нагрузки

В расчете приняты следующие допущения.

1. Материал листа облицовки Ст3, толщиной 100 мм обладает постоянством теплофизических свойств – теплопроводности, плотности и теплоемкости.
2. Геометрия листа позволяет ставить задачу нагрева в одномерной постановке (по толщине листа).
3. В качестве граничных условий на «горячей» стороне листа приняты условия третьего рода. Тепловой поток в стенку переменный и задается функцией

$$q_r = \alpha_r (T_{\text{ст}} - T_0^r),$$

где α_r – коэффициент теплопередачи (теплообмена, теплоперехода).

Значение коэффициента теплопередачи определяется критериальным уравнением, характерным для листа облицовки:

$$Nu = 0.0023 Re^{0.8} Pr^{0.4},$$

где Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля.

Числа Re и Pr определялись по соотношениям:

$$Re = \frac{u_r \rho_r d_{стр}}{\mu_r}; Pr = \frac{v}{a} = \frac{\mu_r c_r}{\lambda_r},$$

где u_r , $d_{стр}$, ρ_r , μ_r – скорость, диаметр, плотность и динамическая вязкость газовой струи соответственно.

Число Нуссельта (Nu) для критериального уравнения определяется по соотношению

$$Nu = \frac{\alpha_r \delta_{погр}^{тепл}}{\lambda_r},$$

где λ_r – коэффициент теплопроводности газа;
 $\delta_{погр}^{тепл}$ – величина теплового пограничного слоя.

Для определения теплового пограничного слоя $\delta_{погр}^{тепл}$ использовано соотношение

$$\delta_{погр}^{тепл} = 0,332 \cdot \frac{\lambda_r}{\alpha_r} \cdot \sqrt[3]{Pr} \cdot \sqrt{Re_x},$$

где Re_x – местное число Рейнольдса:

$$Re_x = \frac{u_r \rho_r x}{\mu_r},$$

где x – пространственная координата по толщине листа.

4. Граничные условия на «холодной» стороне листа задавались естественной конвекцией в зазоре между металлом облицовки и бетонным массивом строительного сооружения (рис. 2):

$$q^{конв} = \alpha^* (T_{возд} - T_{стенка}).$$

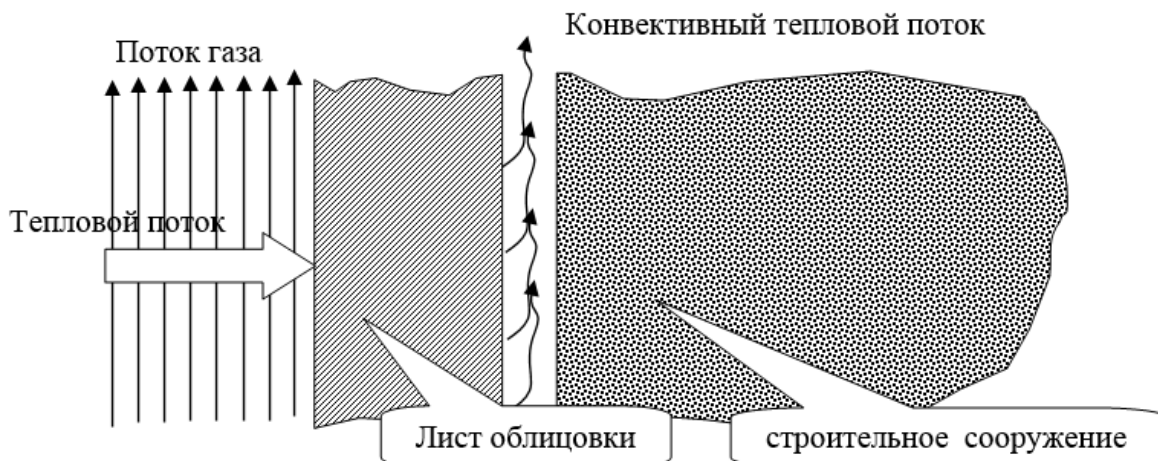


Рис.2. Расчетная схема нагрева облицовки

Значение коэффициента теплопередачи $\alpha^* = \alpha^*(Nu^{конв})$ для конвективного теплообмена определялось на основании критериального уравнения

$$Nu^{\text{конв}} = 0.8(Gr^{\text{конв}} Pr^{\text{конв}})^{0.25},$$

где критерий Грасгофа (Gr) определялся по соотношению

$$Gr = g\beta\Delta T l^3 / \nu^2,$$

- где g – ускорение свободного падения;
 β – коэффициент объемного расширения воздуха (для газов $\beta = 1/T = 1/273$);
 ΔT – средняя температура перепада между стенкой и воздухом, $\Delta T = (T_{\text{стенка}} + T_{\text{возд}})/2$;
 l – высота листа;
 ν – кинематическая вязкость воздуха.

Исходные данные для листа металлооблицовки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические параметры листа металлооблицовки (СтЗ)

Параметры	Значение
Коэффициент теплопроводности листа	$\lambda_{\text{ст}} = 45,4 \text{ Вт/м/К}^0$
Коэффициент температуропроводности стенки	$a_{\text{ст}} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{c_{\text{ст}}\rho_{\text{ст}}} = 0,126 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
Толщина листа облицовки	$\delta_{\text{ст}} = 0,02 \text{ м}$
Начальная температура газового потока	2800 К^0
Начальная температура металлической облицовки	293 К^0
Время прогрева листа	10 с

Примечание. Значения параметров газа для тепловых расчетов использовались из результатов газодинамического расчета.

Тепловые расчеты выполнялись путем решения уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

- где a – коэффициент температуропроводности;
 x – пространственная координата по толщине листа.

Фрагменты расчета изменения температуры по толщине листа показаны на рис. 3–5.

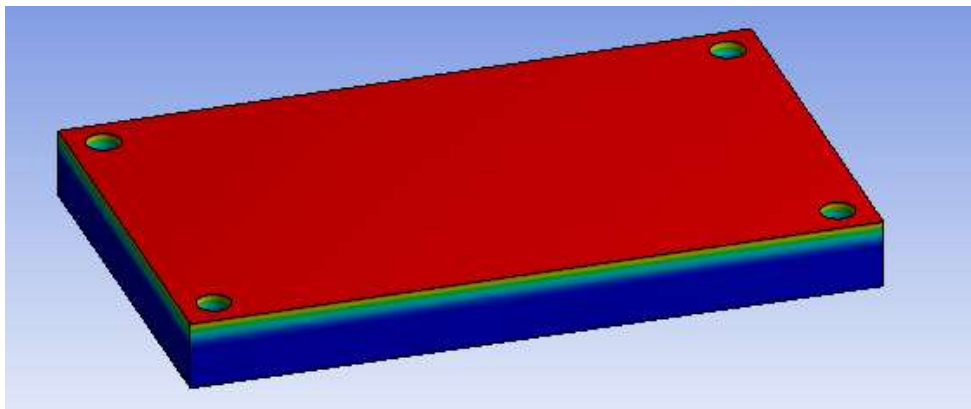


Рис. 3. Общий вид моделирования изменения температуры по толщине листа

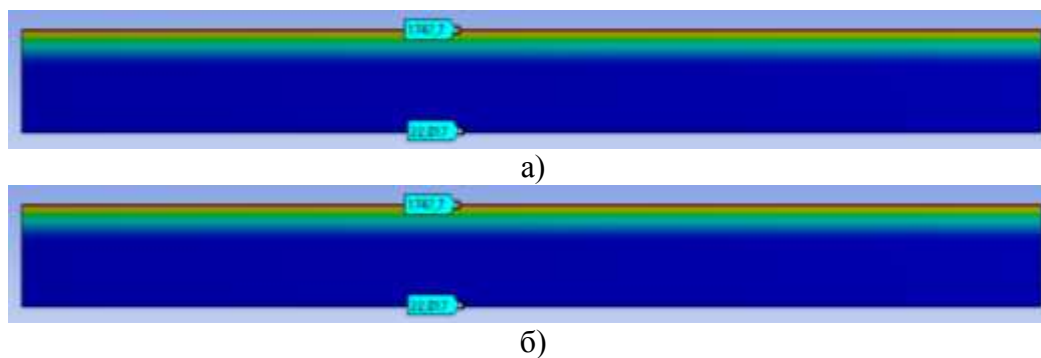


Рис. 4. Начало прогрева:
а – 3 секунды; б – 7 секунд

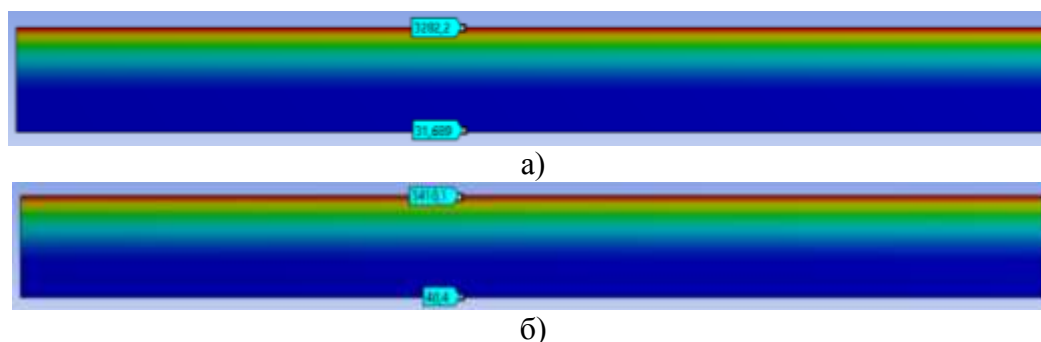


Рис. 5. Окончание прогрева:
а – 9 секунд; б – 10 секунд

Остывание листа. Граничные условия расчета на обеих сторонах листа облицовки аналогичны. В основе определения граничных условий лежит соотношение по определению коэффициента теплопередачи, но при условии конвективного теплообмена между нагретым листом и обеими поверхностями листа облицовки (рис.6).

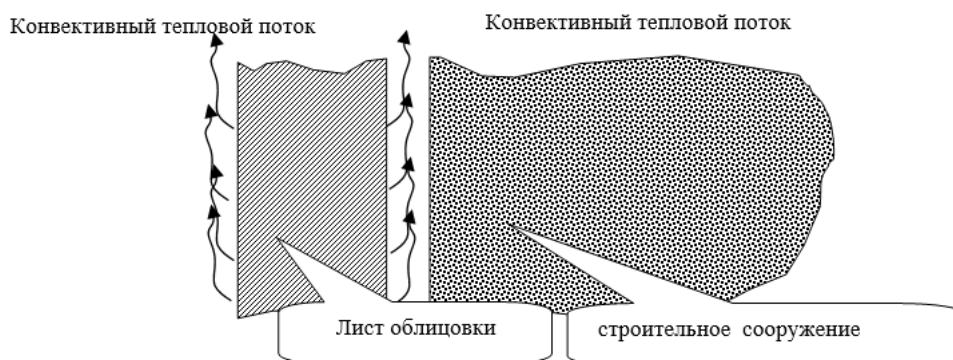


Рис. 6. Расчетная схема остывания

Основное допущение, использованное в расчетах, сводится к тому, что тепловой поток от газа мгновенно прекращен через 10 с после пуска ДУ РКН.

Дальнейшее остывание происходит за счет конвективного теплообмена между нагретой стенкой и окружающим воздухом, а также за счет продвижения температурного поля от наружной стенки к внутренней, с последующим остыванием всего листа облицовки. Фрагменты результатов решения задачи остывания показаны на рис. 7 и 8.

Общий график изменения температур наружной и внутренней сторон листа представлен на рис. 10.

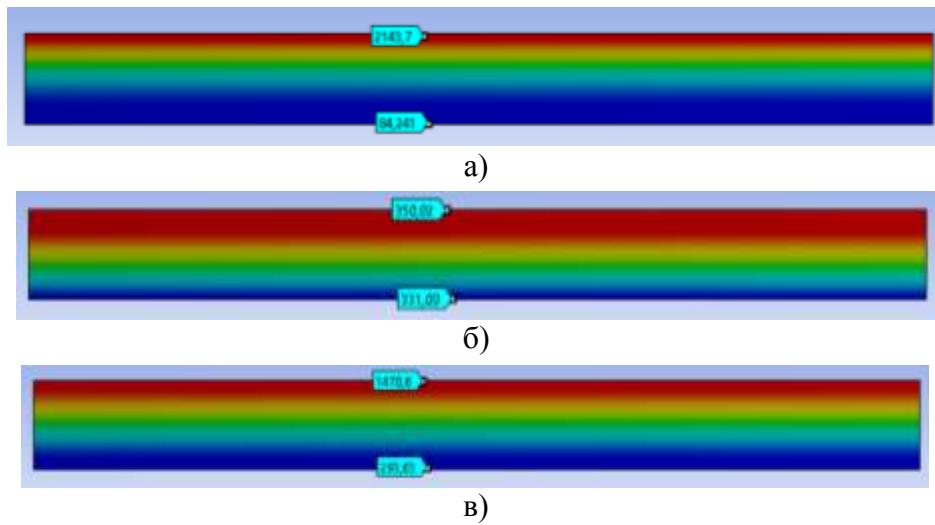


Рис. 7. Остывание:
а – 13 секунд; б – 25 секунд; в – 70 секунд

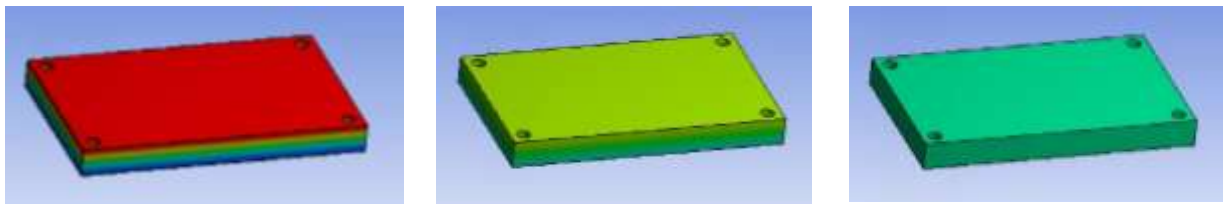


Рис. 8. Процесс нагрева и остывания

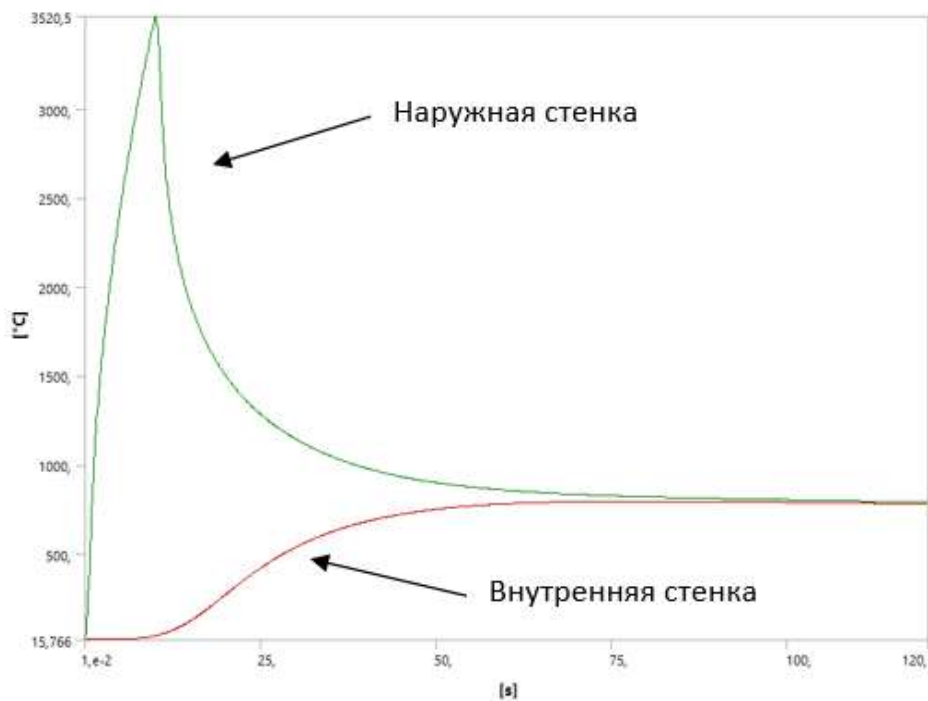


Рис. 9. График изменения температур наружной и внутренней сторон листа

Как видно из рис. 7–9 после примерно 80 секунд остывания температура листа по всей его толщине становится одинаковой, а сам уровень температур медленно снижается.

Расчеты показывают, что интенсивность остывания по мере снижения градиента температур между воздухом и облицовкой газохода замедляется. Полное выравнивание температур наступает примерно через 15–17 часов. Из расчетов по оцениванию тепловой картины пуска видно, что металлические листы газохода на первые десятки секунд после пуска находятся под мощным температурным перепадом (до $\Delta T = 800 \text{ K}^\circ$). Однако, и в дальнейшем, когда температурный перепад между поверхностями листа пропадает, лист длительное время находится в «сильно» нагретом состоянии. Вследствие кратковременности и высокой интенсивности теплового воздействия температура элемента существенно неравномерно распределена по его толщине [3]. Неравномерный прогрев вызывает термонапряжения и термодформации, в том числе, пластические. Чем более свободной (податливой) является схема закрепления элемента и чем меньше неравномерность температурного поля, тем выше будут термодформации и ниже термонапряжения и пластические деформации [2].

Расчет на прочность. В основе расчета лежат результаты расчета прогиба срединной поверхности пластины, для определения которого использованы интегралы классического уравнения:

$$\frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} \nabla^2 \nabla^2 w = P(x, y) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2T \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y},$$

где w – прогиб листа, $w = w(x, y)$;

N_i – сжимающая сила на единицу длины, действующая по периметру, $N_i = \sigma_i / \delta$;

T – сдвигающая сила на единицу длины, действующая по периметру, $T = \tau_{xy} / \delta$.

Изменения предела текучести и модуля упругости при повышенных температурах определяются по соотношениям:

$$\sigma_T = 369(t \text{ C}^0)^{-0,1729} \text{ МПа};$$

$$E = E_0(1 + 2,5 \cdot 10^{-5}t - 2,208 \cdot 10^{-6}t^2 + 510^{-9}t^3 - 4,16710^{-12}t^4) \text{ МПа}.$$

Максимальные напряжения от поверхностных сил давления на пластине оцениваются по соотношению

$$\sigma_p = (0,338 \div 0,6) P \frac{l_1^2}{\delta^2}.$$

В расчетах численных значений параметров пластины и нагрузки

$$\sigma_p = 101,25 \text{ МПа}.$$

Профиль температур при нестационарном нагреве успешно аппроксимируется соотношением

$$T(z) = T_{\text{внутр}} + \Delta T \left(1 - \frac{z^2}{\delta^2} \right),$$

где δ – толщина листа;

z – текущая координата пространства по толщине листа.

Тогда напряжения на нагретой стороне листа определяются соотношением

$$(\sigma^r)_x^{\text{нар}} = (\sigma^r)_y^{\text{нар}} = -\frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{3} \Delta T,$$

а на внутренней стороне их уровень определяется соотношением

$$(\sigma^t)_x = (\sigma^t)_y = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{2}{3} \Delta T.$$

Для подтверждения теоретических положений проведено моделирование нагрузок с использованием универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS, а именно программное обеспечение ANSYS Mechanical, которое предназначено для проведения различных расчетов в рамках механики сплошной среды.

Так как локальное давление в зоне натекания струи на отражатель и в местах изменения геометрии составляет $0,1 \div 1$ МПа, в моделировании нагружения рассматривался вариант наиболее критического (опасного) случая – 1 МПа.

В расчетах лист металооблицовки зафиксирован в местах крепления (А, В, С, D) и на поверхность плиты создается нагрузка в 1 МПа (рис. 10).

На рис. 11 и 12 представлены результаты моделирования нагружения.

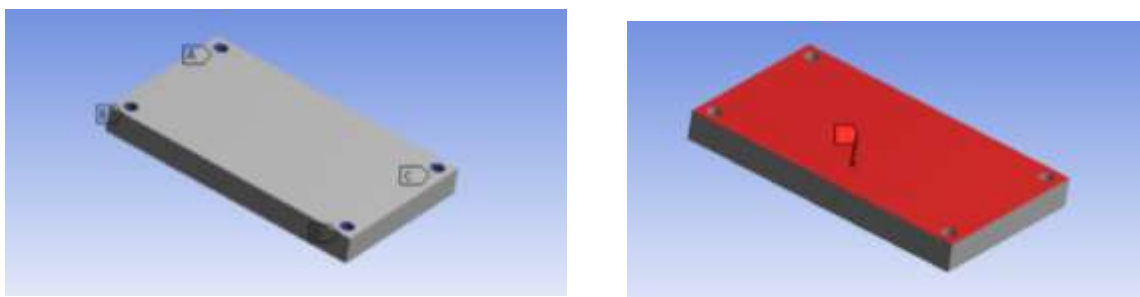


Рис. 10. Задание условий нагружения

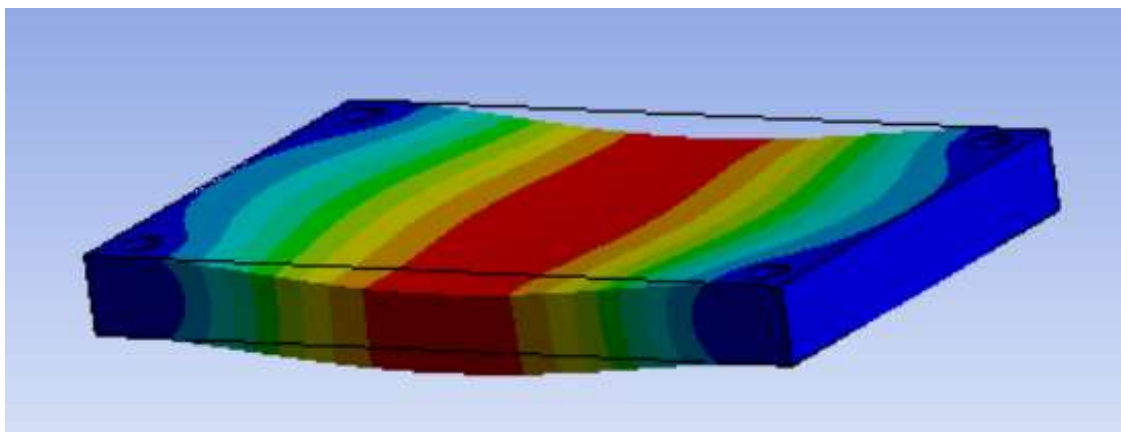


Рис. 11. Общий вид нагружения плиты

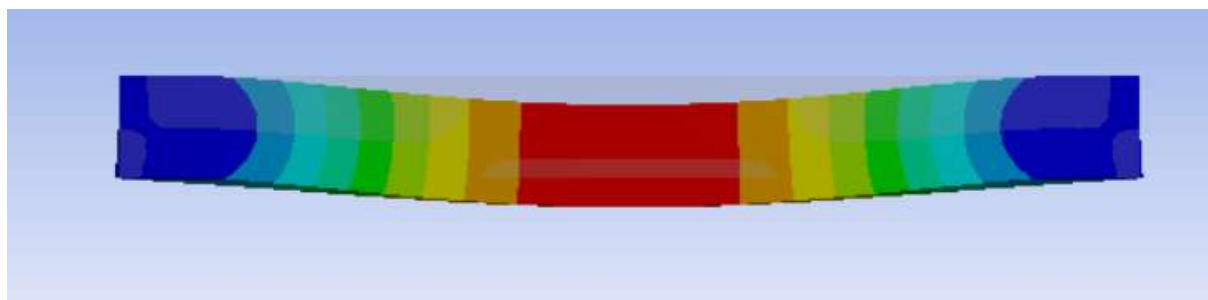


Рис. 12. Вид сбоку

При моделировании не учитывалось изменение давления газовой струи по мере ухода РКН с ПУ.

В результате комплексной (силовой и тепловой) нагрузки верхние слои пластины сжаты как от сил давления, так и от температурных напряжений, что позволяет складывать сжимающие и растягивающие напряжения по толщине листа (рис. 13).

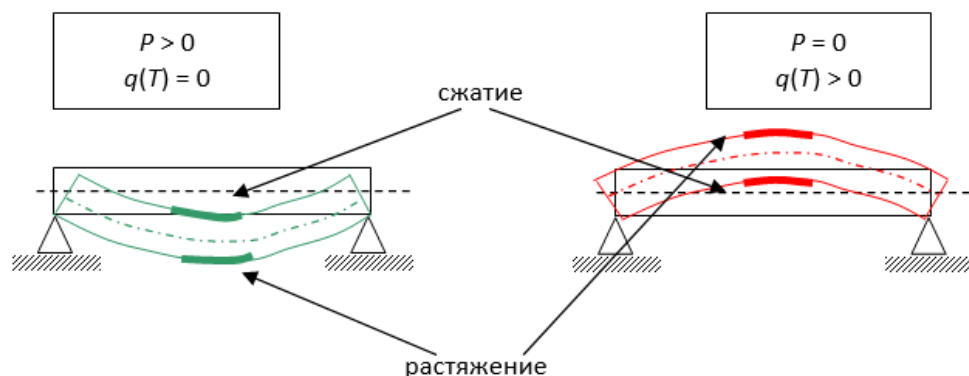


Рис. 13. Схема комплексной нагрузки

Проведенное моделирование позволило установить, что во время пуска (при тепловом ударе) верхние (горячие) слои листа находятся в состоянии пластики сжатия, а нижние (холодные) в состоянии пластики растяжения.

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА И СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

Выполненные расчеты подтверждают необходимость применения в составе ТО СК дополнительной системы, обеспечивающей снижение температурных нагрузок на газоход пускового устройства.

Такие изменения состава ТО СК не приведут к усложнению технологического процесса подготовки РКН на СК, не приведут к увеличению времени подготовки РКН на СК. При этом техническим результатом будет увеличение времени эксплуатации элементов стартового комплекса.

Сущность предлагаемого способа решения данной задачи заключается в создании на металлооблицовке газоотражателя пленочной водяной завесы перед запуском двигателя при старте РКН путем подачи жидкости из проема стартового сооружения. Суть способа иллюстрируют рис. 14–16.

Струя двигательной установки (2) при старте РКН через доли секунды достигает металлооблицовки газоотражателя, формируя тепловую нагрузку.

Для снижения этого воздействия создается пленочная дисперсная завеса (3) путем подачи охладителя через патрубки (4) водоводов (7) по всей длине газоотражающего устройства, через отверстия в металлооблицовке газохода. Для создания необходимого давления в каналах водоводов создается комплекс запорных вентилях (9) и система контроля давления (6). Необходимый запас охлаждающей жидкости для выполнения задачи хранится в емкости (8).

Под металлооблицовкой газохода создается сеть водоводов (7), имеющих в своем составе патрубки (4) (рис. 14). Через патрубки сквозь отверстия в металлооблицовке на ее поверхность подается охладитель с целью создания пленочных защитных дисперсных образований, помимо этого данные патрубки служат для фиксации металлооблицовки на поверхности газоотражателя (рис. 15).

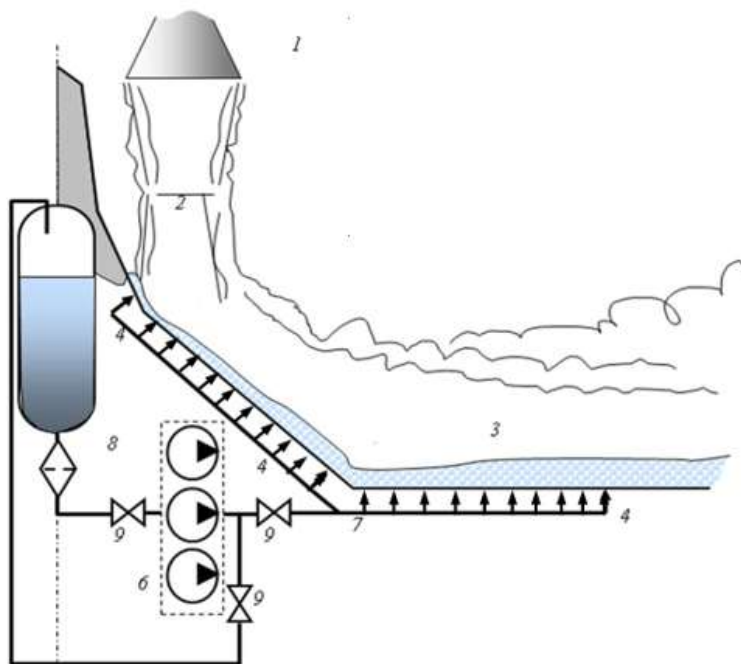


Рис. 14. Схема водяной системы охлаждения

Подвод охладителя через патрубки в поясах завесы обеспечивает устойчивость пленки. Процесс создания пленочной завесы на металлооблицовке газоотражающего устройства с помощью патрубков (4) и трубопроводов (7) схематично изображен на рис.16.

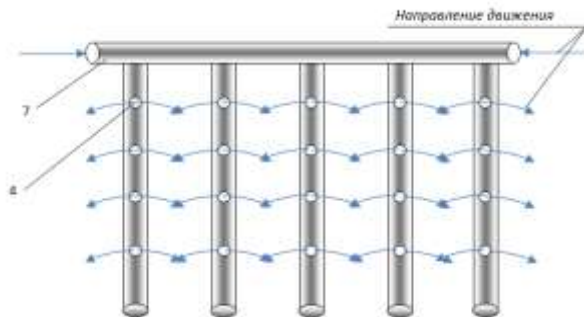


Рис. 15. Схема подачи охлаждающей жидкости через патрубки системы охлаждения

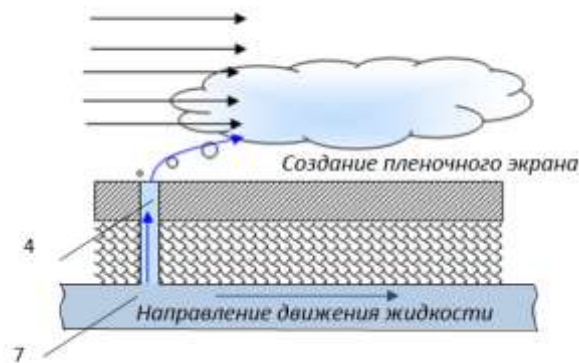
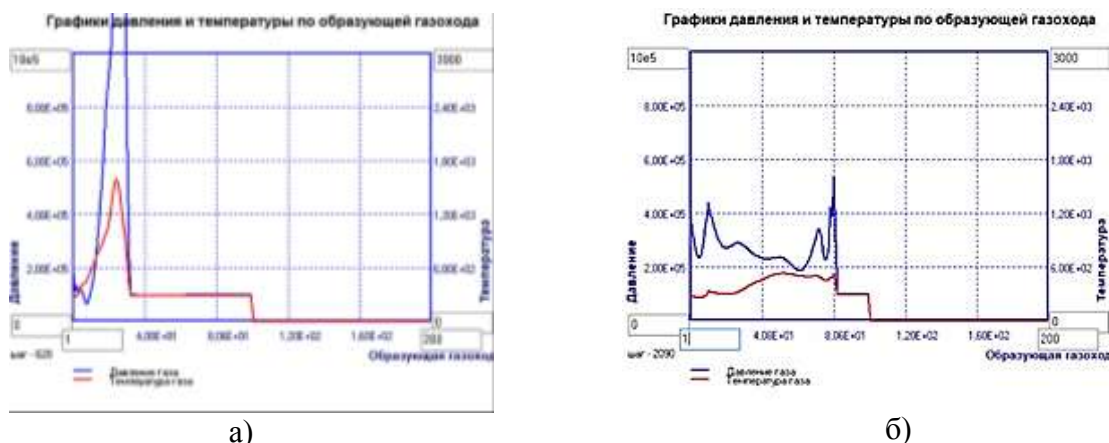


Рис. 16. Схема создания пленочного экрана

Такой способ снижения деструктивного воздействия на элементы ПУ и стартового сооружения можно создать, используя ТО СК. Таким образом, решение задачи обеспечивает технический результат, заключающийся в увеличении долговечности элементов ПУ и стартового сооружения.

На рис. 17 представлены результаты комплексной нагрузки на газоход при заданных параметрах ДУ РКН «Союз 2» этапа 1В с применения предложенного способа.

Сравнивая полученные данные видно, что значения температур и давлений снизились примерно в 2 раза, что свидетельствует об эффективности применения в составе ТО СК предложенного способа снижения деструктивных воздействий от струи продуктов сгорания ДУ РКН.



а)

б)

Рис. 17. Графики давлений и температур:

а – без предложенного способа; б – с предложенным способом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие опасных факторов – неотъемлемое свойство, присущее любому СК. Стартовый комплекс является объектом, эксплуатация которого сопряжена с риском нанесения ущерба персоналу, разрушения техники и нарушения экологии, так как в нем накапливаются, преобразуются и реализуются различные виды энергии. При пуске РКН особое внимание уделяется отводу газовой струи продуктов сгорания ДУ по газоотражательному тракту, в процессе которого происходит нагрев металооблицовки до высоких температур, в последствии приводящий к необратимым деформациям, которые в свою очередь могут нанести ущерб пусковому оборудованию и РКН в целом. В связи с этим постоянно ведется поиск способов обеспечения защиты и повышения безопасности эксплуатации составных частей СК.

Представленный в данной статье способ использования системы охлаждения позволяет создать пленочную водяную завесу на поверхности газового отражателя, тем самым снижая температурные нагрузки на элементы ПО и СК и улучшая условия их эксплуатации.

Список используемых источников

1. Технологическое оборудование РКК: учебник / В. Козлов [и др.]. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. – Ч. 1. Стартовое оборудование РКК. – 400 с.
2. К вопросу оценивания газодинамических нагрузок на пусковые установки ракет космического назначения и выбора параметров схемы газоотражательного устройства / А.В. Лагун [и др.]. // Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – М.: изд. ФГБУ Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2020. – Т.3. – С. 284–290.
3. Лагун А.В., Кукушкин И.О., Слатов В.Л. Решение задачи оценивания пусковых нагрузок и выбора параметров газоотражателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. – Вып. 6. – С.51–62.
4. Козлов В.В., Лагун А.В., Сыров А.Д. Исследование путей управления уровнем газодинамических нагрузок при пуске ракеты космического назначения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. – Вып. 2. – С.470–482.
5. Стартовый комплекс РН «Союз-2» на космодроме «Восточный». Расчет и анализ нагрузок на РКН и оборудование СК / И.В. Бармин [и др.]. – М.: ФКА, ф-л ЦЭНКИ НИИ СК им. В.П. Бармина, 2016. – 198 с.

В.А. Корбут*;
В.И. Мищенко**,
доктор технических наук, профессор;

А.Н. Новиков**,
кандидат технических наук, доцент

*129 ВП МО РФ, г. Санкт-Петербург.

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

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАТРАТ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОБОРОНЫ

Представлены результаты исследования базовой модели эксплуатации радиоэлектронных средств ракетно-космической обороны с учетом не только периодичности и продолжительности технического обслуживания, но и достоверности контроля технического состояния, проводимого в рамках обслуживания. Приведены результаты анализа характера влияния достоверности контроля параметров технического состояния системы на продолжительность нахождения объекта эксплуатации в одном из множества возможных состояний с учетом специфики эксплуатации радиоэлектронных средств вооружения ракетно-космической обороны (РЭС РКО), используемые при построении модели формирования затрат на эксплуатацию РЭС вооружения РКО. Результаты исследования базовой модели применены при построении аналитических зависимостей формирования затрат на эксплуатацию радиоэлектронных средств ракетно-космической обороны, позволяющих исследовать влияние характеристик процесса эксплуатации на суммарные затраты.

Ключевые слова: модель процесса эксплуатации, коэффициент готовности, достоверность контроля, регенерирующий процесс функционирования технической системы, условная вероятность обнаружения отказа, величина суммарных затрат.

ВВЕДЕНИЕ

Для обоснования стоимости обслуживания и расчета показателей эффективности эксплуатации радиоэлектронных средств (далее – РЭС) вооружения и военной техники, в том числе, РЭС ракетно-космической обороны (далее – РКО) традиционно использовались те или иные модели процесса эксплуатации. При этом уровень сложности модели определяется не только перечнем учитываемых факторов, но и соответствующим уровнем сложности самой технической системы, наличием в последней разнородных подсистем и элементов. Как следствие, существуют определенные трудности в представлении и затрат, и показателя эффективности (как правило для вооружения и для РЭС РКО используется коэффициент готовности) в виде функции от одних и тех же эксплуатационных факторов.

Целью данной работы является обоснование минимальных затрат на эксплуатацию РЭС РКО. Это обоснование должно базироваться на такой модели процесса эксплуатации, которая обеспечивала бы расчет затрат на эксплуатацию и коэффициента готовности РЭС РКО как функции вышеназванных факторов.

Таким образом, формальная постановка задачи имеет следующий вид.

Найти вектор

$$P = P(T_{\text{Сл}}, T_{\text{Об}}, D, F, P_{\text{РЭС}}, T_{\text{Дл}}, T_{\text{В}}),$$

где $T_{\text{Сл}}$ – срок службы;
 $T_{\text{Об}}$ – периодичность обслуживания;
 F, D – вероятности ошибок первого и второго родов;
 $T_{\text{ТО}}$ – продолжительность технического обслуживания;
 $P_{\text{РЭС}}$ – вероятность возникновения отказа РЭС РКО;

$T_{ДП}$ – продолжительность дополнительной проверки РЭС РКО в случае ошибочного принятия решения об отказе РЭС, когда оно работоспособно (ситуация ошибки первого рода);

$T_{в}$ – среднее время восстановления.

Вектор P должен обеспечивать выполнение критерия

$$S^* = \min_P S(P)$$

при ограничениях:

$$K_{ГО}(P) \geq K_{ГО}^{ТР};$$

$$P \in P_{д},$$

где $K_{ГО}$ – определяемое значение величины коэффициента готовности для обслуживаемых систем;

$K_{ГО}^{ТР}$ – требуемое (нормативное) значение величины коэффициента готовности обслуживаемых систем;

$P_{д}$ – вектор P с допустимыми значениями вышеперечисленных переменных.

Основные подходы к моделированию процесса эксплуатации сводятся к моделям, представленным ниже.

Для простых технических систем стадия эксплуатации представляет собой чередование временных промежутков, в которых эта система либо работоспособна, либо восстанавливается после отказа. Данный процесс описывается марковской моделью, граф которой включает два состояния: работоспособное и восстановления (рис. 1)

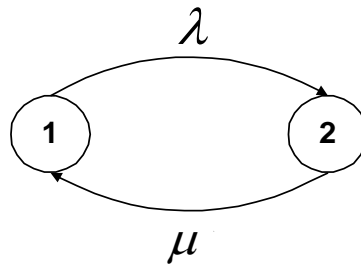


Рис. 1. Граф состояний модели процесса эксплуатации простых технических систем

На рисунке λ и μ – интенсивности отказов и восстановлений простых технических систем соответственно.

Решения системы уравнений Колмогорова для модели, представленной графом на рис. 1, при стационарном процессе на этапе нормальной эксплуатации имеют вид:

$$P_1 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}, \quad P_2 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}.$$

Так как $\lambda = \frac{1}{T_0}$, а $\mu = \frac{1}{T_{в}}$, где T_0 – средняя наработка на отказ, а $T_{в}$ – среднее время восстановления, то

$$P_1 = \frac{1}{T_{в} \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_{в}} \right)} = \frac{1}{\frac{T_{в}}{T_0} + 1} = \frac{T_0}{T_0 + T_{в}} = K_{Г}.$$

Таким образом, вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии соответствует стандартизованному определению коэффициента готовности [1]. С помощью этого показателя оценивается эффективность эксплуатации простых необслуживаемых технических систем.

Сложные технические системы обладают некоторым уровнем избыточности, позволяющим накапливать соответствующее этому уровню количество отказов элементов, не приводящее к отказу системы в целом. С точки зрения системы эти отказы являются неисправностями. Возвращение утраченного уровня избыточности сложной технической системы, а именно к ним относятся РЭС РКО, осуществляется в рамках технического обслуживания. Процесс эксплуатации сложных технических систем, имеющих избыточность, представляется полумарковской моделью, граф которой изображен на рис. 2.

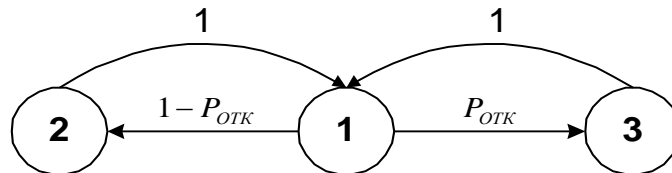


Рис. 2. Граф состояний для модели процесса эксплуатации сложных технических систем с избыточностью

Множество состояний графа $R = \{R_i\}$, $i = 1, \dots, r$ (r – количество состояний графа, для графа на рис.2, очевидно, $r = 3$) включает:

R_1 – состояние исправности;

R_2 – состояние, когда на исправной технической системе проводится техническое обслуживание;

R_3 – состояние, когда на неисправной технической системе проводится техническое обслуживание, а также текущий ремонт, восстанавливающий утраченную избыточность.

В соответствии с [2] полумарковский процесс задается начальным состоянием и двумя матрицами – матрицей переходов вложенной марковской цепи W ($W = \{w_{ij}\}$, $(i, j) = 1, \dots, r$) и матрицей условных функций распределения продолжительности пребывания в состояниях $F(t)$, ($F(t) = \{F_{ij}(t)\}$, $(i, j) = 1, \dots, r$).

Для графа, представленного на рис.2, эти матрицы имеют вид:

$$W = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 1-P_{отк} & P_{отк} \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \end{array} \quad F(t) = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & F_{12}(t) & F_{13}(t) \\ \hline F_{21}(t) & 0 & 0 \\ \hline F_{31}(t) & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \end{array}$$

В матрице W

$$P_{отк} = 1 - \exp(-\lambda T_{об}),$$

где λ – интенсивность возникновения неисправностей;

$T_{об}$ – период технического обслуживания.

Неравные нулю элементы матрицы $F(t)$ имеют вид:

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{об}, \\ 1, & t \geq T_{об}; \end{cases} \quad F_{13}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1 - \exp(-\lambda t)}{1 - \exp(-\lambda T_{об})}, & 0 < t < T_{об} \\ 1, & t \geq T_{об}; \end{cases}$$

$$F_{21}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{то}, \\ 1, & t \geq T_{то}; \end{cases} \quad F_{31}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{то} + T_{в}, \\ 1, & t \geq T_{то} + T_{в}. \end{cases}$$

Финальное распределение вероятностей состояний полумарковского процесса в соответствии с [2] определяется по формуле

$$\pi_i = \frac{P_i m_i}{\sum_{j=1}^3 P_j m_j} \quad i, j = \overline{1, 3} \quad (1)$$

где P_j – стационарная вероятность пребывания вложенной марковской цепи в j -м состоянии;

m_j – математическое ожидание продолжительности пребывания РЭС в j -м состоянии.

Стационарное распределение вероятностей пребывания вложенной марковской цепи, удовлетворяющее условию нормировки:

$$\underline{P} = \underline{PW}, \quad \sum_{j=1}^r P_j = 1, \quad 0 \leq P_j \leq 1, \quad j = \overline{1, r} \quad (2)$$

в состояниях $\underline{P} = (P_1, P_2, P_3)$ отыскивается в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} P_1 = P_2 + P_3 \\ P_2 = P_1(1 - P_{\text{отк}}) \\ P_3 = P_1 P_{\text{отк}} \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1 \end{cases}.$$

Решение этой системы уравнений имеет вид:

$$P_1 = \frac{1}{2}; \quad P_2 = \frac{1 - P_{\text{отк}}}{2}; \quad P_3 = \frac{P_{\text{отк}}}{2}.$$

Указанные выше математические ожидания пребывания в состояниях определяются по традиционной формуле [2]

$$m_j = \int_0^{\infty} [1 - F_j(t)] dt, \quad j = \overline{1, r}. \quad (3)$$

Здесь $F_j(t)$ – безусловные функции распределения вероятностей ухода процесса из соответствующих состояний, отыскиваемые в соответствии с [2] по формуле

$$F_j(t) = \sum_{i=1}^3 F_{ij}(t) w_{ij}, \quad (i, j) = \overline{1, r},$$

где $F_{ij}(t)$ – элементы матрицы $F(t)$;

w_{ij} – элементы матрицы W .

Тогда средние времена пребывания полумарковского процесса в состояниях определяются следующим образом:

$$m_1 = \frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_{\text{об}})]; \quad m_2 = T_{\text{то}}; \quad m_3 = T_{\text{то}} + T_{\text{в}}.$$

В результате, показателем эффективности функционирования РЭС РКО в процессе эксплуатации будет вероятность застать полумарковский процесс и, следовательно, объект исследования в исправном состоянии R_j в произвольный момент времени, т. е.

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_{\text{об}})]}{\frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_{\text{об}})] + T_{\text{то}} + [1 - \exp(-\lambda T_{\text{об}})] T_{\text{в}}}. \quad (4)$$

Представленное выражение является аналогом коэффициента технического использования, приведенного в ГОСТ [1]. Как видно из формулы (4) разработанная модель учитывает безотказность объекта исследования λ , продолжительность обслуживания $T_{\text{то}}$, периодичность обслуживания $T_{\text{об}}$ и продолжительность восстановления $T_{\text{в}}$. Недостатком модели является

отсутствие учета качества обслуживания, которое существенно зависит от достоверности контроля технического состояния РЭС РКО, проводимого в ходе технического обслуживания.

УЧЕТ ДОСТОВЕРНОСТИ И ПЕРИОДИЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В МОДЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЭС РКО

Исследованиям процессов эксплуатации сложных технических систем посвящены работы Н.М. Седякина, Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляева, А.Д. Соловьёва, Е.Ю. Барзиловича, В.А. Каштанова, А.В. Смагина, В.И. Мищенко и др. Как показывает анализ моделей процесса эксплуатации [2–6] наиболее адекватной, с точки зрения учета влияния достоверности контроля параметров технического состояния системы на продолжительность нахождения объекта эксплуатации в одном из множества возможных состояний с учетом специфики эксплуатации РЭС, является модель, предложенная профессором В.И. Мищенко [7]. Эта модель взята в качестве базовой. Ее суть заключается в том, что контроль технического состояния, проводимый в рамках обслуживания, сводится к измерению, как правило, некоторого постоянного набора независимых параметров. При этом до 90% времени, отводимого на техническое обслуживание, чаще всего, составляет контроль технического состояния РЭС [8]. Поэтому, по сути понятия «периодичность обслуживания» и «периодичность контроля» являются идентичными.

По результатам контроля принимается решение об отнесении состояния объекта к исправному или неисправному. Обнаружение неисправностей осуществляется только при проведении контроля технического состояния. Периодичность контроля (или обслуживания) образца, определяется как величина временного промежутка между проверками технического состояния $T_{об}$, по истечении которого РЭС проверяется в течение случайного времени $\tau_{то}$, ограниченного сверху временем $T_{то}$, т. е. $\tau_{то} \leq T_{то}$.

Своевременная поверка средств измерений обеспечивает требуемый уровень их исправности и качества контроля. Чем выше уровень сложности РЭС РКО (далее объекта контроля (ОК)), соответственно уровень избыточности, тем критичнее становятся принятые решения об исправности ОК и достоверности результатов их контроля. Поэтому в ходе эксплуатации ОК могут возникнуть следующие ситуации.

1. Перед началом проведения обслуживания ОК с вероятностью $1 - P_n(T_{об})$ исправна. В результате проведения проверки технического состояния ОК оператор может принять следующие решения:

а) ОК неисправен (ошибочное решение, соответствующее ложной регистрации неисправности, т. е. ошибке первого рода) с вероятностью F . После принятия решения проводится дополнительная проверка, позволяющая обнаружить ошибку в течение ограниченного сверху времени $\tau_{дл} \leq T_{дл}$;

б) ОК исправен (правильное решение) – с вероятностью $1 - F$. После проведения технического обслуживания ОК продолжает применяться по назначению до следующего технического обслуживания.

2. До начала проведения технического обслуживания на ОК с вероятностью $P_n(T_{об})$ возникла неисправность. В результате проведения контроля технического состояния ОК могут быть приняты следующие решения:

а) ОК неисправен (правильное решение) – с вероятностью D . После обнаружения неисправности и проведения дополнительной проверки, подтверждающей наличие неисправности, ОК диагностируется на предмет отыскания отказавшего элемента. Затем элемент заменяется на новый, взятый из ЗИП, и после повторной проверки технического состояния ОК возвращается в строй и продолжает использоваться по назначению. Вся процедура вос-

становления исправности проводится в течение некоторого случайного времени, ограниченного сверху временем T_B , т. е. $\tau_B \leq T_B$;

б) ОК исправен (ошибочное решение, соответствующее ошибке второго рода, т. е. пропуску неисправности) – с вероятностью $1 - D$. В этой ситуации ОК после проведения технического обслуживания продолжает применяться по назначению с неисправностью, снижающей его эффективность, до следующего технического обслуживания.

Описанный процесс функционирования РЭС РКО в ходе эксплуатации формализуется полумарковской моделью, граф которой изображен на рис. 3.

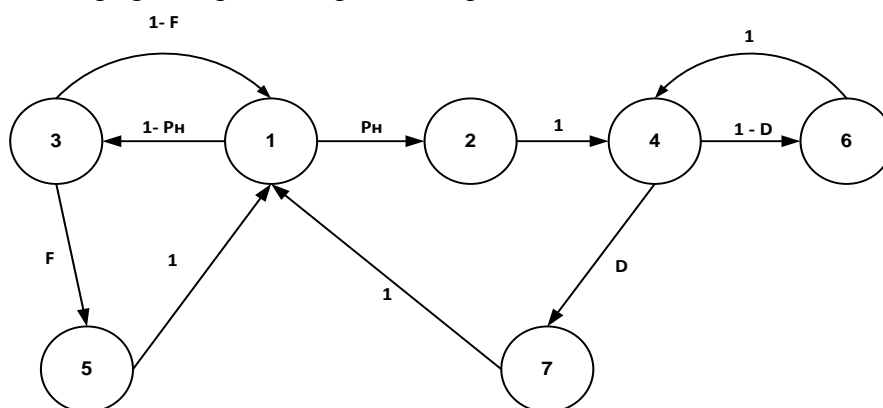


Рис. 3. Размеченный граф полумарковской модели процесса эксплуатации РЭС РКО

Множество возможных состояний $R = \{1, 2, \dots, r\}$ включает уже не 3, а 7 состояний (т. е. $r = 7$):

R_1 – ОК исправен и применяется по назначению (исходное состояние полумарковского процесса);

R_2 – ОК неисправен и эксплуатируется с неисправностью до начала технического обслуживания;

R_3 – ОК проходит контроль технического состояния в ходе технического обслуживания при условии, что он к началу проведения обслуживания был исправен;

R_4 – ОК проходит контроль технического состояния в ходе технического обслуживания при условии, что он к началу проведения обслуживания был неисправен;

R_5 – ОК проходит дополнительную проверку при условии ложной регистрации неисправности;

R_6 – ОК используется по назначению с неисправностью до очередного технического обслуживания;

R_7 – ОК проходит дополнительную проверку, подтверждающую его неисправность, и восстанавливается.

Матрица переходных вероятностей вложенной марковской цепи W имеет вид

$W =$

0	P_n	$1 - P_n$	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
$1 - F$	0	0	0	F	0	0
0	0	0	0	0	$1 - D$	D
1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0

В матрице W

$$P_H = P_H(T_{об}) = 1 - \exp(-\lambda_H T_{об}), \quad (5)$$

где $P_H(T_{об})$ – вероятность возникновения неисправности в ОК на интервале $[0, T_{об}]$;
 λ_H – интенсивность неисправностей аппаратуры ОК;
 D – условная вероятность обнаружения неисправности в ОК;
 F – условная вероятность ложной регистрации неисправности в ОК.

Ненулевые элементы матрицы $F(t)$ определяются с учетом особенностей обеспечения адекватности математического представления реального процесса.

Введем следующие параметры:

t_H – случайный момент времени возникновения неисправности в ОК, причем $0 < t_H < T_{об}$;

τ_H – случайная продолжительность существования неисправности от момента ее возникновения до начала проверки, $\tau_H = T_{об} - t_H$ ($0 < t_H < T_{об}$);

Тогда ненулевые компоненты матрицы $F(t)$ имеют вид:

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \frac{1 - \exp(-\lambda_a t)}{1 - \exp(-\lambda_a T_{об})} & 0 < t < T_{об}, \\ 1, & t \geq 0; \end{cases} \quad F_{13}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{об}, \\ 1, & t \geq T_{об}; \end{cases}$$

$$F_{24}(t) = P(0 \leq \tau_H < t) = P(T_{об} - t \leq t_H < T_{об}) = F_{12}(T_{об}) - F_{12}(T_{об} - t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ \frac{\exp(-\lambda_a T_{об})(\exp(\lambda_a t) - 1)}{1 - \exp(-\lambda_a T_{об})}, & 0 < t < T_{об}, \\ 1, & t \geq T_{об}; \end{cases}$$

$$F_{31}(t) = F_{35}(t) = F_{46}(t) = F_{47}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_K, \\ 1, & t \geq T_K; \end{cases}$$

$$F_{51}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{пк}, \\ 1, & t \geq T_{пк}; \end{cases} \quad F_{61}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_B, \\ 1, & t \geq T_B; \end{cases} \quad F_{74}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{об}, \\ 1, & t \geq T_{об}. \end{cases}$$

В соответствии с формулами (1)–(3) были получены соответствующие параметры полумарковского процесса:

1) стационарные вероятности вложенной марковской цепи – набор (P_1, P_2, \dots, P_7) :

$$P_1 = \frac{1}{2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H)};$$

$$P_2 = \frac{P_H}{2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H)};$$

$$P_3 = \frac{1 - P_H}{2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H)};$$

$$P_4 = \frac{P_H}{D \left[2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H) \right]};$$

$$P_5 = \frac{F(1-P_H)}{2\left(1 + \frac{P_H}{D}\right) + F(1-P_H)}; \quad P_6 = \frac{P_H(1-D)}{D\left[2\left(1 + \frac{P_H}{D}\right) + F(1-P_H)\right]};$$

$$P_7 = \frac{P_H}{2\left(1 + \frac{P_H}{D}\right) + F(1-P_H)}.$$

2) математические ожидания продолжительности пребывания в состояниях – набор (m_1, m_2, \dots, m_7) :

$$m_1 = \frac{1}{\lambda_H} P_H; m_2 = \frac{1}{P_H} (T_{об} - m_1); m_3 = m_4 = T_{то}; m_5 = T_{дп}; m_6 = T_{об}; m_7 = T_{в}.$$

Финальное распределение вероятностей состояний полумарковского процесса – набор $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_7)$:

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda_H} P_H}{(T_{об} + T_{то})\left(1 - P_H + \frac{P_H}{D}\right) + (1 - P_H)FT_{дп} + P_H T_{в}} = \frac{P_H}{\lambda_H Q}; \quad (6)$$

$$\pi_2 = \frac{T_{об} - \frac{1}{\lambda_H} P_H}{Q}; \quad \pi_3 = \frac{T_{то}(1 - P_H)}{Q}; \quad \pi_4 = \frac{T_{то} P_H}{DQ};$$

$$\pi_5 = \frac{T_{дп} F(1 - P_H)}{Q}; \quad \pi_6 = \frac{T_{в} P_H}{Q}; \quad \pi_7 = \frac{T_{об}(1 - D) P_H}{DQ}.$$

Здесь π_1 соответствует вероятности застать объект контроля в исправном состоянии в произвольный момент времени, т. е. тому же коэффициенту готовности. Но теперь этот коэффициент явно зависит от интенсивности неисправностей, периодичности и продолжительности обслуживания, ошибок контроля первого и второго родов и продолжительности восстановления.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАТРАТ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОБОРОНЫ

На основе результатов исследования базовой модели эксплуатации профессора В.И. Мищенко, изложенных выше, была разработана модель формирования затрат, использующая подход, предложенный в [4, 9, 10]. На основании данного подхода семи состояниям РЭС РКО, представленным на графе (см. рис. 3), ставились в соответствие источники финансирования мероприятий, проводимых в каждом из состояний графа.

Так при нахождении ОК в исправном R_1 и неисправном R_2 состояниях расходуются затраты на новый образец ОК – C_0 , а также на персонал его эксплуатирующий – $C_{п}$. В состояниях обслуживания R_3, R_4 расходуются затраты на эксплуатацию соответствующих средств измерений, амортизацию помещений, электроэнергию, горюче-смазочные материалы – $C_{то}$. Затраты на дополнительную проверку в состоянии R_5 кратны $C_{то}$, так как это просто повторные действия, аналогичные тем, которые осуществлялись при обслуживании. В состоянии R_6 расходы соответствуют затратам в состоянии R_2 . В состоянии восстановления R_7

расходуются затраты на ЗИП, содержание ремонтного персонала, ремонтных помещений и электроэнергию.

В соответствии с подходом [4] средняя доля затрат в течение одного периода обслуживания определяется формулой

$$C = \frac{1}{T_{об}} \sum_{j=1}^r m_j P_j C_j^* \quad (7)$$

- где P_j – стационарная вероятность пребывания вложенной марковской цепи в j -м состоянии;
 m_j – математическое ожидание продолжительности пребывания РЭС РКО в j -м состоянии;
 C_j^* – затраты, запланированные для расхода на пребывание в j -м состоянии на протяжении промежутка времени между обслуживаниями $T_{об}$, рассчитываемые с учетом инфляции и использования технологий, применявшихся при производстве старых моделей образцов вооружения в соответствии с [9, 10].

Для постоянного объема технического обслуживания общие затраты на эксплуатацию РЭС РКО составят

$$C = \frac{T_{эксп}}{T_{об}} \sum_{j=1}^r C_j, \quad j = \overline{1, r}, \quad (8)$$

где r – число состояний в графе модели процесса эксплуатации. В рассматриваемом случае $r = 7$.

Для графа состояний, приведенного на рис. 3, доли затрат на пребывание в каждом из состояний в течение периода между обслуживаниями после соответствующих преобразований, примут следующий вид:

$$C_1 = \frac{P_H (C_0 + C_{II})}{\lambda_H T_{об} \left(2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H) \right)}; \quad C_2 = \frac{(C_0 + C_{II}) \left(T_{об} - \frac{P_H}{\lambda_H} \right)}{T_{об} \left(2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H) \right)};$$

$$C_3 = \frac{C_{ТО} T_{ТО} (1 - P_H)}{T_{об} \left(2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H) \right)}; \quad C_4 = \frac{C_{ТО} T_{ТО} P_H}{T_{об} D \left(2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H) \right)};$$

$$C_5 = \frac{C_{ДП} T_{ДП} F (1 - P_H)}{T_{об} \left(2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H) \right)}; \quad C_6 = \frac{(C_0 + C_{II}) P_H (1 - D)}{D \left(2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H) \right)};$$

$$C_7 = \frac{(C_{ДП} + C_B) T_B P_H}{T_{об} \left[2 \left(1 + \frac{P_H}{D} \right) + F(1 - P_H) \right]}$$

где C_0 – затраты на изготовление серийного образца, рассчитываемые в соответствии с [9,10] с учетом серийности, инфляции и возрастания конструктивно-технологической сложности;

C_{II} – затраты на обслуживающий персонал;

$C_{ТО}$ – суммарные затраты на техническое обслуживание РЭС РКО;

$C_{ДП}$ – суммарные затраты на дополнительную проверку РЭС РКО;

C_B – суммарные затраты на восстановление РЭС.

Суммарная доля затрат на пребывание РЭС РКО в состоянии R_1 , т. е. в готовности к использованию по назначению, после соответствующих преобразований примет следующий вид:

$$C = \frac{(T_{об}(C_o + C_{п}) + C_{то}T_{то})\left(1 - P_{н} + \frac{P_{н}}{D}\right) + C_{дп}T_{дп}F(1 - P_{н}) + T_{в}P_{н}(C_{дп} + C_{в})}{T_{об}\left(2\left(1 + \frac{P_{н}}{D}\right) + F(1 - P_{н})\right)} \quad (9)$$

Модель формирования затрат, представленная формулой (9), позволяет исследовать влияние характеристик процесса эксплуатации на указанную суммарную долю затрат. Так, например, влияние периодичности обслуживания и уровня безотказности на вышеуказанную долю затрат представлена на рис. 4.

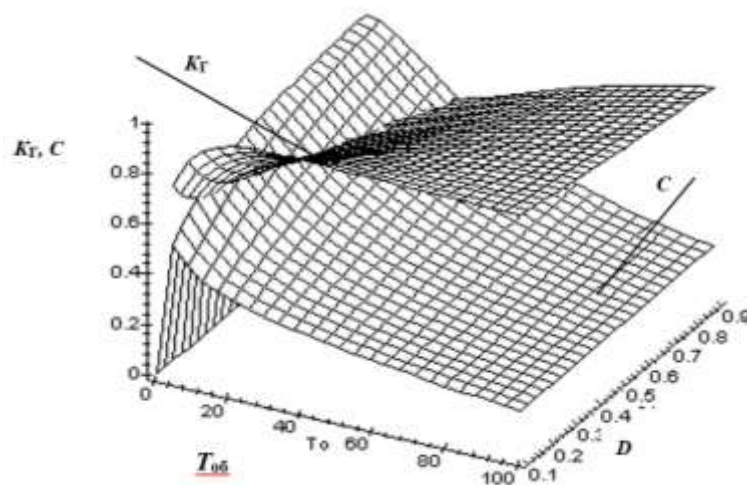


Рис. 4. Зависимость величины суммарной доли затрат на пребывание в состоянии готовности к применению и коэффициента готовности обслуживаемых средств от условной вероятности D обнаружения отказа в РЭС РКО и периодичности обслуживания $T_{об}$

Как видно из рисунка существует оптимальный период обслуживания РЭС, соответствующий максимальному значению коэффициента готовности с точки зрения эффективности эксплуатации РЭС. Этот вывод подтверждают результаты исследований, приведенные в работах [3, 4, 7]. Действительно, чем чаще проводить обслуживание, тем меньшая доля времени РЭС РКО будет оставаться на использование по назначению. Если проводить обслуживание реже, то после какого-то значения величины периода обслуживания начнут накапливаться неисправности и РЭС РКО будет большую долю времени находиться в ремонте, а не применяться по назначению. Для суммарной доли затрат, так же имеется подобная зависимость от периодичности обслуживания. Частое обслуживание приводит к нерациональному росту доли затрат на его проведение. Увеличение периода обслуживания способствует сокращению доли затрат на обслуживание, но при этом растет доля затрат на текущий ремонт, что опять увеличивает суммарную долю.

Таким образом, объективно существует оптимальный период обслуживания, соответствующий минимуму суммарной доли затрат. В силу зависимости коэффициента готовности и суммарной доли затрат от одних и тех же параметров (математических ожиданий времени пребывания в состояниях см. формулы (6) и (9)) очевидно, что имеется рациональное значение периода обслуживания, обеспечивающее максимальную величину коэффициента готовности при приемлемой величине уровня затрат. Либо, в обратной постановке, также имеется рацио-

нальное значение периодичности обслуживания, соответствующее минимуму затрат при обеспечении требуемого значения величины коэффициента готовности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты исследования базовой модели эксплуатации РЭС РКО отличаются учетом не только периодичности и продолжительности технического обслуживания, но и достоверности контроля технического состояния, проводимого в рамках обслуживания. Результаты исследования характера влияния достоверности контроля параметров технического состояния системы на продолжительность нахождения объекта эксплуатации в одном из множества возможных состояний с учетом специфики эксплуатации РЭС РКО использованы для разработки методики обоснования периодичности технического обслуживания РЭС РКО.

Результаты исследования базовой модели применены при построении аналитических зависимостей формирования затрат на эксплуатацию РЭС РКО, позволяющих исследовать влияние характеристик процесса эксплуатации на суммарные затраты, например, зависимости величины затрат и коэффициента готовности от условной вероятности обнаружения отказа в РЭС при работоспособных средствах контроля (измерений) и периодичности обслуживания.

Список используемых источников

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
2. *Королюк В.С., Турбин А.Ф.* Фазовое укрупнение сложных систем. – К.: Вища школа, 1978. – 112 с.
3. *Сычев Е.И.* Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Татьянин день, 1993. – 274 с.
4. *Волков Л.И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М.: Высш. школа, 1981. – 368 с.
5. *Смагин В.А., Новиков А.Н., Смагин С.Ю.* К одной вероятностной модели контроля в технических системах // Информация и космос. – 2010. – № 4. – С. 48–53.
6. *Смагин В.А., Новиков А.Н.* Модель готовности восстанавливаемой технической системы с учетом достоверности контроля состояния ее элементов при произвольных распределениях времени до их отказа и восстановления // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 652. – С. 198–203.
7. *Мищенко В.И., Храмов М.Ю.* Проблематика эксплуатации сложных технических систем. – СПб.: Политехника сервис, 2016. – 218 с.
8. *Кудрицкий В.Д.* Прогнозирующий контроль радиоэлектронных устройств. – К.: Техніка, 1982. – 168 с.
9. *Горбулин В.И.* Оптимизация развертывания космических систем. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. – 104 с.
10. Методы военно-экономических исследований перспектив развития космических средств / под ред. Е.В. Рыжова. – М.: Машиностроение, 1998. – 152 с.

В.Л. Слатов;
Т.В. Соколова;
А.В. Фарафонов

СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ «ОБЛИК» МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СЕРИИ «МОЖАЕЦ»

В статье описан опыт создания бортовой аппаратуры малых космических аппаратов «Можаяец-4» и «Можаяец-5», разработанных в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Приведены подробное описание, принципы работы, а также чертежи составных частей разработанной аппаратуры, функциональные и электрические схемы. Материал статьи может быть полезен при разработке элементов бортовой и специальной аппаратуры малых космических аппаратов.

Ключевые слова: малый космический аппарат, бортовая аппаратура (БА), аппаратура промышленной автоматизации, фотоприемник, микроконтроллер, источник питания, импульс.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более широкое применение находят малые космические аппараты (МКА), созданные коллективами специалистов, не входящих в традиционную кооперацию производителей космической техники. В основном такими МКА являются орбитальные средства учебного и научно-исследовательского назначения. Однако, накопившийся опыт применения МКА показал, что с их помощью возможно решение широкого ряда прикладных задач [1, 2].

Сложившаяся практика создания космической техники предусматривает построение бортовых систем КА в виде единичных экземпляров, разработанных на основе уникальных комплектующих, имеющих высокую стоимость, и не имеющих возможности замены при смене предприятия-разработчика или фирмы-поставщика. Это приводит к значительному удорожанию создаваемых комплектов аппаратуры, а, иногда, и к невозможности их создания, как, например, при попадании комплектующих в санкционные списки, либо запрещенных к использованию для образцов специальных изделий. Кроме того, зачастую на разработку современной космической техники накладываются временные ограничения [3].

Разрешить данные проблемы может подход, основанный на использовании характеристик составных частей (комплектующих) создаваемой аппаратуры, которые гарантируются производителем, а сами комплектующие являются доступными в свободной продаже. Эти характеристики должны соответствовать требованиям и ограничениям, накладываемым спецификой создания, подготовки, запуска и функционирования КА [3, 4].

В настоящее время таким требованиям практически в полной мере соответствуют устройства и комплектующие, применяемые при создании систем промышленной автоматизации и соответствующие современным промышленным стандартам [3, 5].

В качестве базы для построения бортовой аппаратуры МКА может применяться оборудование (контроллеры, интерфейсные платы, датчиковая периферия и пр.), широко представленное на рынке средств промышленной автоматизации. Такой подход позволяет разрабатывать бортовую аппаратуру МКА на основе дешевых аппаратных и программных решений. Наиболее привлекательным является подход к применению архитектуры IBM PC в области малогабаритных встраиваемых промышленных компьютеров и контроллеров. Данное оборудование изначально разрабатывалось с учетом необходимости работы в жестких условиях эксплуатации. Применение такого подхода существенно снижает как временные, так и финансовые затраты на разработку бортовой аппаратуры и МКА в целом. Следует от-

метить, что в настоящее время подобный подход применяется многими разработчиками космической техники, например, при создании микроспутников Dove/Flock космической системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – фирмой-разработчиком «Planet».

В рамках данного подхода бортовой комплекс управления МКА, либо блок управления специальной аппаратурой, разрабатывается как вычислительная система, обладающая свойством распределенности, скомпонованная посредством унифицированной номенклатуры модулей, которая включает процессорные платы, объединенные по стандартной информационной шине как между собой, так и с периферийными модулями и датчиковой аппаратурой, под которыми понимаются модули сопряжения, платы дискретного и аналогового ввода/вывода и др. [5].

Данная концепция была применена при создании бортовой специальной аппаратуры (БА) «Облик» для МКА серии «Можаец» [3].

ОПИСАНИЕ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ «ОБЛИК»

В 2003 году коллектив специалистов ВКА имени А.Ф. Можайского в составе кооперации приступил к разработке МКА «Можаец-4». В состав специальной аппаратуры МКА «Можаец-4» входила БА «Облик», разрабатываемая в рамках ведущихся в академии НИОКР, заданных командованием Космических войск.

БА «Облик» представляет собой измерительный приемник импульсного ИК-излучения наземного источника и предназначена для фиксации факта засветки и измерения интенсивности оптического излучения наземного источника в ближнем ИК-диапазоне.

Разработка БА «Облик» велась исходя из требований, заданных условиями проведения космического эксперимента. Определяющими из них являются:

- длина волны импульсного оптического излучения – 1,3 мкм;
- длительность импульса – 9 нс,
- плотность потока мощности – 1–50 мВт/мм²;
- питание блока-приемника от бортовой сети 14 В, аппаратура должна включаться и выключаться подачей напряжения питания;
- условия эксплуатации аппаратуры – орбитальный полет КА на орбите высотой 680–850 км; параметры окружающей среды: температура от –60° до +80° С, накопленная радиационная доза 10³–10⁶ Рад.

Измерительный приемник должен фиксировать уровень мощности принимаемого сигнала и передавать информацию на наземный комплекс управления через канал телеметрии бортового комплекса управления (БКУ) МКА «Можаец-4».

Необходимо было решить задачу по созданию унифицированного законченного модуля, который объединял бы в себе непосредственно средства измерения, средства обработки полученной информации и средства управления процессом измерений. В результате технического проектирования было выбрано решение на основе технологии интеллектуальных измерительных систем. Основным элементом структуры БА «Облик» является блок микроконтроллера, который позволяет подключать различные средства измерения через аналоговые каналы ввода, а также обеспечивает сопряжение с БКУ КА «Можаец» как через стандартные информационные интерфейсы, так и через дискретные каналы ввода/вывода.

Комплект аппаратуры «Облик» состоит из двух составных частей – блока фотоприемников (БФП) и блока микроконтроллера (БМК). БФП размещается снаружи КА на нижнем силовом днище с ориентацией фотодетекторов в надир. БМК размещается внутри гермоконтейнера КА на приборной раме и имеет свой корпус. Электрическая функциональная схема БА «Облик» представлена на рис. 1.

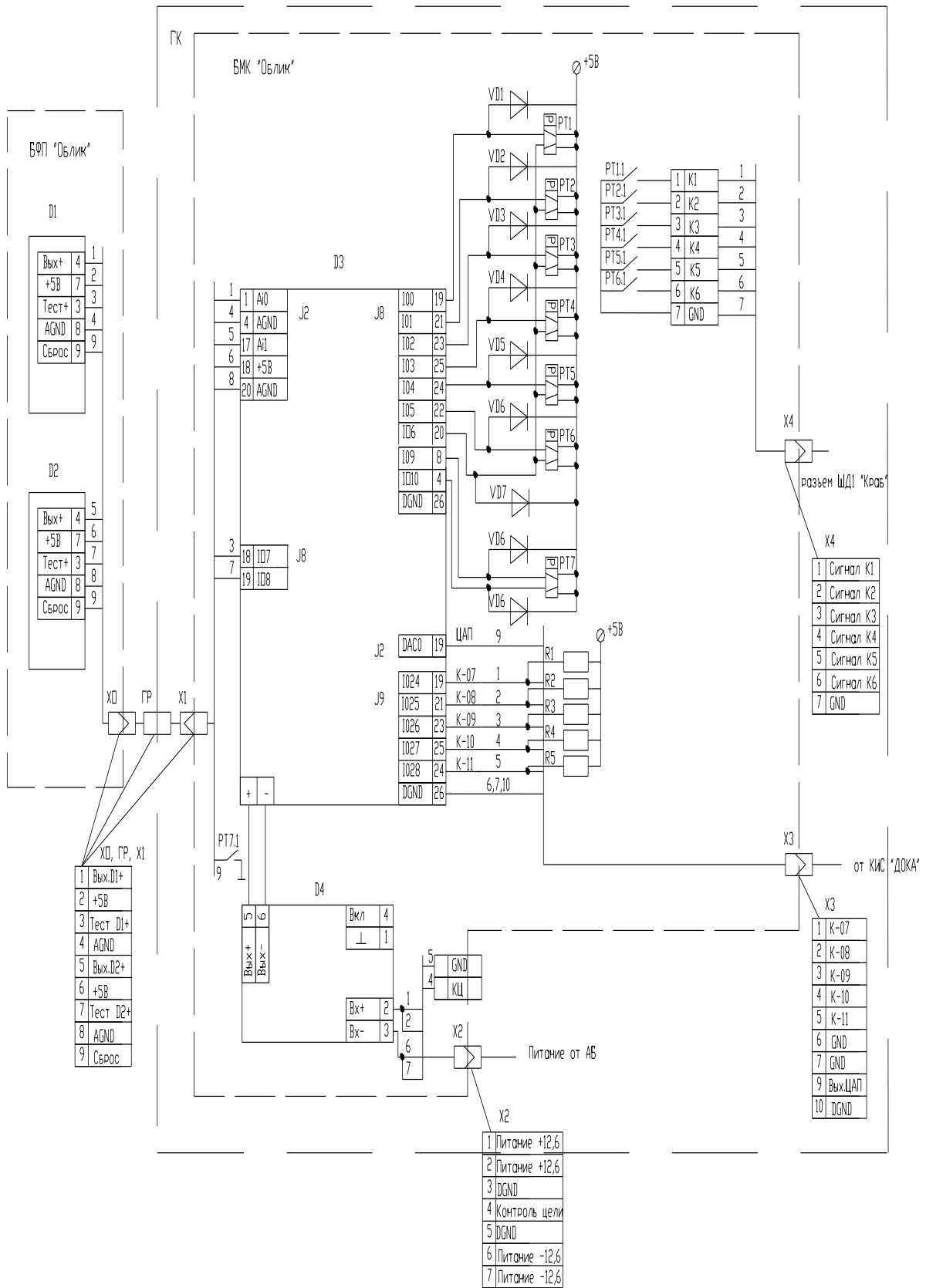


Рис. 1. Электрическая функциональная схема БА «Облик»

БЛОК МИКРОКОНТРОЛЛЕРА БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ «ОБЛИК»

При создании БМК решались задачи выбора платы микроконтроллера и блока питания.

Выбор платы микроконтроллера БМК проходил по двум основным направлениям:

- выбор формата микроконтроллера;
- выбор фирмы-производителя.

В результате анализа данных профильной технической литературы, эксплуатационной и технической документации был сделан вывод об использовании в основе БМК промышленных программируемых логических контроллеров (ПЛК) в формате MicroPC. Указанные ПЛК достаточно просты при настройке и программировании ввиду полной совместимости с архитектурой IBM PC. Кроме того, имеют высокие показатели надежности исполнения и эксплуатации. Выбор конкретного устройства из широкого модельного ряда комплектующих, представленных на рынке устройств промышленной автоматизации, был остановлен на ПЛК CPU188-5MX фирмы «Fastwel». Данный выбор определили следующие факторы:

- фирма «Fastwel» является отечественным производителем;
- возможность работы изделия в расширенном диапазоне температур, соответствующих условиям ближнего космоса (от -40 до $+85^{\circ}\text{C}$);
- устойчивость изделий к ударным (до 20 g) и вибрационным (до 5 g) перегрузкам, соответствующим нагрузкам при выводе на орбиту;
- среднее время безотказной работы не менее 100 000 часов;
- радиационная стойкость аппаратуры;
- приемлемые сроки поставки;
- низкая стоимость;
- наличие опыта разработки систем управления с использованием ПЛК «Fastwel».

ПЛК функционирует под управлением операционной системы FDOS, совместимой с MS-DOS. Для написания специального программного обеспечения использовался язык программирования Borland C++ версии 3.0.

Выбор блока питания первоначально был остановлен на изделиях фирмы «Interpoint», однако условия и сроки поставки были неприемлемы. В итоге, был найден отечественный производитель, продукция которого не уступала зарубежной по требуемым параметрам, а цена выбранного блока питания была меньше цены зарубежного аналога в десятки раз. Кроме того, сроки изготовления и поставки (до 1 месяца) изделий фирмы «Александр Электрик» оказались вполне приемлемыми. Приняв во внимание важность решаемой задачи, руководство Воронежского завода обеспечило изготовление двух блоков питания МДМ15-1А05МУ и поставку их в ВКА имени А.Ф. Можайского в рекордно короткие сроки – за 1 неделю [6].

БЛОК ФОТОПРИЕМНИКОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ «ОБЛИК»

Создание БФП было сопряжено с трудностями, обусловленными малой длительностью принимаемого импульса и требованием высокой вероятности его фиксации. К тому же имеющиеся фотоприемники имели достаточно высокий уровень собственного шума. Поэтому в дополнение к поставленной аппаратуре был разработан предварительный усилитель на базе операционного усилителя МСР601 и пиковый детектор с малым дрейфом, позволяющий зафиксировать уровень мощности импульса на время, необходимое для его считывания микроконтроллером.

БФП (рис. 2) включает два фотоприемника фотогальванического типа, рассчитанных на регистрацию импульсного оптического излучения на длине волны 1,3 мкм при длительности импульса 9 нс и плотности потока мощности излучения $1-50$ мВт/мм², и два малошумящих усилителя. Оптическая ось фотоприемников ориентирована в надир. Перед одним из фотоприемников устанавливается полимерный ИК-фильтр.

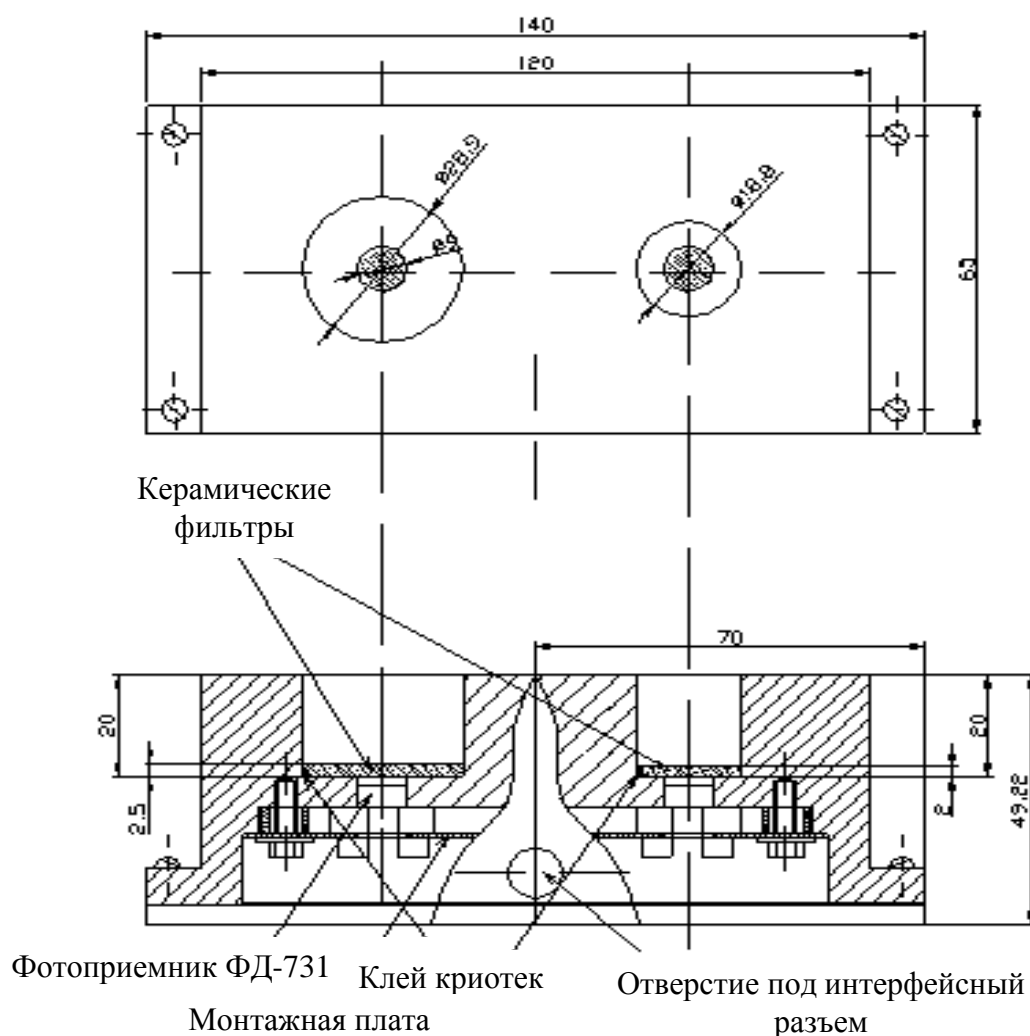


Рис. 2. Схема блока фотоприемников (БФП) БА «Облик»

Углубления в корпусе, в которых размещаются фотоприемники, выполняют функцию бленд, создающих угловое поле зрения 45° и 60° . Углубления закрыты защитными колпачками (на схеме не указаны), защищающими фотоприемники от засветки прямым солнечным излучением. В каждый фотоприемник конструктивно встроен светодиод для проведения калибровки (автономных проверок) фотоприемников.

Токовый сигнал с выхода фотоприемника поступает на вход предварительного усилителя. Уровень сигнала с предварительного усилителя фиксируется пиковым детектором, на выходе которого устанавливается максимальное значение амплитуды полученного сигнала, после чего сигнал подается на аналоговый вход ПЛК, расположенного в блоке микроконтроллера. Полученный сигнал анализируется по уровню мощности излучения и выдается на дискретные выходы ПЛК, подключенные к системе телеметрии МКА для передачи полученных значений на НКУ.

Съем результатов измерения может осуществляться в любой момент времени, если сохраняется включенное состояние комплекса после проведения измерения, и, если по соответствующей разовой команде с Земли не осуществлялось обнуление результатов измерений. Сброс пикового детектора осуществляется кратковременным замыканием на корпус накопительного конденсатора. Информация о мощности потока излучения после обработки подается через ЦАП микроконтроллера на командно-измерительную систему МКА.

Для осуществления контроля работоспособности и тестирования БА «Облик» при проведении автономных и комплексных проверок, а также в ходе штатной эксплуатации в составе

КА «Можаец-4» в БФП конструктивно встроены внутренние источники оптического излучения. Они включаются по разовым командам с Земли и создают засветку, соответствующую максимальному уровню интенсивности регистрируемого излучения. Управление блоком фотоприемников осуществляется электронными ключами, подключенными к дискретным выходам CPU188-5МХ.

После создания и испытания макета был собран действующий образец аппаратуры «Облик». Вес аппаратуры вместе с корпусами не превысил 1,5 кг, потребляемая мощность при работе составила не более 2 ВА [6].

Опыт функционирования БА «Облик» на орбите показал правильность разработанных технических решений. БА «Облик» активно использовалась в составе КА «Можаец-4» в условиях орбитального полета. Проведено большое количество космических экспериментов. Общее время функционирования аппаратуры многократно превысило заданные сроки эксплуатации без технических неисправностей или каких-либо замечаний к ее работе. Что касается временных затрат на создание аппаратуры, включающих время на поставку комплектующих, то от стадии разработки проекта до проведения промежуточных испытаний совместно с БКУ (НИЛАКТ, г. Калуга) и комплексных испытаний на базе завода изготовителя (ПО «Полет-КБ», г. Омск) в составе МКА «Можаец-4» составило менее шести месяцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2005 году по заданию командования Космических войск с учетом полученного при разработке опыта был создан комплекс бортовой аппаратуры «Облик-2» МКА «Можаец-5» (рис. 3), являющийся модернизацией БА «Облик». БА «Облик-2» укомплектована вдвоенным модернизированным БФП и модифицированным БМК, позволяющими фиксировать как значение амплитуды, так и форму зафиксированного сигнала. Также в состав комплекса был включен блок уголковых отражателей с улучшенными характеристиками. Работа аппаратуры «Облик-2» синхронизировалась с работой комплекта НАП и комплекса аппаратуры ДЗЗ МКА «Можаец-5».



Рис. 3. БФП и БМК бортовой аппаратуры «Облик-2» МКА «Можаец-5»

Таким образом, БА «Облик» является унифицированной многоканальной измерительной системой, которая позволяет в зависимости от поставленных задач формировать комплекты

специальной аппаратуры с широким диапазоном средств измерений, различными вариантами программного обеспечения по обработке полученной информации и унифицированными интерфейсами для стыковки с БКУ МКА.

Список используемых источников

1. Мосин Д.А., Садыков Д.В., Скрипников А.Н. Методика баллистического обоснования структуры орбитальной группировки космических аппаратов непрерывного обслуживания Арктического региона // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 664. – С. 43–51.

2. Ваганов А.А., Онуфрей А.Ю. Мониторинг земной и водной поверхности в оптическом диапазоне с использованием группировки малых космических аппаратов на низких орбитах // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 670. – С. 38–49.

3. Фарафонов А.В., Слатов В.Л. Разработка и создание бортовых систем малогабаритных космических аппаратов на основе применения аппаратуры промышленной автоматизации в условиях временных ограничений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. № 4. – С. 27–32.

4. Применение аппаратуры формата MicroPC для построения бортовых комплексов управления малых космических аппаратов / Ф.А. Гришин [и др.] // Известия ВУЗов. Приборостроение. – М., 2004. – № 3. – С. 52–56.

5. Гобчанский О.П. Применение MicroPC в вычислительных комплексах специального назначения // Современные технологии автоматизации. – М., 1997. – № 1. – С. 33–38.

6. Использование аппаратуры промышленной автоматизации для создания бортовых систем космических аппаратов / А.В. Фарафонов [и др.] // Современные технологии автоматизации. – М., 2004. – № 9. – С. 77–81.

А.С. Березин*;
А.Н. Мартышев**;
М.С. Федотов**;
А.А. Шапошников**,

кандидат педагогических наук

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

** Военный институт (ЖДВ и ВОСО) ВА МТО им. А.В. Хрулева МО РФ, г. Санкт-Петербург.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ГИРЕВОГО СПОРТА В СИЛОВОЙ ПОДГОТОВКЕ КУРСАНТА ТЫЛОВОГО ВУЗА КАК УСЛОВИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ДОЛГОЛЕТИЯ ВОЕННОГО СПЕЦИАЛИСТА

В статье рассмотрен механизм продления профессионального долголетия специалистов тылового обеспечения Министерства обороны Российской Федерации. Описаны отрицательные факторы военно-профессиональной деятельности указанной категории военнослужащих. Проведен тщательный анализ уровня силовой подготовленности кандидатов на должности будущих специалистов тылового профиля и рассмотрена главная причина его снижения. Для повышения уровня силовой подготовленности (базового физического качества) и его долгосрочного сохранения в период профессиональной деятельности предложен эффективный комплекс физических упражнений с гирями. Представлены преимущества использования предложенного комплекса упражнений в процессе формирования силовой подготовки курсанта – будущего специалиста тылового профиля.

Ключевые слова: кандидаты, поступающие в вузы МО РФ, курсанты тылового вуза, двигательная активность, гиподинамия, анализ силовой подготовленности, средства гиревого спорта.

В послании Федеральному собранию президент России четко определил направление деятельности военно-промышленного комплекса на техническое оснащение армии и флота новейшими образцами вооружения и военной техники [1]. Выполнение поставленной задачи Верховного главнокомандующего возможно при наличии высококвалифицированных специалистов. В связи с этим система военного образования находится в условиях непрерывного реформирования, которое обусловлено развитием и совершенствованием средств ведения вооруженной борьбы.

Наряду с возросшей потребностью в квалифицированных военных специалистах, которые за время обучения в военном вузе должны освоить необходимый набор сложных профессиональных компетенций, наблюдается тенденция снижения числа поступающих при прохождении вступительных испытаний по физической подготовке из расчета «человек(а) на место». Одной из значимых причин, обуславливающих данный противоречие, является постоянно снижающийся уровень физической подготовленности кандидатов, особенно это касается силовых качеств.

Значительное развитие цифровых технологий в стране ведет к снижению общего объема двигательной активности. Как правило, молодые люди первыми начинают пользоваться возможностями (дистанционная покупка и доставка товаров на дом, виртуальное общение, экскурсии и путешествия он-лайн и т.п.), предоставляемыми новыми «гаджетами», которые упрощают жизнь. В помощь школьным учителям для эффективного освоения учениками учебных дисциплин созданы различные интернет-ресурсы [2], содержащие дополнительную информацию для самостоятельного изучения в период болезней или в других условиях. Обратной стороной тотальной цифровизации для молодежи является снижение интереса к спортивным секциям, активным играм со сверстниками на свежем воздухе и прочим видам контактного взаимодействия.

Дистанционные формы получения различных услуг, в том числе и образовательных, в последнее время становятся чрезвычайно необходимыми в связи с введением на территории нашего государства режима повышенной готовности из-за пандемии коронавирусной инфекции (COVID19). Соблюдение режима самоизоляции, в период которого запрещены любые спортивные и развлекательные мероприятия, способствует снижению общего объема двигательной активности человека. Еще в античные времена Аристотель сказал: «Движение – это жизнь, а жизнь – это движение!» и он понимал все последствия, связанные с ограничением движения. Все системы организма человека страдают от недостатка активности, особенно сердечно-сосудистая, опорно-двигательная, нервная, что впоследствии влечет за собой ухудшение состояния здоровья.

Для определения причин общего снижения уровня силовой подготовленности курсантов образовательных учреждений тылового профиля, которые после окончания обучения комплектуют подразделения и воинские части МО РФ, а так же с целью анализа и систематизации данных силовой подготовленности кандидатов, поступающих в указанные вузы, в период с 2012 по 2016 год были организованы и проведены практические исследования. Силовая подготовленность тестировалась по следующим параметрам:

- динамометрия мышц правой и левой кистей;
- станова́я динамометрия;
- подтягивание на перекладине;
- сгибание и разгибание рук в упоре лежа;
- поднимание ног к перекладине.

Тестирование осуществлялось в один день с достаточным интервалом отдыха для восстановления между выполнением. Измерение силы кисти проводилось с помощью кистевого динамометра на вытянутой вперед руке. Сила мышц спины проверялась при помощи станова́го динамометра, хват рукоятки динамометра – произвольный. При замере предоставлялось три попытки, лучшая из которых заносилась в протокол исследований.

Подтягивание осуществлялось на гимнастических многопролетных перекладинах поточным способом. Испытуемым предлагалось за счет мышечных усилий подтянуться, чтобы подбородок оказался выше перекладины и опуститься в неподвижное положение «вис, хватом сверху». Фиксация осуществлялась внизу в течение 1 секунды. Попытки не засчитывались при выполнении рывковых и маховых движений, допускались незначительные отклонения в технике выполнения упражнения, такие как разведенные или согнутые ноги, перехваты на грифе перекладины.

Упражнение на тестирование силовой выносливости (сгибание-разгибание рук лежа в упоре) проводилось на ровной площадке с применением специального звукового устройства высотой 5 см, расположенного под грудью испытуемого, подававшее сигнал, при нажатии на него. Упражнение выполнялось без остановок с фиксацией тела в верхнем положении при полностью выпрямленных руках. Запрещались прогибы в спине, касание площадки любой частью тела, за исключением груди. Остановка производилась при паузе более 2 сек, либо при невозможности продолжать выполнение упражнения испытуемым.

Поднимание ног к перекладине выполнялось на многопролетных гимнастических перекладинах поточным способом. Из положения «вис, хват сверху» выпрямленные ноги за счет мышечных усилий поднимались до касания перекладины, после чего принималось положение «вис». Запрещалось выполнение упражнения махом и рывком, допускалось незначительное сгибание и разведение ног.

По результатам проведенных исследований были получены данные, отраженные в табл. 1–4. В 2012 году было протестировано 187 испытуемых по вышеописанной методике (табл. 1). Средние показатели силовых качеств в данной группе соответствовали требованиям для поступающих в тыловой вуз по уровню силовой подготовленности.

В 2013 году 114 кандидатов обследовано по указанным критериям силовой подготовленности. За год по большинству параметров значимых различий в динамике не наблюдалось,

однако силовая выносливость мышц-разгибателей рук показала достоверный уровень снижения на 2,11 у. е., что соответствует уровню значимости $p \leq 0,001$.

Таблица 1

Динамика показателей силовой подготовленности 2012–2013 гг.

№	Показатели	2012 г.		2013 г.		Pst
		\bar{x}	<i>m</i>	\bar{x}	<i>m</i>	
1	Динамометрия правой кисти, кг	48,96	0,14	48,55	0,35	-
2	Динамометрия левой кисти, кг	46,32	0,52	46,27	0,31	-
3	Становая динамометрия, кг	132,55	1,23	129,52	3,21	-
4	Подтягивание на перекладине, у.е.	12,21	0,85	11,79	0,99	-
5	Сгибание и разгибание рук в упоре лежа, у.е.	45,95	0,05	43,84	0,21	$p \leq 0,001$
6	Поднимание ног к перекладине, у.е.	15,43	0,21	14,38	0,95	-

В 2014 году были протестированы 112 человек, поступающих в тыловой вуз (табл. 2). По всем тестам проявляется регрессивный характер, достоверные различия показаны при сгибании и разгибании рук в упоре лежа и при поднимании ног к перекладине на уровне значимости $p \leq 0,001$ и $p \leq 0,05$ соответственно. Первые четыре показателя снижены, но достоверных значений не достигли.

Таблица 2

Динамика показателей силовой подготовленности 2012–2014 гг.

№	Показатели	2012 г.		2014 г.		Pst
		\bar{x}	<i>m</i>	\bar{x}	<i>m</i>	
1	Динамометрия правой кисти, кг	48,96	0,14	47,41	1,45	-
2	Динамометрия левой кисти, кг	46,32	0,52	45,92	0,64	-
3	Становая динамометрия, кг	132,55	1,23	129,41	1,52	-
4	Подтягивание на перекладине, у.е.	12,21	0,85	11,22	1,21	-
5	Сгибание и разгибание рук в упоре лежа, у.е.	45,95	0,05	43,15	0,61	$p \leq 0,001$
6	Поднимание ног к перекладине, у.е.	15,43	0,21	13,65	0,68	$p \leq 0,05$

В 2015 году 103 испытуемых прошли тестирование по предложенным упражнениям, характеризующим уровень силовой подготовленности (табл. 3). За исключением подтягивания на перекладине, динамика показателей с 2012 по 2015 год показала достоверные отрицательные сдвиги на уровне значимости от $p \leq 0,05$ до $p \leq 0,001$.

В табл. 4 представлена динамика результатов тестирования начального уровня (2012 г.) силовой подготовленности кандидатов и конечного уровня (2016 г.) в проводимых исследованиях. В 2016 году было обследовано 125 кандидатов по искомым параметрам. В сравнении с начальным уровнем показатели силовых качеств испытуемых претерпели статистически достоверное снижение. По первому показателю на 4,04 кг ($p \leq 0,01$), по второму – 3,22 кг ($p \leq 0,01$), по третьему – 8,43 у.е. ($p \leq 0,001$), по четвертому – 3,29 у.е. ($p \leq 0,01$), по пятому – 5,83 у.е. ($p \leq 0,001$), по шестому – 2,91 у.е. ($p \leq 0,001$).

Таблица 3

Динамика показателей силовой подготовленности 2012–2015 гг.

№	Показатели	2012 г.		2015 г.		Pst
		\bar{x}	m	\bar{x}	m	
1	Динамометрия правой кисти, кг	48,96	0,14	46,85	0,95	$p \leq 0,05$
2	Динамометрия левой кисти, кг	46,32	0,52	43,52	0,33	$p \leq 0,001$
3	Становая динамометрия, кг	132,55	1,23	126,96	2,20	$p \leq 0,05$
4	Подтягивание на перекладине, у.е.	12,21	0,85	10,85	0,84	-
5	Сгибание и разгибание рук в упоре лежа, у.е.	45,95	0,05	40,22	0,08	$p \leq 0,001$
6	Поднимание ног к перекладине, у.е.	15,43	0,21	12,98	0,14	$p \leq 0,001$

Таблица 4

Динамика показателей силовой подготовленности 2012–2016 гг.

№	Показатели	2012 г.		2016 г.		Pst
		\bar{x}	m	\bar{x}	m	
1	Динамометрия правой кисти, кг	48,96	0,14	44,92	1,21	$p \leq 0,01$
2	Динамометрия левой кисти, кг	46,32	0,52	43,10	0,84	$p \leq 0,01$
3	Становая динамометрия, кг	132,55	1,23	124,12	0,56	$p \leq 0,001$
4	Подтягивание на перекладине, у.е.	12,21	0,85	8,92	0,76	$p \leq 0,01$
5	Сгибание и разгибание рук в упоре лежа, у.е.	45,95	0,05	40,12	0,94	$p \leq 0,001$
6	Поднимание ног к перекладине, у.е.	15,43	0,21	12,52	0,99	$p \leq 0,001$

Эмпирические изыскания проводились на репрезентативной выборке ($n = 641$), что является значимым фактором для получения объективных данных исследования. Анализ полученных результатов свидетельствует о статистически достоверном снижении результатов показателей силовых качеств кандидатов, поступающих в тыловую вуз МО РФ. Причинами отрицательного влияния на силовые качества молодого пополнения выступают различные факторы, рассмотрение которых представляет интерес для научного познания в области профессионально-прикладной физической подготовки по разработке эффективных средств и методов повышения физической подготовленности обучающихся в тыловых вузах МО РФ. Данное исследование показывает проблемную ситуацию, которую приходится решать в условиях образовательной среды военного вуза и затрагивает актуальное направление научных исследований.

Курсанты высших учебных заведений в процессе обучения подвержены ряду отрицательных факторов военно-профессиональной деятельности, таких как: принятие важных решений в условиях недостатка времени и опыта; высокая ответственность за получение необходимых компетенций перед вышестоящим командованием и родителями; длительное ограничение двигательной активности и сохранение статической в ходе учебных занятий; перегрузка интеллектуальной сферы и многое другое [3]. Вышеперечисленные факторы служебной деятельности будущего специалиста тылового профиля оказывают негативное влияние на здоровье и, как следствие, на профессиональное долголетие, что обуславливает высокий уровень квалификационных требований по физической подготовленности к курсанту тылового вуза – будущему офицеру.

Гиподинамия, длительная статичность рабочей позы, сильнейшая интеллектуальная нагрузка способствуют наступающему утомлению. В качестве профилактики могут успешно использоваться физические упражнения, подобранные с учетом специфики служебной деятельности курсанта тылового вуза для прохождения дальнейшей службы. Характер физических упражнений, содержание применяемых комплексов и методических приемов должны определяться не только особенностями приема и переработки служебной информации и режимом его двигательной деятельности, но и характером соблюдаемой им рабочей позы. При этом физические упражнения должны быть направлены, прежде всего, на снятие отрицательных последствий застойных процессов [4].

В целях предупреждения нежелательных состояний здоровья курсантов военно-учебных заведений тылового профиля нами был разработан экспериментальный комплекс физических упражнений, который базируется на применении средств гиревого спорта. Он имеет ряд преимуществ перед имеющимися в настоящее время:

- удобство в использовании при проведении учебно-тренировочных занятий с минимальным набором гирь различной массы, которые не требуют значительного пространства;
- низкая стоимость снарядов и их компактность, а так же возможность организации учебно-тренировочных занятий в ограниченном пространстве;
- вариативность используемых физических упражнений, способствующих рациональной нагрузке функциональных систем организма (конструктивные особенности снаряда позволяют выполнять порядка 150 разнообразных силовых упражнений).

Кроме силовой подготовленности данный комплекс физических упражнений с гирями имеет положительное влияние на свойства и качества личности курсантов, обладает оздоровительной направленностью, охватывает широкий возрастной диапазон занимающихся. Несомненным плюсом является экономичность в средствах материально-технического обеспечения при проводимых занятиях физической подготовки.

В заключение необходимо отметить тот факт, что для правильного и рационального отношения к своему личному здоровью офицеру тыловой службы необходимо систематически заниматься своей физической подготовкой. Для формирования привычки заниматься самостоятельно физическими упражнениями именно на этапе получения военной профессии необходимо активно внедрять в образовательную деятельность каждого курсанта применение средств гиревого спорта. Планомерное и правильное дозирование физической нагрузки будет способствовать привитию здоровой привычки будущему офицеру тыла самостоятельно заниматься физическим совершенствованием в дальнейшей служебной деятельности, тем самым поддерживая хороший уровень здоровья и продляя профессиональное долголетие.

Список используемых источников

1. Послание Президента Федеральному Собранию. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/62582> (дата обращения: 15.04.2020).
2. 50 интернет-ресурсов для дистанционного обучения школьников. – URL: <https://zen.yandex.ru/media/begomvshkolu/50-internetresurov-dlia-distancionnogo-obucheniia-shkolnikov-5e7c51b96a65832da0119208> (дата обращения: 15.04.2020).
3. *Сандин С.М.* Профессиографическая характеристика служебной деятельности офицера тыла // Экстремальная деятельность человека. – 2015. – № 3 (36). – С. 74–77.
4. *Шапошников А.А., Кропивницкий А.М., Лазарев А.В.* Об эффективности физических упражнений для восстановления некоторых функций человека в условиях гиподинамии // Научно-технический сборник. – СПб.: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2019. – № 39, ч. 2. – С. 170–172.

В.М. Васкевич,
кандидат технических наук, доцент;
Н.В. Васкевич

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКЕ В ВОЕННОМ ВУЗЕ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье рассматривается опыт интенсификации обучения курсантов в военном вузе, раскрывается актуальность задач, решаемых инженерной графикой, ее роль в развитии обучающихся.

Описаны подходы в применении информационных компьютерных технологий при изучении дисциплины «Инженерная графика» в ВКА имени А.Ф. Можайского.

Ключевые слова: интенсивные технологии обучения, информационные компьютерные технологии, инженерная графика, курсанты.

Любая современная отрасль промышленности (авиационная и ракетно-космическая промышленность, судостроение, оборонно-промышленный комплекс и т. д., включая строительство) базируется на общепринятых правилах в выражении и оформлении инженерных (конструкторских) решений. Данные правила образно можно назвать «инженерным языком», особым инструментом передачи информации, который должен быть понятен для всех участников производства. Основной формой передачи информации в инженерной среде является конструкторский графический документ – чертеж. Благодаря принятию единых правил при разработке конструкторской документации, основанных на требованиях государственных стандартов, достигается однозначность в понимании информации, изложенной на чертеже.

Изучение правил разработки конструкторской документации осуществляется в процессе освоения обучающимися дисциплины «Инженерная графика». Важно отметить положение инженерной графики в учебных планах инженерных специальностей. Не смотря на то, что инженерная графика относится к дисциплинам профессионального цикла, она изучается курсантами уже в первом семестре. Во-первых, освоение обучающимися навыков оперирования геометрическими образами в пространстве, изучение способов проекционного черчения и, как итог, уверенное владение инженерным языком, позволяющим грамотно создавать и читать чертежи, закладывает основу инженерного образования. Во-вторых, изучение инженерной графики помогает формированию способности обучающихся быстрее усваивать информацию, ее анализировать и принимать решения благодаря развитию мыслительных процессов при изучении дисциплины. Тем самым инженерная графика помогает обучающимся осваивать другие учебные дисциплины в вузе, будучи важным звеном связи технических наук с математическими.

Методика преподавания инженерной графики отработывалась в течение многих десятилетий. Классические подходы преподавания инженерной графики заложил Яков Александрович Севастьянов (1796–1849) – крупный ученый-исследователь, первый русский профессор начертательной геометрии.

Современные достижения в науке, развитие научно-технического прогресса, промышленности и технологий неизбежно привело к усложнению не только видов изделий, но и средств их производства. Это в свою очередь, с одной стороны, увеличило объем информации, обрабатываемой конструктором в процессе проектирования (изделий, технологических процессов и т.д.), а с другой стороны, требует сокращения времени на разработку конструкторской документации без потери качества. Данные обстоятельства, несомненно, находят отражение в инженерной графике через актуализацию учебных программ. Важно отметить наличие в

военном вузе особой спецификой организации учебного процесса и повседневной деятельности, связанной с отрывом курсантов от занятий в связи с выполнением служебных обязанностей военной службы (наряды, караулы, командировки и т. п.), что приводит к некоторому сокращению учебного времени для отдельного обучающегося. Внедрение, использование и совершенствование интенсивных технологий обучения на основе информационных компьютерных технологий позволяет компенсировать эти потери и обеспечить достижение требуемых результатов обучения инженерной графике в соответствии с требованиями учебной программы. Интенсивное обучение – это передача обучающимся большего объема учебной информации при неизменной продолжительности обучения и без снижения требований к качеству формируемых знаний. Интенсивные технологии обучения – это оптимальная система организации и методического обеспечения учебно-педагогического процесса, основанная на использовании резервных возможностей личности. В основе интенсивных технологий обучения важнейшее место отводится методике, обеспечивающей преодоление психологических барьеров усвоения информации в процессе обучения, которая создает комфортные условия для обучающихся, способствующие более глубокому усвоению учебного материала [1].

Понятие «интенсивный, интенсивность» образовалось от латинского слова *intension*, означает – напряжение, усиление, отличающийся высоким напряжением, проявляющийся с большой силой. Повышение темпов обучения возможно по трем направлениям: оптимизация содержания учебного материала, совершенствование методов, совершенствование организации обучения. Существенный вклад в повышение эффективности образовательного процесса при изучении инженерной графики вносят информационные компьютерные технологии. Применение информационных компьютерных технологий позволяет реализовывать новые возможности обучения, такие как совершенствование традиционных форм и способов изучения учебного материала, увеличение объема изучаемого материала. Анализ исследований ученых подтверждает, что интенсификация образования средствами информационных технологий, с помощью которых обучающийся может работать как самостоятельно, так и под руководством преподавателя, в 1,5–2 раза сокращает время и увеличивает качество усвоения учебного материала по сравнению с традиционными формами обучения [2].

В настоящее время можно выделить основные виды информационных компьютерных технологий:

- мультимедийные технологии визуализации учебного материала;
- электронные учебные издания;
- компьютерный контроль и компьютерное тестирование как форма контроля;
- компьютерные дистанционные технологии обучения.

Адекватный выбор методов и средств обучения при использовании информационных технологий обучения является актуальной проблемой. Из практики установлено, что использование информационных технологий обучения только в качестве обеспечения наглядности обучения инженерной графике (демонстрация слайдов в форме визуальной поддержки текста лекции) не стимулирует познавательный интерес и не способствует осмыслению учебного материала. Значительно большая степень усвоения учебного материала достигается при внедрении в демонстрационный материал лекций элементов анимации, отображающих мыслительные образы (точки, прямые, плоскости, поверхности), раскрывающих основные подходы и правила построения изображений, свойства проекций геометрических элементов, демонстрирующих алгоритмы рациональных решений метрических и позиционных задач и т. д. При этом усиление мыслительной деятельности обучающихся обеспечивается проработкой учебного материала занятия в специальных тетрадах (для лекционных или практических занятий), путем решения различных задач, находящихся в прямой взаимосвязи с демонстрируемым учебным материалом. Очень важно выстроить анимацию таким образом, чтобы в ней отображалась логика графических преобразований, последовательность и взаимосвязь действий при графических построениях, а также способы контроля полученных ре-

зультатов. Это позволяет активизировать самостоятельную работу обучающихся не только в часы самоподготовки, но и на лекциях, облегчает понимание ими учебного материала [3].

Визуализация учебного материала на основе анимации позволяет повысить эффективность усвоения учебного материала при изучении наиболее сложных тем, таких как «Проецирование. Проекция точки, прямой и плоскости», «Способы преобразования проекций», «Пересечение геометрических элементов» [4]. Так, анимированное построение линий проекционной связи, проекций перпендикуляра к плоскости, определение при преобразованиях радиусов вращения позволяет значительно упростить усвоение учебного материала. А для некоторых обучающихся данный способ представления учебного материала является единственным, позволяющим понять сущность теоретических рассуждений.

Ключевым инструментом информационных технологий обучения, в том числе как средства интенсификации обучения, является учебный комплект, включающий учебник, учебный словарь, учебное пособие, рабочую тетрадь [5]. Наличие такого комплекта кардинально сокращает время поиска необходимого учебного материала, позволяет работать одновременно с несколькими источниками. Благодаря наличию в электронных изданиях специальных мультимедийных блоков облегчается для обучающихся самостоятельное изучение учебного материала. Одним из примеров такого электронного издания является базовый электронный учебник «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика» [6], разработанный кафедрой «Начертательной геометрии и черчения» ВКА имени А.Ф. Можайского по заданию МО РФ для использования в военных вузах. Структура учебника строго соответствует действующей учебной программе, охватывает всю дисциплину «Инженерная графика» и состоит из двух модулей «Начертательная геометрия» и «Инженерная графика». При работе с данным учебником обучающимся доступны следующие элементы: теоретическое содержание разделов и тем, библиотека основной, дополнительной, нормативной и справочной литературы, учебные дидактические материалы. В составе учебника по каждой теме разработаны компьютерные тесты для самоконтроля обучающихся.

Интенсификация обучения при изучении инженерной графики достигается применением информационных технологий обучения на всех этапах изучения дисциплины и на всех видах занятий (лекции, практические занятия, самостоятельная работа). При объяснении нового материала, реализуя принцип наглядности, применяются современные электронные продукты подготовки и демонстрации презентаций (слайдов). На первом занятии преподаватель объясняет обучающимся, как необходимо правильно работать с информацией, демонстрируемой на слайдах, а именно, как выполнять графические построения в рабочих тетрадях, какую дополнительную информацию переносить в рабочую тетрадь (определения, алгоритмы построений, свойства проекций и т. д.). Зная эти правила, курсант пользуется рабочей тетрадью увереннее и, что не менее важно, быстрее выполняет графические построения, сразу производит необходимые записи. Преимуществом такого подхода также является то, что при изложении учебного материала, в случае необходимости, всегда есть возможность вернуться к начальной информации и ее повторить (обычно достаточно только демонстрации), сокращая при этом количество возможных ошибок из-за неточных графических построений.

На практических занятиях применение информационных технологий позволяет значительно увеличить объем задач с различной степенью сложности, при этом появляется возможность дифференцировать обучение в зависимости от степени усвоения учебного материала и общей подготовки курсантов. В значительной степени это проявляется при выполнении курсантами чертежей и других заданий большой трудоемкости в электронном виде с применением графических редакторов. В ходе самостоятельной работы, используя элементы учебного комплекта, курсант также сокращает время проработки пройденного материала (решения задач домашнего задания) за счет мгновенного перехода к необходимой теоретической информации и ее графическому отображению, при этом больше времени у него остается для самоконтроля. Самоконтроль осуществляется посредством компьютерного

тестирования, в процессе которого обучающийся самостоятельно может определить разделы учебной дисциплины, требующие дополнительного изучения.

Применение компьютерного тестирования является важным элементом информационных технологий обучения. К преимуществам данного способа тестирования можно отнести строго определенные единые требования к порядку проведения тестирования, контрольным заданиям, к способам их проверки и анализа. Компьютерное тестирование можно однозначно считать элементом интенсификации процесса обучения, так как является средством регулярного индивидуального объективного контроля учебных достижений обучающихся, позволяет проверить знания по большинству вопросов дисциплины, значительно сокращает время, отводимое на определение результатов проверки знаний, облегчает процесс анализа уровня обученности. Однако нужно понимать, что любое тестирование может обеспечить выявление степени усвоения учебного материала на уровне простого воспроизведения. Применение тестирования для проверки практической деятельности малоэффективно. Очень удобно применять компьютерное тестирование при проведении рубежного контроля по наиболее важным и значительным по объему учебного материала темам. При тестировании важно определить рациональное время, отводимое для выполнения теста с учетом количества заданий и трудоемкости их выполнения.

При всех описанных выше положительных характеристиках использования информационных технологий необходимо высказать некоторые условия успешного их применения.

Применение информационных технологий обучения может создать иллюзию упрощения работы преподавателя. Так, при подготовке к проведению занятия может создаваться набор шаблонных электронных демонстрационных материалов, применяемых от занятия к занятию без переработки, использование которых приводит к избыточной демонстрации учебного материала, не улучшая качества его усвоения. Поэтому при разработке элементов методического обеспечения информационных технологий обучения важным условием является сохранение научных принципов обучения, фундаментальности знаний, их междисциплинарной интеграции, профессиональной значимости. В условиях интенсификации обучения соблюдение данного подхода требует от преподавателя более углубленной проработки материалов для проведения занятий, увеличения времени на подготовку к занятиям. Еще одним определяющим условием реализации информационных технологий обучения, особенно в среде интенсификации обучения, является доступность для обучающихся всех электронных ресурсов не только во время проведения занятий, но и во время внеаудиторной самостоятельной работы.

Как показывает анализ многочисленных публикаций, а также наш опыт образовательной деятельности в ВКА имени А.Ф. Можайского, в том числе в условиях дистанционной работы, эффективность применения информационных технологий обучения не вызывает сомнений.

Применение интенсивных технологий обучения при рациональном выборе преподавателем педагогического инструмента позволяет минимизировать влияние негативных факторов на процесс обучения, т. е. компенсировать потери учебного времени и достичь необходимых результатов обучения в виде сформированных компетенций у обучающихся.

Список используемых источников

1. Михайловский В.Г., Золотовская Л.А. Проектирование и реализация интенсивных технологий обучения в высшей военной школе // Человеческий капитал. – 2016. – №5(89). – С. 41–43.
2. Чемоданова Т.Ф. Компьютерный инжиниринг и графическое образование. – Снежинск: Изд-во СГФА, 2004. – 348 с.

3. *Сиренко С.Н.* Применение информационных технологий как средства интенсификации процесса обучения в вузе // Открытое образование. – 2009. – № 3. – С. 20–29.
4. Рабочая программа учебной дисциплины Инженерная графика / сост. В.М. Вакевич. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 27 с.
5. ГОСТ Р 7.0.60-2020. Издания. Основные виды. Термины и определения. – М.: ИД «Юриспруденция», 2020. – 42 с.
6. Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика [Электронный ресурс]: базовый электрон. учебник / А.М. Шелудяков [и др.]. – Электрон. текстовые дан. (1,5 Гб). – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Р.М. Дулишкин*;

Е.А. Инюшева**;

кандидат военных наук, доцент;

М.Ю. Касавцев**;

кандидат технических наук

*Главное управление кадров МО ФР, г. Москва.

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

О РЕЗУЛЬТАТАХ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОВЫШЕНИЮ УРОВНЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ КУРСАНТОВ АКАДЕМИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Рассмотрен педагогический эксперимент, целью которого является совершенствование методики обучения курсантов и повышение эффективности проведения практических занятий по общевоенной подготовке. Представлены основные результаты эксперимента.

Ключевые слова: методика обучения курсантов, эффективность проведения практических занятий, учебный комплекс подготовки суточного наряда, педагогический эксперимент.

Формирование военно-профессиональных качеств у будущих офицеров – одна из основных задач высшей военной школы, к решению которой необходимо привлечение современных цифровых, образовательных и педагогических технологий. Особенную актуальность решение данной задачи приобретает в условиях существующего противоречия, когда применяются «доцифровые» методы подготовки военнослужащих, с одной стороны, и современная парадигма образования [1], существующие особенности восприятия информации молодыми людьми [2], а также широкое внедрение цифровых технологий в образование [3], с другой.

В результате анализа успеваемости курсантов академии по общевоенной подготовке, проведенного авторами, стало ясно, что для повышения эффективности проведения практических занятий по данной дисциплине необходимо применять современные компьютерные технологии.

В качестве гипотезы исследования было выдвинуто предположение, что использование в учебном процессе экспериментальной группы учебного комплекса подготовки суточного наряда позволит эффективнее формировать профессиональные навыки и умения, и как следствие достигнуть запланированного уровня профессиональной компетентности.

В целом применение новых образовательных технологий позволяет решать ряд важных задач, к числу которых относятся:

- повышение интереса к изучаемой дисциплине;
- увеличение объема информации по дисциплинам общевоенной подготовки;
- улучшение качества организации учебного процесса;
- использование индивидуального характера обучения;
- создание комплекса учебных пакетов, программ для систем виртуальной подготовки военного специалиста.

Репрезентативность исследуемой выборки обеспечивалась тем, что участвовали респонденты одного года призыва, одной специальности, с приблизительно равным уровнем успеваемости и возрастом, кроме того, исследуемые группы были одинаковы по численности (25 респондентов). Также учебные занятия по дисциплине «Общевоенная подготовка» проводились с использованием единых учебно-методических материалов и учебных пособий.

Педагогический эксперимент, схема которого представлена на рис. 1, был проведен в пять этапов.



Рис. 1. Схема педагогического эксперимента

Результаты диагностического этапа педагогического эксперимента были получены при проведении входного контроля. На этом мероприятии у военнослужащих экспериментальной и контрольной групп были определены уровни теоретических знаний (ЭГ-Т и КГ-Т) должностных обязанностей лиц суточного наряда и проведена оценка правильности практических действий (ЭГ-Пр и КГ-Пр) лиц суточного наряда. Результаты входного контроля представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты входного контроля теоретических знаний и практических действий суточного наряда в экспериментальной и контрольной группах до проведения педагогического эксперимента

Оценка \ Группа	ЭГ-Т	КГ-Т	ЭГ-Пр	КГ-Пр
Отлично	7	5	3	3
Хорошо	8	11	11	4
Удовлетворительно	10	9	11	18

В соответствии с полученными результатами был сделан вывод о том, что уровень теоретической подготовки обучающихся контрольных и экспериментальных групп примерно одинаков и варьируется по среднему баллу от 3,84 до 3,88, оценка практических навыков – от 3,41 до 3,68, что недостаточно для качественного решения задач повседневной деятельности. Второй вывод – повышение уровня теоретических знаний и практических навыков обучающихся требует качественного нового подхода не только к методике организации и проведения практических занятий, но и к их материально-техническому обеспечению.

На практических занятиях с личным составом контрольных и экспериментальных групп проводились занятия по теме «Организация внутренней службы. Обязанности лиц суточного наряда». В качестве руководителей занятий назначались курсанты указанных групп. На протяжении весеннего семестра 2019–2020 учебного года и осеннего семестра 2020–2021 учебного года проводилось обучение курсантов экспериментальной группы с использованием программного комплекса автоматизированного места подготовки суточного наряда [5] (далее – учебного комплекса подготовки суточного наряда), который был внедрен в учебный процесс академии [6]. Учебный комплекс подготовки суточного наряда предназначен для повышения уровня подготовленности военнослужащих к выполнению обязанностей в составе суточного наряда. Особенности, структура, алгоритм и работа данного комплекса рассмотрены авторами в работе [7]. Во вводной части второго занятия проводилось контрольное тестирование обучающихся с использованием учебного комплекса подготовки суточного

наряда, в основной части второго занятия проводилась отработка практических действий лиц суточного наряда роты по вводным.

В контрольной группе классно-групповые занятия проводились по классической методике. На первом занятии по данной теме руководителем занятия доводились теоретические положения статей 256, 258–265, 273–282, 298–305 Устава внутренней службы Вооруженных Сил Российской Федерации. Во вводной части второго занятия проводился устный опрос изученного материала, в основной части второго занятия проводилась отработка практических действий лиц суточного наряда роты по вводным.

По истечении исследовательского этапа педагогического эксперимента были проведены контрольные занятия в обеих группах. Результаты теоретической подготовки военнослужащих экспериментальной и контрольной групп, полученные в ходе контрольного занятия, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты контрольного занятия по оценке теоретических знаний и практических действий суточного наряда в экспериментальной и контрольной группах после проведения педагогического эксперимента

Оценка \ Группа	ЭГ-Т	КГ-Т	ЭГ-Пр	КГ-Пр
Отлично	10	6	6	4
Хорошо	13	14	17	6
Удовлетворительно	2	5	2	15

После обработки данных контрольных занятий был проведен их сравнительный анализ, результаты которого изображены на рис. 2 и 3.

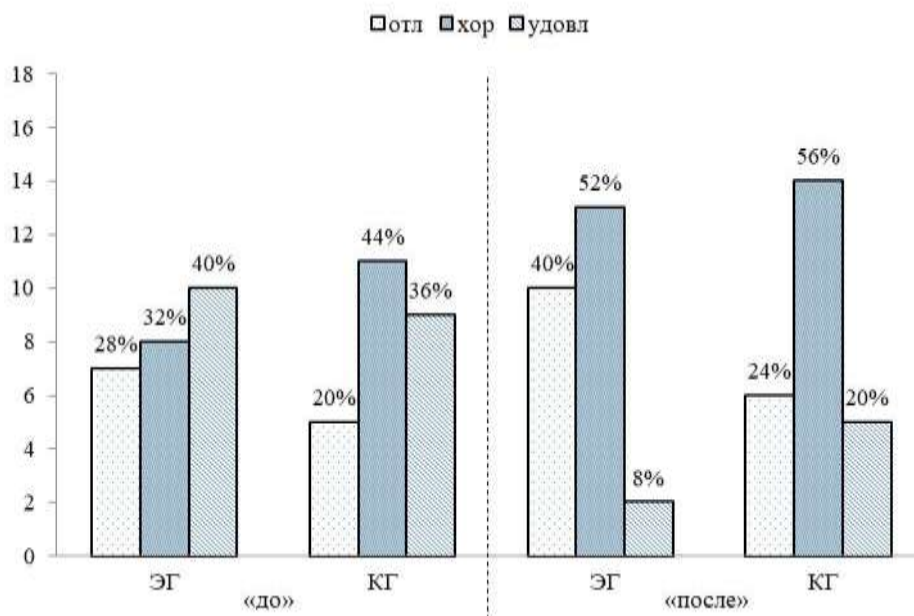


Рис. 2. Сравнительный анализ результатов оценки теоретических знаний военнослужащих в ЭГ и КГ до и после проведения эксперимента

Оценка эффективности занятий с использованием учебного комплекса подготовки суточного наряда была рассчитана с применением известной формулы [4]:

$$\mathcal{E}_{\text{ПрК}} = \frac{(S_{(\text{ЭГ})} - S_{(\text{КГ})}) \times 100}{S_{(\text{К})}}$$

где $\mathcal{E}_{\text{ПрК}}$ – эффективность применения учебного комплекса подготовки суточного наряда;
 $S_{(\text{ЭГ})}$ – средний балл в экспериментальной группе;
 $S_{(\text{КГ})}$ – средний балл в контрольной группе.

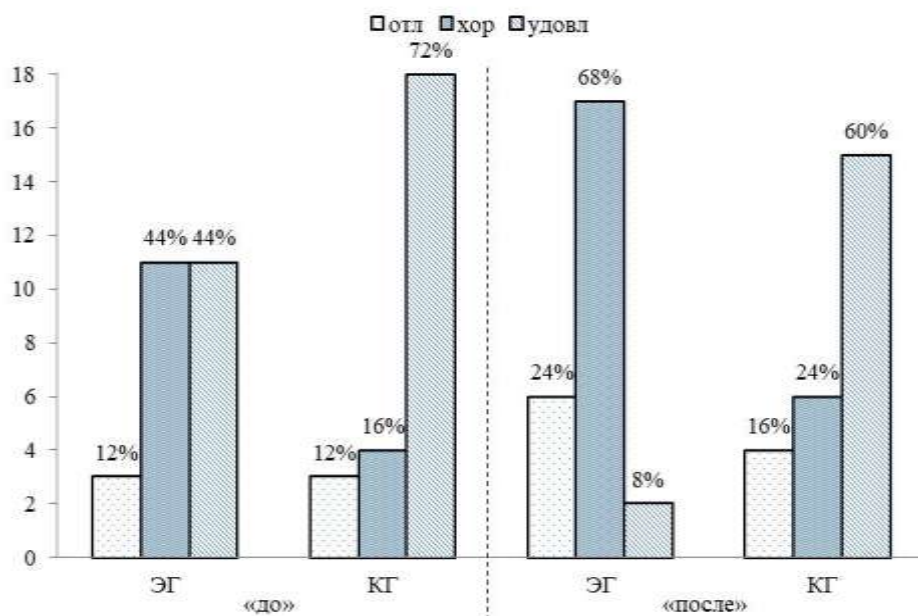


Рис. 3. Сравнительный анализ результатов оценки практических навыков военнослужащих в ЭГ и КГ до и после проведения эксперимента

После проведения аналитического этапа педагогического эксперимента были получены следующие результаты:

- средний балл теоретической подготовки военнослужащих ЭГ после педагогического эксперимента составил 4,32 (был 3,88), увеличился на 10%;
- средний балл практических действий военнослужащих ЭГ после педагогического эксперимента составил 4,16 (был 3,68), увеличился на 12%;
- в целом качество обучения по общевойсковой подготовке в ЭГ, по сравнению с КГ, повысилось на 6%;
- эффективность применения учебного комплекса подготовки суточного наряда по показателю «способность курсанта действовать согласно требованиям общевоинских уставов при выполнении специальных обязанностей в суточном наряде и в нештатных ситуациях» составила 12%.

Таким образом, педагогический эксперимент показал, что применение учебного комплекса подготовки суточного наряда способствует качественному приросту знаний и практических навыков при подготовке обучающихся к выполнению обязанностей должностных лиц суточного наряда, а также овладению ими практикой подготовки подчиненных к выполнению обязанностей должностных лиц суточного наряда, формированию навыков выбора правильного алгоритма действий при возникновении нештатных ситуаций, определению новых методик преподавания. Полученные в ходе эксперимента результаты позволили сделать вывод о целесообразности использования компьютерной программы «Программный комплекс подготовки суточного наряда» при подготовке обучающихся к выполнению специальных обязанностей при несении службы в суточном наряде.

Список используемых источников

1. *Карякин Ю.В.* Новая парадигма образования // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 2. – С. 39–43.
2. Особенности восприятия информации современными российскими студентами / Г.И. Карпушкина [и др.] // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №6. – С. 116–117.
3. *Ахметжанова Г.В., Юрьев А.В.* Цифровые технологии в образовании // Балтийский гуманитарный журнал. – 2018. – Т.7, № 3 (24). – С. 334–336.
4. *Удовидченко Р.С., Киреев В.С.* Сравнительный анализ моделей оценки эффективности обучения персонала // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16909> (дата обращения: 14.01.2021).
5. Свид. о регистрации программы для ЭВМ № 2017663179. Программный комплекс автоматизированного места подготовки суточного наряда / Р.М. Дулишкин, М.Ю. Касавцев, С.И. Фомин. – № 2017660061, заявл. 03.10.2017, опублик. 24.11.2017.
6. Акт о внедрении результатов научных исследований выпускной квалификационной работы сержанта Дулишкина Руслана Михайловича в учебный процесс Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского от 10.04.2018. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. – 2018.
7. *Касавцев М.Ю., Дулишкин Р.М.* Модернизация процесса обучения военнослужащих при подготовке суточного наряда с применением программы для ЭВМ в условиях повседневной деятельности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 252–260.

А.В. Ерофеев,
кандидат военных наук, доцент;
В.О. Кацик,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ У КУРСАНТОВ УСТОЙЧИВЫХ НАВЫКОВ В ВЫПОЛНЕНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЯЗАННОСТЕЙ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

В статье проведен анализ возможных причин возникновения нештатных ситуаций при выполнении специалистами задач по предназначению. Предложены методические приемы обучения будущих специалистов на практических занятиях, способствующие принятию обучающимися решений в условиях возникшей нештатной ситуации.

Ключевые слова: анализ, нештатная ситуация, методические приемы, принятие решения, регламент времени, сеанс управления, внешние факторы, центр управления полетом, наземный комплекс управления.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная профессиональную деятельность, выпускники высших учебных заведений (вуз) Министерства обороны встречаются с ситуациями, не предусмотренными руководящими документами и инструкциями. Такие ситуации принято называть «нештатными». Они могут возникать в организационно-технических системах при выполнении техническим персоналом специальных задач, проведении ремонта и технического обслуживания специальной техники, осуществлении мероприятий всестороннего обеспечения выполняемых задач, влиянии изменений геофизических условий и по многим другим причинам.

Чтобы исключить влияние нештатной ситуации на выполнение поставленной задачи, технический персонал должен быть практически подготовлен к принятию решений, позволяющих выполнять эту задачу в создавшихся условиях. Ошибочные решения, кроме влияния на качество выполнения задачи, могут привести к потерям не только дорогостоящей специальной техники, но также к гибели личного состава.

Первичную подготовку к действиям в нештатных ситуациях курсанты должны получить еще в вузе на практических занятиях [1]. Владение такими компетенциями выпускники вуза приобретают уверенность в действиях при возникновении различных нештатных ситуаций.

Целью данной статьи является разработка методических приемов формирования у курсантов практических навыков выполнения задач по предназначению при возникновении в изменяемой организационно-технической системе нештатной ситуации.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Нештатные ситуации разнообразны по характеру, причине возникновения, степени влияния на выполнение специальных задач. Также разнообразны в каждом конкретном случае решения технических расчетов организационно-технической системы по устранению нештатных ситуаций.

Вместе с тем, алгоритм действий технических расчетов по снижению или устранению влияния нештатной ситуации на выполнение целевой задачи, как правило, должен быть оди-

наков. Этим алгоритмом личный состав технического расчета обязан уверенно владеть при выполнении задач по предназначению.

Учитывая данное обстоятельство, для достижения поставленной в статье цели, в качестве организационно-технической системы, подверженной возникновению нештатных ситуаций, рассмотрим наземный комплекс управления (НКУ) космическими аппаратами (КА).

Нештатную ситуацию будем определять как совокупность обстоятельств, обусловленных действием возмущающих факторов, приводящих к недопустимому изменению состояния наземного комплекса управления, его функциональных возможностей и способности выполнения запланированных операций управления КА.

Нештатная ситуация может возникнуть при воздействии различных факторов. Наиболее известные из них, способствующие созданию нештатных ситуаций при подготовке и проведении сеансов управления КА и, как следствие, влияющие на выполнение запланированной программы сеанса, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень наиболее вероятных факторов, создающих нештатные ситуации

Факторы, создающие нештатную ситуацию	Влияние нештатной ситуации на КА и НКУ
Нарушение установленного документами технологического процесса управления КА	Предпосылка к возникновению аварийного состояния КА; невыполнение программы полета КА; создание угрозы жизни экипажу пилотируемого КА
Отказы средств НАКУ, связи, электроснабжения, влияние источников радиоизлучения соседей. Сбой в программном обеспечении средств АСУ	Нарушение технологического цикла управления КА; искажение приема и обработки телеметрической и траекторной информации; отсутствие квитирования при выдаче на КА командно-программной информации; нарушение связи с центром управления полётом (ЦУП) КА
Геофизическое состояние атмосферы	Влияние скорости ветра и низких температур на работу антенн радиотехнических систем (РТС); влияние изменения магнитного поля Земли на обмен информацией между КА и НКУ

Реальный перечень факторов, создающих нештатные ситуации, значительно больше приведенного в табл. 1. Причинами нештатных ситуаций являются также: «человеческий фактор», недостатки организации всестороннего обеспечения сеанса управления КА, недостаточная компетентность и слаженность взаимодействующих технических расчетов и др.

При возникновении нештатной ситуации, не предусмотренной инструкциями, технические расчеты действуют, полагаясь на свой опыт, компетенции, знания по специальной подготовке, что не исключает совершаемых ими ошибок [4]. Приведем пример подобных действий одного расчета радиотехнической системы (РТС), передающей команды на борт КА.

Программой сеанса управления КА, проводимого данным расчетом РТС, предусматривалась выдача команды на отделение от КА и спуск в заданный район на Земле блока с научно-исследовательской информацией. За три минуты до начала сеанса управления при выполнении операции наведения антенны РТС в начальную точку целеуказаний возникла неисправность антенно-поворотного устройства. Учитывая дефицит времени на выяснение и устранение причин неисправности, начальник расчета РТС принял решение осуществлять

поворот антенны по координатам целеуказаний вручную, поднявшись к поворотному механизму антенны на крышу технического здания. Номера расчета РТС, оставшиеся на посту в техническом здании, голосовой связью диктовали ему целеуказания для поворота антенны в соответствии с временем выдачи команд. Все команды были выданы своевременно. Отделяемый блок успешно приземлился. После окончания сеанса в ЦУП КА были представлены доклады о нештатной ситуации и принятых действиях.

Основные ошибки в решении начальника расчета РТС следующие:

- отсутствие немедленного доклада в ЦУП КА о нештатной ситуации;
- погрешность в точности ручного наведения антенны и времени выдачи команд на спуск отделяемого блока могла привести к его потере.

Приведенный пример подтверждает необходимость обучения курсантов владению установленными документами алгоритмом при выполнении задачи в условиях нештатной ситуации.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПО ОБУЧЕНИЮ КУРСАНТОВ ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ И ДЕЙСТВИЯМ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАЧ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

Методические приемы по обучению курсантов действиям в нештатных ситуациях, возникающих в организационно-технических системах, рассмотрим на примере действий расчетов НКУ КА по управлению КА. На основании практического опыта организации управления КА, а также руководящих документов, предлагается следующий алгоритм действий расчетов при возникновении нештатной ситуации в НКУ КА (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм действий расчетов НКУ по управлению КА в нештатной ситуации

На данном рисунке представлен момент возникновения нештатной ситуации во время проведения сеанса управления КА, а также возможные варианты действий расчетов ЦУП и НКУ по ее устранению, соответствующие требованиям руководящих документов. Использование предлагаемого алгоритма действий расчетов позволяет сконцентрировать аналитические усилия всех звеньев НКУ КА на выработке с максимальной оперативностью решения по устранению нештатной ситуации и усилению контроля за создавшими ее факторами.

Предложенный алгоритм, устанавливающий порядок действий расчетов управления КА в нештатных ситуациях, целесообразно отработать на практических занятиях с курсантами на учебном командном пункте (УКП) обучающей кафедры.

С этой целью на учебном командном пункте кафедры разворачиваются посты двух расчетов НКУ (1-го и 2-го), а также пост оперативного дежурного (ОД) ЦУП.

В начале занятия обучающиеся распределяются преподавателем на посты УКП в количестве от одного до трех человек на одно автоматизированное рабочее место (АРМ) в зависимости от состава учебных групп (рис. 2).

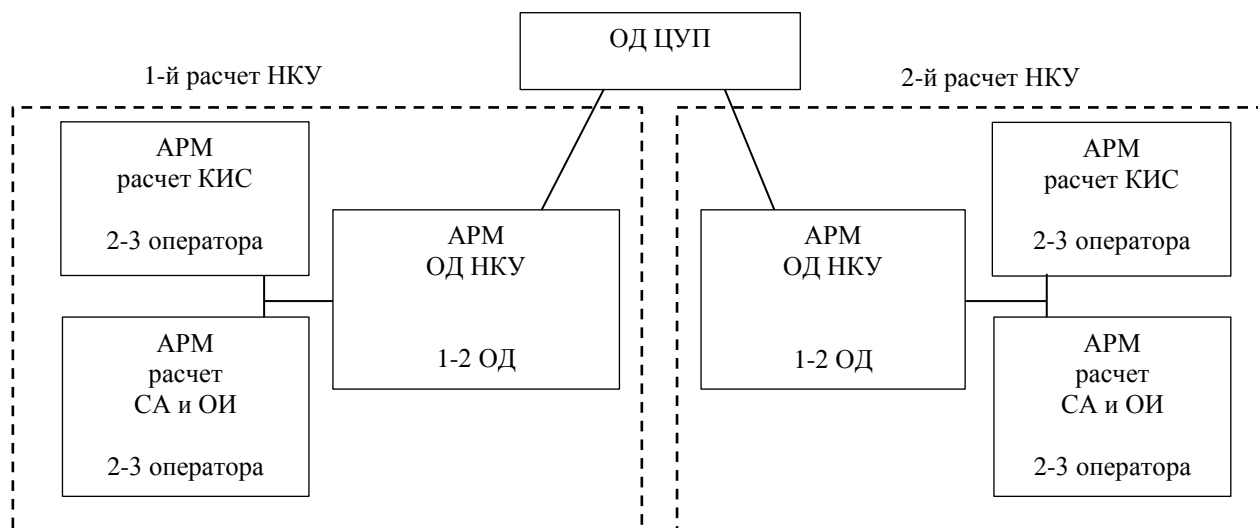


Рис. 2. Схема распределения обучающихся на УКП для проведения сеанса управления КА: ОД НКУ – оперативный дежурный наземного комплекса управления; КИС – командно-измерительная система; СА и ОИ – средства автоматизации и обработки информации

Независимо от количества запланированных на практическое занятие часов, его целесообразно проводить в два этапа, используя различные методические приемы. На первом этапе обучающиеся отрабатывают на автоматизированных рабочих местах по заданному сценарию весь процесс предсеансной подготовки и проведения сеанса управления КА в штатном режиме [2]. Так как занятие по данной теме проводится впервые, учебной целью первого этапа является уяснение содержания технологических мероприятий предсеансной подготовки, а также операций по выдаче на КА командно-программной информации, приему телеметрической информации, ее обработке и передаче результатов в ЦУП.

На втором этапе отрабатывается повторно такой же сценарий подготовки и проведения сеанса управления КА, но усложненный нештатными ситуациями.

Чтобы обучающимся были понятны ожидаемые от них решения и действия, необходимо в начале второго этапа ознакомить их с алгоритмом действий расчета при возникновении нештатной ситуации (см. рис. 1). Особое внимание при этом должно быть уделено регистрации обучающимися в «Журналах несения дежурства» содержания и времени возникновения нештатной ситуации, а также предполагаемой причины. Эта же информация по каналам связи должна быть доложена в ЦУП.

Содержание задаваемых преподавателем нештатных ситуаций организационного и технического характера должно соответствовать специальности, по которой обучается учебная группа. В этом случае они будут более понятны обучающимся, что необходимо для принятия решений, адекватных возникшей ситуации.

При проведении сеанса управления КА большое значение имеют фактор времени предсеансной подготовки и зона радиовидимости КА. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы решения обучающихся по устранению нештатной ситуации укладывались в рамки за-

данного временного интервала. С этой целью преподаватель может использовать программное обеспечение автоматизированных рабочих мест [3], которое позволяет: поддерживать в процессе сеанса непрерывную связь с ЦУП; изменять динамику учебной обстановки; вводить или устранять нештатные ситуации; имитировать аппаратные и программные сбои.

Это дает возможность применять в ходе занятия следующие методические приемы:

- контролировать своевременность и качество докладов обучающихся в ЦУП о нештатной ситуации согласно алгоритму (см. рис. 1);
- оценивать работу обучающихся по поиску на сервере локальной вычислительной сети оптимального решения по устранению нештатной ситуации;
- изменять продолжительность времени, располагаемого для принятия решения, в случае затруднения принятия обучающимися решения на устранение нештатной ситуации, а также на оказание помощи;
- использовать на занятии различные варианты нештатных ситуаций, которые соответствуют направлению и уровню подготовки обучающихся по их специальности;
- осуществлять коллективные обсуждения принятых обучающимися решений и содержания подготовленных в ЦУП докладов с предложениями по устранению влияния нештатных ситуаций на проведение сеансов управления КА.

Очень важно, чтобы на втором этапе практического занятия преподаватель соблюдал принцип обучения «от простого к сложному». Решая первую вводную, с несложной нештатной ситуацией, обучающийся должен из располагаемого времени уделить большую часть на выяснение ситуации, выработку предложений и представлению докладов согласно алгоритму, приведенному на схеме (см. рис. 1).

Действуя по этому алгоритму, он виртуально «подключает» к решению возникшей задачи коллектив должностных лиц расчетов иерархической структуры системы управления ЦУП и приобретает опыт действий в последующих аналогичных ситуациях.

Например, можно начинать практическую отработку вводных с несложных нештатных ситуаций в ходе сеанса управления, к числу которых относятся:

- вывод из строя аппаратуры связи;
- воздействие радиопомех на различных частотах;
- нарушение электропитания;
- неисправность различных КИС.

После заслушивания решений обучающихся и оценки выполненных ими действий, необходимо провести частный разбор: указать на допущенные ошибки и пути их устранения, на ведение служебной документации, учет фактора времени при принятии решений. В случае неудовлетворительной оценки действий обучающихся, следует провести повторную тренировку.

При уверенных действиях обучающихся можно, после частного разбора, переходить к более сложным нештатным ситуациям, подобным в приведенном ранее примере, не изменяя сценария подготовки и проведения сеанса управления КА.

Рассмотренные методические приемы обучения курсантов управлению КА в нештатных ситуациях будут эффективны только при наличии у них достаточных компетенций по специальным дисциплинам. Это обстоятельство является причиной необходимости проведения практических занятий по данной тематике на завершающем этапе обучения в вузе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный авторами методический подход с использованием технических средств обучения учебных командных пунктов кафедры позволяет сформировать у курсантов устойчивые навыки в выполнении специальных обязанностей в нештатных ситуациях, возникаю-

щих в любых организационно-технических системах, с которыми могут встретиться выпускники вуза при выполнении задач по предназначению.

Проведенный в статье анализ позволил выявить основные факторы, являющиеся первопричиной нештатных ситуаций в организационно-технических системах, на примере действий расчетов НКУ КА по управлению КА. В нештатных ситуациях от расчетов НКУ требуется действовать не только по инструкции, но также использовать нестандартные интеллектуальные приемы поиска решений, направленные на своевременное выполнение задачи по предназначению, не нарушая требований инструкций.

Данные методические приемы позволяют осуществлять как индивидуальный поиск возможного решения, так и коллективное обсуждение вариантов решений во время оперативной паузы под руководством преподавателя. Для закрепления полученных навыков целесообразно использовать также метод тренировки.

Перечисленные методические приемы, как показали результаты занятий, способствуют достижению поставленной в статье цели.

Список используемых источников

1. О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации от 29 декабря 2012 г.»: приказ МО РФ № 670 от 15.09.2014 г. – М., 2014.

2. *Ерофеев А.В., Кукушкин М.А.* Методические рекомендации по проведению практического занятия № 10. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – с. 10.

3. *Ерофеев А.В., Покидов Л.В, Кацик В.О.* Методика применения специального программного комплекса учебного командного пункта для формирования у обучающихся профессиональных компетенций по тактико-специальной подготовке // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 365–369.

4. *Багрецов С.А., Львов В.М., Колганов С.К.* Диагностика и прогнозирование функциональных состояний операторов в деятельности // Вопросы проектирования и применения. – М.: Радио и связь, 2000. – С. 20–35.

М.К. Маркина;
И.В. Осипова;
И.В. Сахно,
доктор технических наук, профессор

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ, ПРИМЕНЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ СРЕДСТВ ОБРАЗЦОВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК

В статье рассматриваются особенности построения и применения учебно-тренировочных средств с учетом специфики космических систем и средств. Приведена классификация, типовая структура учебно-тренировочных средств. Сформулированы предложения по реализации учебно-тренировочных средств с функциями моделирования и показатели эффективности.

Ключевые слова: учебно-тренировочное средство, тренажер, программно-методический комплекс, тренажерный комплекс, территориально-распределенные объекты ВВСТ КВ.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективным способом постоянного поддержания и совершенствования умений и навыков военных специалистов является обучение с использованием современных учебно-тренировочных средств (УТС). Основная функция УТС – обучение, реализация информационной (функциональной) модели объекта ВВСТ и воспроизведение его взаимодействия с внешней средой.

Современные образцы вооружения космических войск (КВ) отличает, прежде всего, высокая техническая сложность, территориальная распределенность применяемых систем и средств, длительный и непрерывный во времени технологический цикл управления. Указанные особенности выявляют проблемную ситуацию в части построения и реализации эффективных и технологически современных УТС для космических систем и средств (КСС). Однако действующая нормативная база, регламентирующая процессы разработки, создания и применения УТС не только не учитывает в полной мере особенности построения и применения КСС, а так же не берет в расчет имеющиеся особенности подготовки военных специалистов, из которых потенциально комплектуются расчеты, несущие дежурство.

Следует отметить, что для рассмотрения особенностей построения, применения и направлений развития УТС необходимо разграничить понятия «УТС» и «тренажер».

Учебно-тренировочные средства УТС – специально организованный набор технических средств обучения, в том числе специализированных тренажеров, состав которого определяется конкретной целью подготовки военных специалистов.

Тренажер – техническое средство, предназначенное для профессиональной подготовки операторов системы «человек-машина» (СЧМ), отвечающее требованиям методик подготовки, реализующее модель СЧМ и обеспечивающее контроль качества деятельности обучаемого [1].

Несколько УТС могут быть объединены в учебно-тренировочный центр (УТЦ), который предполагает уже групповое обучение для слаживания расчетов в ходе проведения различного вида групповых занятий.

В соответствии с действующими внутриведомственными требованиями все современные образцы ВВСТ должны иметь УТС, не исключение и сложные территориально-распределенные системы (ТРС) КВ. Так, например, ГОСТ РВ 15.201-2003 требует наличия в ТТЗ на опытно-конструкторскую разработку (ОКР) отдельного раздела требований к УТС,

не подразумевающий, однако, наличия и достижения показателей эффективности обучения (применения УТС), что является необходимым при постановке целей обучения военных специалистов [2].

Как отмечалось ранее, существуют следующие особенности УТС ТРС КСС:

1. Технологическая сложность обеспечения соответствия УТС функционалу, составу и временному масштабу применения ТРС номенклатуры КВ, которая характеризуется наличием:

- территориальной распределенности составных частей объектов ВВСТ КВ;
- необходимости одновременного привлечения для работы на объектах КВ специалистов в различных областях;
- сложного и длительного во времени технологического цикла применения объектов КВ;
- большого количества режимов функционирования КСС.

2. При создании УТС могут отмечаться (присутствовать):

- недостаточные сведения о показателях эффективности создаваемого УТС и воспроизводимых КСС;
- большая вариативность способов применения КСС;
- противоречия в нормативной базе, определяющей особенности применения и эксплуатации;
- технологическая и/или техническая сложность имитации и воспроизведения отдельных режимов работы КСС и их системных характеристик в масштабах УТС;
- необходимое количество и обоснование мест размещения УТС.

Сегодня нет четкого, единого понимания структуры и состава УТС ТР КСС, способного эффективно решать задачу обучения, подтверждения и развития компетенций обучающихся.

В этой связи современные поставляемые в войска УТС, как правило, отвечают узкой цели обучения, вырабатывают навыки, не обеспечивая при этом понимания всего технологического цикла, осознания своего «места» в технологической цепочке применения КСС. Для ТРС объектов ВВСТ КВ существует также целый ряд специфических особенностей, которые должны быть учтены при проектировании и эксплуатации УТС. Создание тренировочных средств в недостаточной степени регламентировано, что приводит к смешению понятий «тренажер» и «УТС» и недостаточной проработке и унификации структуры УТС, состава и методического обеспечения.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ТИПОВАЯ СТРУКТУРА УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ СРЕДСТВ

С учетом современных тенденций развития и применения, УТС должно быть, в определенном смысле, «цифровым аналогом» соответствующего объекта ВВСТ, которое решает поставленные задачи по аналогии с самим объектом только в уменьшенном масштабе и с учетом сокращенного технологического цикла применения.

Направление обучения на УТС определяется функциями и задачами самого образца ВВСТ, и современные УТС характеризуются широким применением программных средств имитации и развитым специальным программным обеспечением.

В военном деле, при организации эксплуатации и применения высокотехнологических образцов вооружения, заинтересованность в высококвалифицированном персонале высока, так как риск от непрофессиональных действий велик и может приводить к значительным экономическим убыткам и существенному снижению боевого потенциала подразделений. Поэтому обучение на современных и эффективных УТС является актуальной и необходимой задачей на всех этапах подготовки военных специалистов.

Далее кратко рассмотрим принятую классификацию УТС. Обзор современных УТС и изучение литературы [3–6] позволил выделить основные классификационные признаки УТС. Классификация УТС представлена в табл. 1.

Таблица 1

Классификация УТС

Классификационный признак УТС	Типы УТС	Описание
Наличие модели, с помощью которой осуществляется симуляция объекта или его функций	Статические	Без моделирования процессов эксплуатации и применения
	Динамические	Наличие математической или имитационной модели функционирования и физических процессов, характерных для образца
Количество обучающихся	Индивидуальные	Тренажер для подготовки одного обучающегося
	Групповые, комплексные (тренажерные комплексы)	Для подготовки нескольких специалистов и решения общей задачи, для боевого слаживания расчетов
Размещение	Классные (аудиторные)	Расположены стационарно
	Полевые	Мобильные (перебазируемые)
Реализация метода обучения	Традиционные тренажеры	Обеспечивающие отработку умений и навыков (на образцах)
	Компьютерные симуляторы	Имитаторы управления каким-либо процессом или аппаратным средством. Программные и аппаратные средства, создающие впечатление реальной действительности, отображая часть реальных явлений и свойств в виртуальной среде
	Комбинированные	Совмещающие традиционный тренажер и компьютерный симулятор
Наличие свойств адаптации под новые условия применения и эксплуатации	Адаптивные	Универсальные, с возможностью внесения изменений в имитационную модель
	Неадаптивные	Без возможности изменения заложенных функций
Состав моделируемых факторов, присущих деятельности оператора	Комплексные	Помимо алгоритмов деятельности моделируется совокупность факторов военно-профессиональной среды
	Процедурные	Моделируется только алгоритм определенного вида деятельности
	Для психологической подготовки	Для поддержания требуемого уровня сформированных профессионально-психологических качеств

Как известно, при организации и проведении практической подготовки, в зависимости от количества взаимодействующих обучаемых в образовательном процессе, используются две основные формы обучения: индивидуальная и групповая (комплексная).

Индивидуальная подготовка предусматривает самостоятельное или под руководством преподавателя (инструктора) освоение умений и приобретение навыков обучающимися по выполнению определенных функций (операций) в соответствии с программой подготовки (руководством по применению или эксплуатационной документацией) для достижения поставленных целей обучения.

Групповая подготовка проводится с целью отработки действий обучающихся в составе расчета, приобретения навыков совместных действий в составе расчета, что особенно актуально для УТС КСС. Такая форма подготовки применяется также для отработки взаимодействия нескольких групп при решении совместных задач, и реализуется в виде тренировок, групповых упражнений, учений и военных игр с использованием автономного, группового и комплексного режимов работы соответствующих тренажеров в составе УТС.

Подготовка персонала должна учитывать состояние знаний в конкретной предметной области (входной контроль знаний), а также должностные требования, предъявляемые к специалисту. В связи с этим подготовка должна проходить по следующим направлениям:

- развитие компетенций выпускников вузов;
- развитие компетенций при вертикальном перемещении внутри структурного подразделения;
- развитие компетенций при горизонтальном перемещении между структурными подразделениями [7].

Следует отметить, что подготовку военных специалистов для ТРС КВ или КСС с использованием УТС целесообразно рассматривать как систему подготовки нескольких расчетов (специалистов) с учетом специфики построения и применения КСС.

В зависимости от назначения и особенностей применения объекта ВВСТ разрабатывается конкретный вид УТС и задается его функционал с учетом минимизации соответствующих рисков эксплуатационного характера со стороны персонала.

С учетом существенной территориальной распределенности инфраструктуры КСС, сложности и многоуровненности информационного взаимодействия при реализации технологического цикла управления обучающимся зачастую сложно или невозможно на требуемом уровне осознать свою роль и место в системе эксплуатации. В этой связи с целью повышения эффективности обучения персонала при создании УТС КСС должно широко использоваться моделирование не только образца ВВСТ в составе КСС, но и КС в целом.

В частности, в составе такого УТС целесообразно широко использовать следующие технологии моделирования:

- технологии моделирования применения КСС с возможностью оценки базовых показателей эффективности в составе УТС, в том числе в условиях внешних воздействий на инфраструктуру моделируемой системы;
- технологии разработки моделей внешней обстановки, среды и функционирования составных частей КСС;
- технологии создания виртуальных рабочих мест обучающихся и систем визуализации обстановки;
- технологии использования реальных данных в составе УТС;
- технологии автоматизации деятельности преподавательского состава (в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта);
- технологии комплексирования модулей [8].

Исходными данными для разработки УТС ТРС КСС могут являться:

- оперативно-тактические требования к КС или КК;
- общие технические требования (при наличии);
- квалификационные требования к военным специалистам, входящим в состав расчетов;
- проект модели эксплуатации образца (при наличии);
- проект руководства по применению КСС (при наличии);
- проект эксплуатационной документации КСС;
- проект реализуемой (планируемой) схемы связи;
- перечень показателей эффективности применения КС и КК;
- протоколы информационно-логического взаимодействия.

В ходе создания УТС ТРС КСС возможно использование различных структур построения на базе отдельных УТС, которые интегрируются (объединяются) с помощью локальной вы-

числительной сети (ЛВС) с другими, образуя учебно-тренировочный комплекс (УТК). Схема интеграции разных УТС в единый комплекс представлена на рис. 1.

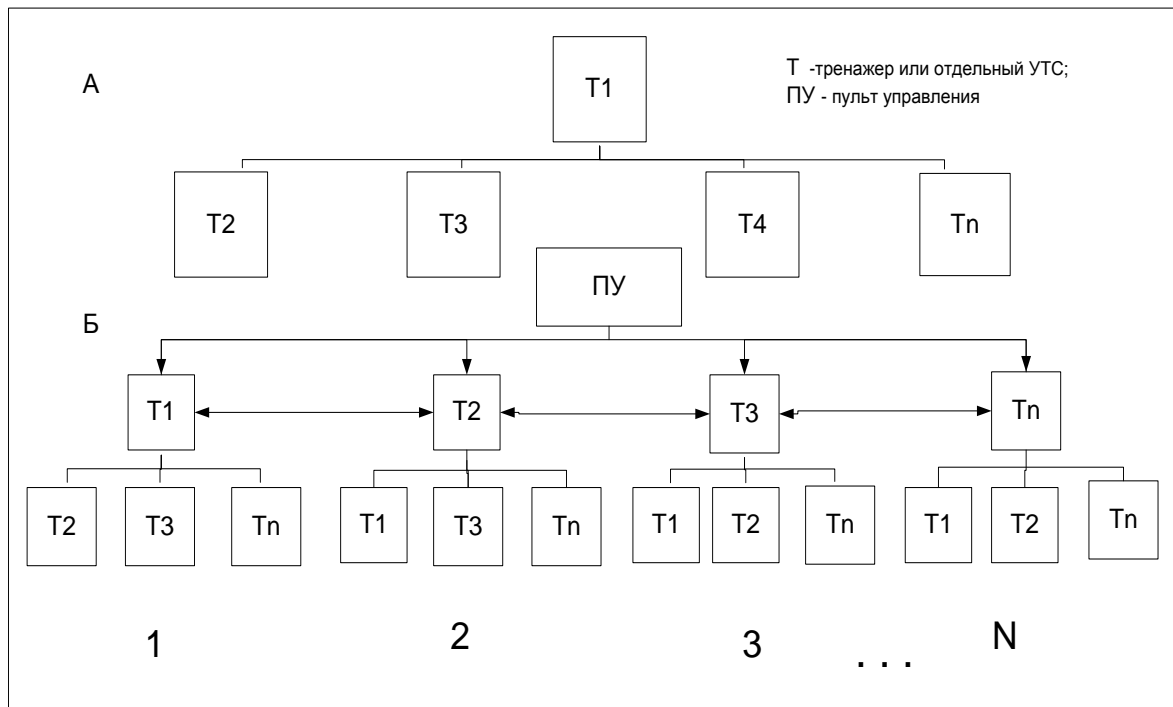


Рис. 1. Схемы возможной интеграции УТС (тренажеров) при организации взаимодействия и формирования УТК ТРС КСС

Именно за счет объединения УТС составных частей в единый комплекс и обеспечения их информационного взаимодействия можно более полно «воспроизвести», при необходимости, ключевые особенности эксплуатации и применения ТРС КСС. Реализация в составе объединенного УТС (рис. 1) реальных протоколов информационно-логического взаимодействия между составными частями, позволит также воспроизвести приближенную к реальности информационную модель функционирования КСС и более корректно отработать взаимодействие расчетов при организации информационного обмена с привязкой, например, к этапам реального цикла управления.

Наиболее целесообразно типовой УТС условно разделить на четыре составные части (элемента), к каждой из которых предъявляются свои специфические требования (при необходимости). Основные элементы типового УТС приведены на рис. 2.

Методический комплекс в составе УТС может включать:

- учебные программы и тематические планы;
- плакаты (стенды);
- электронные учебные пособия и/или иную учебную литературу;
- учебные фильмы или поясняющие видео-инструкции;
- методики (проведения испытаний, настройки, юстировки, калибровки и т. д.);
- электронные описания алгоритмов функционирования в разных режимах;
- электронную документацию (руководства по применению, ЭД, схемы связи и т. д.);
- исходные данные для проведения практических занятий;
- справочную информацию и нормативные документы.

Аппаратный комплекс является технической основой типового УТС и может включать в свой состав специализированную техническую часть, необходимую для отработки навыков, которые не могут быть по тем или иным причинам воспроизведены компьютерными средствами.



Рис.2. Типовая структура и состав UTC КСС

Аппаратный комплекс может включать в состав:

- тренажерные системы отдельных составных частей КСС;
- имитаторы составных частей КСС;
- унифицированные ПЭВМ (аналогичные по характеристикам и исполнению с используемыми в реальных образцах);
- отдельные элементы КСС (элементы реальных ВВСТ);
- средства измерений (при необходимости);
- средства отображения и печати.

Очевидно, что состав и характеристики аппаратного комплекса во многом определяют такую характеристику UTC, как пропускная способность UTC по числу обучающихся и производительность UTC, характеризуемая временем отработки типовых методик (сценариев) обучения расчетов при проведении различного вида занятий.

Инфотелекоммуникационная составляющая UTC обеспечивает информационное взаимодействие внутри UTC и информационно-логическое взаимодействие с другими UTC КСС (например, при проведении групповых занятий, КШТ и КШУ).

Инфотелекоммуникационная составляющая UTC должна включать в свой состав:

- протоколы информационно-логического взаимодействия (ИЛВ) (описания и их компьютерные модели);
- сетевую инфраструктуру;
- средства защиты информации и администрирования.

Программно-алгоритмический комплекс в составе UTC может содержать:

- общее программное обеспечение (ОПО), соответствующее действующим требованиям Минобороны России;
- базу данных (исходные данные для проведения занятий, тесты, результаты тестирования обучающихся, реальные данные испытаний для их использования в процессе обучения, база информационно-расчетных задач и моделей и т. д.);
- модуль конфигурации и управления UTC (МКУ UTC);
- специальное программное обеспечение (СПО) управления UTC;
- СПО реализации информационно-расчетных задач;
- СПО моделирования (модели);
- СПО тестирования UTC;
- СПО информационно-логического взаимодействия с другими UTC.

Использование описания УТС предлагаемой структуры позволит унифицировать подходы к их разработке и обеспечить их создание и совершенствование в отдельных НИОКР по созданию КСС с последующим объединением в УТК.

В рамках УТК основным фактором, позволяющим повысить качество подготовки специалистов для их успешного освоения предстоящей деятельности, является приближение тренировок к условиям максимально схожим с реальными в масштабах ТРС КВ ВКС.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ СРЕДСТВ ОБРАЗЦОВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК

Основной особенностью организации применения УТС систем и средств КВ при размещении его на базе вуза является необходимость сопряжения с электронной информационно-образовательной средой (ЭИОС), элементом которой и должен стать любой поставляемый УТС.

Кроме того, в силу технической сложности, территориальной распределенности, наличия сложных информационных связей систем и средств КВ создаваемое УТС (или УТК) должно реализовывать развитые функции моделирования ключевых этапов эксплуатации и применения воспроизводимого при помощи УТС образца ВВСТ КВ. Цель реализации указанной функции – обеспечить системность при освоении материала, а также при проведении групповых занятий и тренировок объективно оценить вклад уровня подготовки расчета в системные характеристики воспроизводимого на УТС средства и вклад каждого из элементов КСС в указанные характеристики, в том числе в условиях меняющейся внешней обстановки.

С точки зрения возможности «встраивания» УТС в ЭИОС вуза последний должен отвечать требованиям, предъявляемым к ЭИОС, введенным указаниями Министра обороны Российской Федерации.

Кроме того, введение в состав УТС функции моделирования позволит решить ряд дополнительных военно-прикладных задач, зачастую не относимых к задачам УТС:

- отработку новых способов применения систем и средств КВ;
- отработку и подтверждение эффективности новых алгоритмов действий номеров расчетов;
- обоснование направлений модернизации;
- уточнение и обоснование квалификационных требований к персоналу;
- оценку вклада в системные характеристики, в том числе вследствие действий персонала.

Возложение указанных задач на УТС систем и средств КВ вполне логично вследствие отмеченных выше особенностей последних, а также потому, что решение указанных задач с использованием реальных систем и средств, находящихся на боевом дежурстве, как правило, невозможно технически, либо не может быть реализовано из-за наличия проблем организационного характера.

В этой связи предлагается пересмотреть ряд функций возлагаемых МКУ УТС, входящих в состав программно-алгоритмического комплекса УТС.

МКУ УТС должен быть реализован как администрирующая программа определения (выбора) методов и способов обучения по выбранному типу (дистанционно, теоретически, практически и т. д.). МКУ должен в полной мере позволить организовать, спланировать и сконфигурировать весь процесс обучения – от выбора исходных данных и выбора сценария обстановки, заканчивая оценкой знаний обучающихся. МКУ представляет из себя иерархическую структуру функционально связанных программ, которые обеспечивают взаимодействие, ведение и комплексное решение информационно-расчетных программ обучения.

МКУ должен иметь возможность загрузки в УТС дополнительного информационного контента силами эксплуатирующей организации (без привлечения изготовителя/разработчика) в части исходных данных, методик и сценариев, а также в части выбора привлекаемых ИРЗ и характеристик информационного взаимодействия.

Кроме того, разработка и применение невозможны без определения показателей эффективности УТС КСС с учетом отмеченной выше специфики. Проработка показателей и методика их расчета должны быть проведены на этапе информационного обследования объекта, подлежащего оснащению УТС, до его проектирования и создания.

С целью оценки эффективности УТС и возможности ее контроля в течение всего жизненного цикла изделия целесообразно ввести единую систему показателей, в соответствии с которой оценивать все разрабатываемые УТС систем и средств КВ в силу наличия их особой специфики.

В частности, эффективность УТС может быть оценена по следующим показателям:

- 1) времени, требуемому на выполнение программы обучения;
- 2) количеству воспроизводимых на УТС критических ситуаций (для этапов применения и эксплуатации);
- 3) количеству контрольных примеров и информационно-расчетных задач (моделей) реализованных в УТС;
- 4) количеству (проценту) воспроизводимых в УТС режимов функционирования (применения) ТРС КСС;
- 5) стоимости одного часа работы УТС при проведении отдельных видов занятий;
- 6) количеству персонала, привлекаемого для эксплуатации УТС;
- 7) удельным массово-габаритным характеристикам УТС;
- 8) балансной стоимости самого УТС (в том числе в процентном выражении относительно стоимости опытного образца);
- 9) степени соответствия УТС реализуемой в изделии модели эксплуатации (при наличии средства/системы);
- 10) поддержке функции моделирования применения систем и средств УТС и количеству сценариев моделирования;
- 11) степени соответствия УТС руководству по применению;
- 12) количеству УТС, с которыми может быть организовано информационное взаимодействие при проведении командно-штабных тренировок и командно-штабных учений;
- 13) количеству поддерживаемых в составе УТС имитационных компьютерных моделей системного уровня;
- 14) наличие возможности и количеству реализованных на базе УТС технологий искусственного интеллекта.

Данные показатели должны иметь численное выражение и должны быть разработаны методики их расчета, что позволит осуществлять взаимное сравнение УТС и придать им новое качественное значение в системе эксплуатации и применения.

Кроме того, в последствии возможно будет перейти к рассмотрению удельных показателей «эффективность/стоимость», используя комбинации «технических» показателей (1–4, 7, 9–14) и «стоимостных» (5, 6, 8). Причем, удельные показатели должны рассчитываться в динамике, т. е. в течение всего жизненного цикла УТС. Аналогичный подход может быть затем распространен и на оценки эффективности применения самих КСС.

На основании изложенного, сам процесс создания УТС КСС целесообразно завершать уже после проведения государственных испытаний изделия, с учетом их результатов и всех выявленных замечаний, а также доработок ЭД и уточнений модели эксплуатации. В этой связи УТС целесообразно не включать в состав изделия, принимать отдельной комиссией и присваивать отдельный десятичный номер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

УТС систем и средств КВ имеют выраженную специфику, которая учитывается разработчиками не в полной мере, что не позволяет отразить все необходимые функции объекта для успешного освоения предстоящей деятельности. Отсутствует единая система показателей эффективности УТС.

Для решения этих проблем предложенная в работе система показателей эффективности УТС систем и средств КВ может быть взята за основу, и в дальнейшем послужить опорой для разработки методик расчета описанных показателей. Предложена типовая структура и состав УТС систем и средств КВ.

Важнейшим направлением развития УТС систем и средств КВ является введение функции моделирования в программно-алгоритмический комплекс, что обеспечит:

- системность при освоении материала;
- повышение эффективности проведения групповых и практических занятий;
- возможность проведения оценки вклада в системные характеристики воспроизводимого УТС элемента КС в условиях меняющейся обстановки;
- отработку новых способов применения систем и средств КВ;
- обоснование направления модернизации;
- уточнение квалификационных требований к персоналу;
- оценивание вклада в системные характеристики, в том числе вследствие действий персонала.

Применение предлагаемого подхода к созданию УТС КСС позволит выстроить единую научно-техническую политику в области разработки и создания перспективных УТС систем и средств КВ с учетом отмеченной в работе специфики КС и КК.

Список используемых источников

1. ГОСТ 26387-84. Система «Человек-машина». Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2005. – 7 с.
2. ГОСТ РВ 15.201-2003. Тактико-техническое (техническое) задание на выполнение опытно-конструкторских работ. – М., 2004. – 36 с.
3. *Халин А.Ф.* Концепция развития комплекса учебно-тренировочных средств для освоения вооружения, военной и специальной техники // Программные продукты и системы. – 2018. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-razvitiya-kompleksa-uchebno-trenirovochnyh-sredstv-dlya-osvoeniya-vooruzheniya-voennoy-i-spetsialnoy-tehniki> (дата обращения: 25.11.2021).
4. *Валивач П.Е.* Состояние проблемы становления и использования современных технических средств обучения, их классификация и задачи дальнейшего использования // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2011. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-problemy-stanovleniya-i-ispolzovaniya-sovremennyh-tehnicheskikh-sredstv-obucheniya-ih-klassifikatsiya-i-zadachi-dalneyshego> (дата обращения: 27.11.2021).
5. *Белов В.В., Водиченков Д.А., Власов Н.Н.* Анализ принципов и российского опыта построения учебно-тренировочных средств // Cloud of science. – 2016. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-printsipov-i-rossiyskogo-opyta-postroeniya-uchebno-trenirovochnyh-sredstv> (дата обращения: 27.11.2021).
6. *Пахомов Е.С.* Методологические аспекты тренажерной подготовки специалистов ВМФ // Научно-деловая программа Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2019». Круглый стол «Методологические аспекты создания и использования тренировочных средств для подготовки органов управления и военных специалистов»: тезисы

докладов. Санкт-Петербург, 2019. – URL: http://www.swsys.ru/banners/mk_round_table_2019.pdf (дата обращения: 8.11.2021).

7. Инновационные технологии обучения в межведомственном цифровом образовательном кластере подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфотелекоммуникационных средств космического назначения / Е.А. Новиков [и др.] // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 261–270.

8. *Захаров В.Л.* Теория военно-морских тренажеров ВМФ как самостоятельная научная дисциплина // Научно-деловая программа Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2019». Круглый стол «Методологические аспекты создания и использования тренировочных средств для подготовки органов управления и военных специалистов»: тезисы докладов. Санкт-Петербург, 2019. – URL: http://www.swsys.ru/banners/mk_round_table_2019.pdf (дата обращения: 8.11.2021).

М.А. Сквazников*,

кандидат технических наук, доцент;

И.П. Торшина**,

доктор технических наук, доцент

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

**Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва.

ПРИНЦИПЫ СОХРАНЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОСТИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОСНОВНЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

В статье проведен анализ изменений в структуре основной профессиональной образовательной программы, обусловленных сменой государственных образовательных стандартов высшего образования по специальности «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения». Выявлены основные тенденции изменений архитектуры образовательных программ для подготовки специалистов в области сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли в течение последних десяти лет.

Сформулированы основные принципы сохранения фундаментальности профилей подготовки внутри специальностей высшего образования. Определены резистентные кардинальные характеристики основных образовательных программ. Показана возможность разработки разнопрофильных основных профессиональных образовательных программ в рамках одной специальности.

Ключевые слова: специальность высшего образования, образовательный стандарт, основная профессиональная образовательная программа, профиль подготовки, компетенция выпускника.

ВВЕДЕНИЕ

Разноплановые и динамичные изменения, характерные для современного общества, находят свое отражение в образовании, являющимся важнейшим социальным институтом государства. Реформирование образования привело, в первую очередь, к непрерывной смене версий образовательных стандартов. Между тем, образовательная система инертна по своей природе, и частые изменения структуры приводят к ее деградации. Поэтому разработчикам образовательной программы в целях обеспечения ее преемственности необходимо выделить ядро, определить основные структурные взаимосвязи, характеризующие профиль подготовки внутри специальностей высшего образования.

На основе проведенного анализа кардинальных характеристик образовательного процесса, устойчивых к внешним условиям, авторами были сформулированы основные принципы сохранения фундаментальности подготовки специалиста.

В структуре образовательной программы можно выделить две основные компоненты: базовую, регулируемую государством посредством образовательного стандарта, и вариативную, формируемую участниками образовательных отношений – вузами, сообществами работодателей и др.

С переходом к компетентностной модели образования основной центр тяжести – результаты освоения основной образовательной программы – был смещен от учебных дисциплин с присущими им результатами обучения, представленными знаниями-умениями-навыками, к разнородным компетенциям. При этом общекультурные компетенции (в последней версии федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) – универсальные компетенции) как правило были общими для уровня либо области образования. Общепрофессиональные компетенции являются специфичными для укрупненных групп специальностей и направлений подготовки. И только профессиональные компетенции отражают специфику подготовки специалиста. Поэтому для сохранения фундаментальности профиля подготовки

специалиста необходимо создать условия для преемственности комплекса профессиональных компетенций при смене ФГОС.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СМЕНОЙ ФЕДЕРАЛЬНЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ

ФГОС высшего образования третьего поколения нормативно закрепили компетентностную модель образовательного процесса. Компетенции, как гомогенная совокупность знаний, умений, навыков и личностных качеств человека, представляют собой результаты освоения основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) [1].

Современные образовательные стандарты позволяют реализовывать различные специализации (направления) подготовки. Так, образовательный стандарт по специальности 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» включает четыре специализации, которые со своим набором профессионально-специализированных компетенций формируют вариативную часть образовательной программы и позволяют адаптировать подготовку специалистов к требованиям работодателя [2, 3].

Современные образовательные стандарты предоставляют вузу право самостоятельно определять виды профессиональной деятельности выпускников, реализуемые в ОПОП в соответствии с требованиями заказчика подготовки кадров, а также комплекс учебных дисциплин и практик, обеспечивающих формирование требуемых компетенций [4].

В соответствии с ФГОС по специальности 12.05.01 выпускники могут осуществлять профессиональную деятельность в сферах научных исследований; эксплуатации, проектирования, конструирования и сопровождения производства систем специального назначения; обороны и безопасности государства; правоохранительной деятельности [5].

Вуз самостоятельно определяет профессиональные компетенции на основе обобщенных трудовых функций, закрепленных в профессиональных стандартах [6]. Формирование профессиональных компетенций возможно также на основе форсайт-анализа профессионально-важных качеств и требований, предъявляемых работодателем к выпускникам.

В федеральных государственных образовательных организациях, обучающих специалистов в интересах Министерства обороны РФ, профессиональные компетенции определяются в соответствии с установленными заказчиком данной подготовки квалификационными требованиями.

Для оценивания результатов освоения образовательной программы используются «индикаторы достижения компетенции», которые являются показателями качества освоения компетенций выпускником на различных этапах образовательного процесса и должны быть измеряемы с помощью фонда оценочных средств. Разработчик индикаторов должен ориентироваться на трудовые функции соответствующего профессионального стандарта или на квалификационные требования заказчика подготовки.

Динамика изменений количественного состава профессиональных компетенций основной образовательной программы по специальности 12.05.01 при различных версиях ФГОС представлена на рис. 1.

Анализ изменений в структуре профессиональных компетенций позволяет сделать следующие выводы:

- 1) при переходе к последующим версиям ФГОС проходило сокращение количества профессиональных компетенций за счет их интеграции и выделения приоритетных направлений подготовки специалиста;

- 2) произошел переход от универсальности ОПОП, характерных для первых версий ФГОС, охватывающей широкий диапазон профессиональных компетенций, к узкоспециали-

зированной направленности – ориентированной, в основном, на информационно-аналитический вид деятельности.

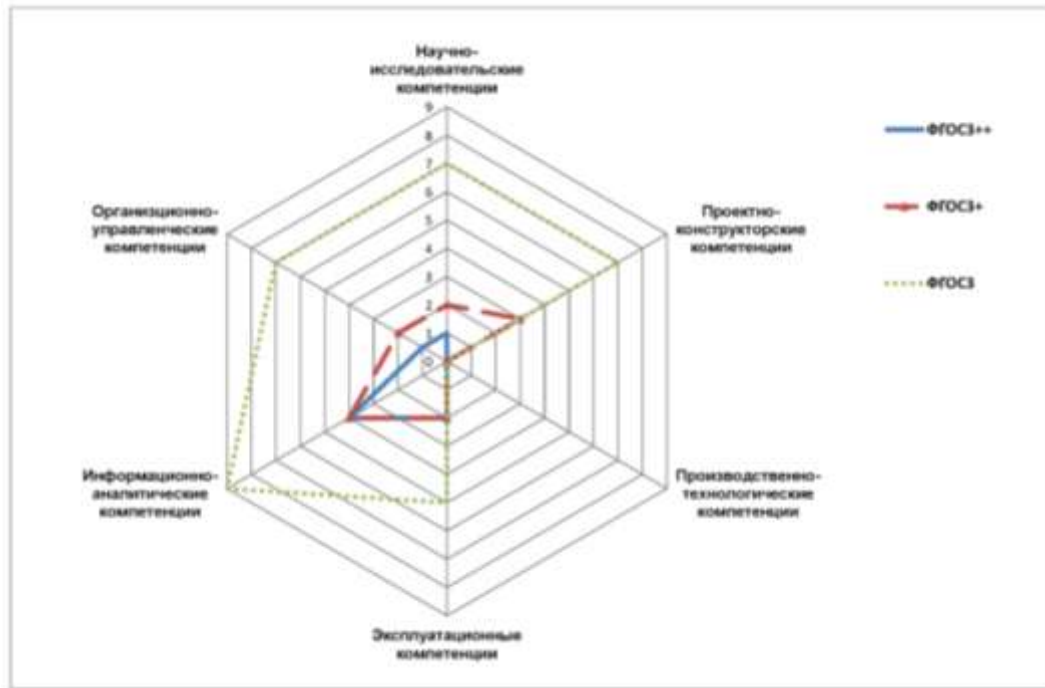


Рис. 1. Профессиональные компетенции ОПОП по специальности 12.05.01

Был проведен анализ эволюции структуры ОПОП по специальности 12.05.01 в части формирования профессиональных компетенций по различным видам деятельности за последние 10 лет.

На рис. 2 представлена диаграмма распределения объема программ учебных дисциплин (в зачетных единицах), которые формируют профессиональные компетенции по проектно-конструкторской (ПРК), организационно-управленческой (ОУ), эксплуатационной (Э), научно-исследовательской (НИ) и информационно-аналитической (ИА) видам деятельности.

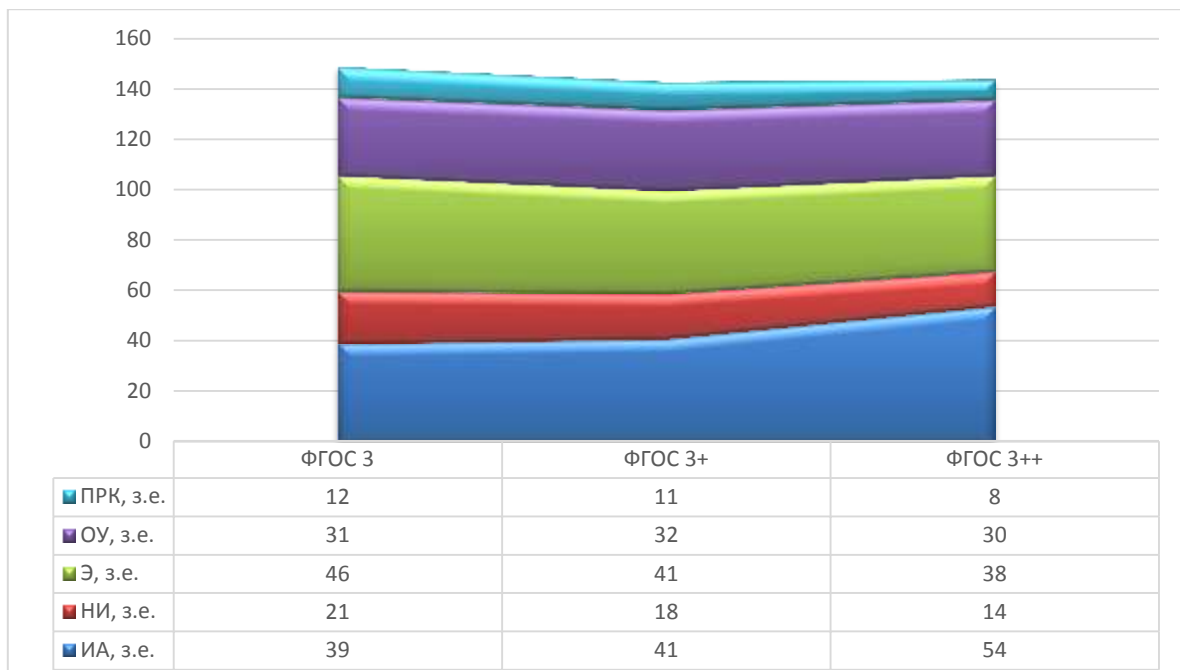


Рис. 2. Распределение объема программ учебных дисциплин по видам деятельности

Результатом анализа диаграммы явились следующие выводы:

- 1) объем программ учебных дисциплин, формирующих профессиональные компетенции, за последние 10 лет практически не изменился и составляет около 50 % от общего объема ОПОП;
- 2) объем трудозатрат на формирование информационно-аналитических, эксплуатационных и организационно-управленческих компетенций приходится 80 % трудозатрат;
- 3) уменьшение объема учебного времени на развитие проектно-конструкторских и научно-исследовательских компетенций составило около 30 %.
- 4) объем дисциплин, формирующих организационно-управленческие и информационно-аналитические компетенции, вырос соответственно на 10 и 20 %.
- 5) несмотря на значительные изменения в стандартизации образования, основная образовательная программа изменилась не столь кардинально. Это объясняется двумя факторами:
 - здоровой консервативностью и положительной резистентностью образовательной системы, представляющей совокупность профессорско-преподавательского состава, методологий, научных школ и рабочих программ;
 - наличием заказчика подготовки, который в лице Министерства обороны РФ регулирует образовательный процесс квалификационными требованиями. При этом структура подготовки на уровне распределения объема образовательных программ по видам деятельности в течение последних 10 лет не претерпела существенных изменений.

РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПОДГОТОВКИ ВНУТРИ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

В ОПОП задекларированы цели, задачи и планируемые результаты ее освоения, содержание, формы организации образовательного процесса, а также нормативные требования к ее реализации. Все образовательные организации разрабатывают ОПОП в соответствии с ФГОС ВО и обязаны актуализировать ее с учетом научного и социально-культурного прогресса общества (рис. 3) [7].

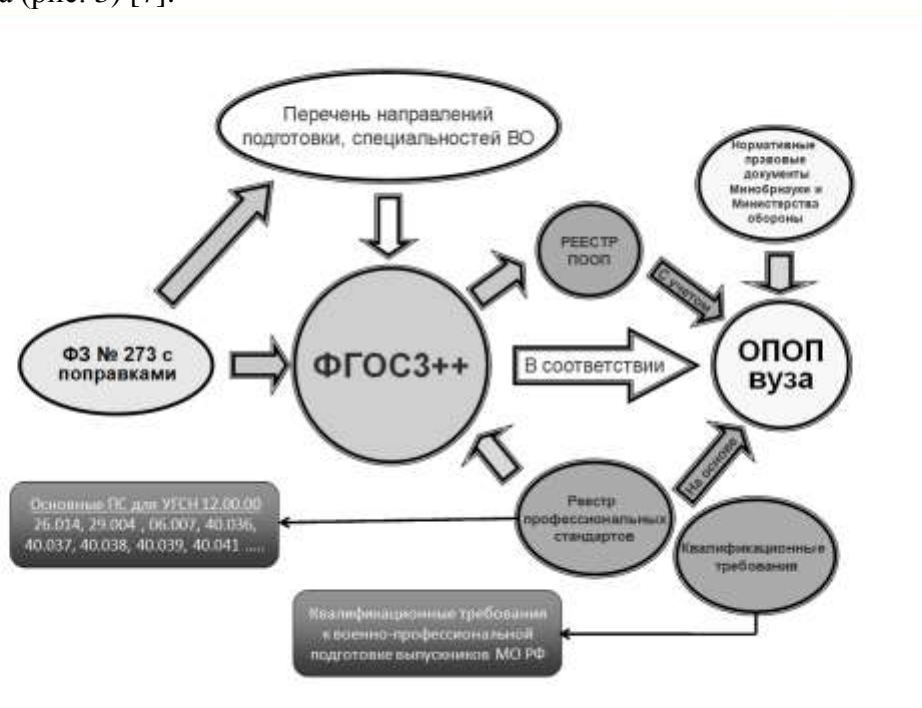


Рис. 3. Технология разработки ОПОП

ОПОП включает как обязательные документы (учебный план, календарный учебный график, рабочие программы дисциплин (модулей) и практик), так и вариативные учебно-методические материалы, перечень которых определяется вузом.

Разработчик ОПОП должен руководствоваться утвержденными ФГОС и вправе использовать как проекты, так и утвержденные варианты примерных основных образовательных программ (ПООП). При этом примерная программа в целом и отдельные ее элементы не являются нормативно обязательными для включения в ОПОП.

Приказом Минобрнауки от 8 февраля 2021 года № 84 были внесены изменения в образовательные стандарты высшего образования, в соответствии с которыми дисциплины, формирующие общепрофессиональные компетенции, отнесены к обязательной части основной образовательной программы. При этом, дисциплины, формирующие профессиональные и универсальные компетенции, могут включаться как в обязательную, так и в вариативную часть ОПОП (рис. 4).



Рис. 4. Архитектура ОПОП

Передача функции формирования профессиональных компетенций образовательным организациям предоставляет им возможность разработки образовательных программ различного профиля в рамках одной специальности. Профиль образовательной программы определяется требованиями заказчика подготовки, востребованностью специалиста с заданной квалификацией на рынке труда.

Возможность оперативного внесения изменений в состав и содержание профессиональных компетенций позволяет вузу оперативно реагировать на изменения внешних условий, в том числе своевременно выполнять требования работодателя. В то же время, ядро ОПОП должно быть относительно стабильным, обеспечивать ее преемственность.

На основе проведенного анализа образовательных программ, разработанных по одной специальности для различных версий государственных образовательных стандартов, выявлены следующие резистентные кардинальные характеристики:

- 1) трудозатраты (объем образовательной программы) на формирование профессиональных компетенций;
- 2) структура и относительная величина трудозатрат на формирование профессиональных компетенций по видам деятельности;
- 3) динамика изменений профессиональных компетенций в различных версиях государственных образовательных стандартов.

Для разработчиков основных образовательных программ сформированы следующие основные принципы сохранения фундаментальности профиля подготовки специалиста.

1. Сохранение удельного веса ядра профиля подготовки специалиста. Трудозатраты на формирование профессиональных компетенций не должны быть меньше 50 % от общего объема ОПОП.

2. Специализация профиля подготовки специалиста. Трудозатраты на формирование профессиональных компетенций по тем видам деятельности, которые определяют профиль специалиста, не должны быть менее 70 % от их общей величины.

3. Стабильность структуры профиля подготовки специалиста. Изменение величины трудозатрат на формирование профессиональных компетенций по определенному виду деятельности вследствие перехода к новой версии образовательного стандарта должно находиться в пределах 25 % от первоначального значения.

Примером использования ФГОС по одной специальности для разработки разнопрофильных ОПОП служат образовательные программы, разработанные Военно-космической академией имени А.Ф. Можайского (ВКА) и Московским государственным университетом геодезии и картографии (МИИГАиК) по специальности 12.05.01. Распределение профессиональных компетенций данных ОПОП представлено на рис. 5.

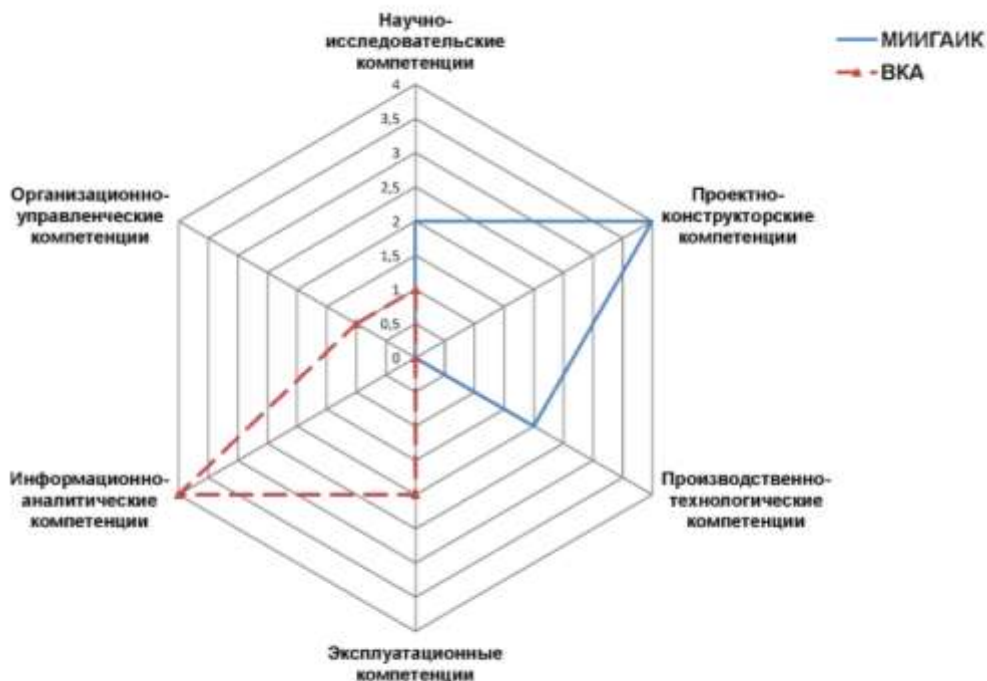


Рис. 5. Профессиональные компетенции разнопрофильных ОПОП

Анализ распределения профессиональных компетенций приводит к следующим выводам.

1. Профиль подготовки специалиста по образовательной программе, разработанной Военно-космической академией имени А.Ф. Можайского, ориентирован на информационно-аналитическую, а также эксплуатационную виды деятельности выпускников. При формировании профессиональных компетенций использовались квалификационные требования к военно-профессиональной подготовке выпускников Министерства обороны РФ.

2. Профиль подготовки специалиста по образовательной программе, разработанной Московским государственным университетом геодезии и картографии, имеет направленность в первую очередь на проектно-конструкторский и во вторую – на научно-исследовательский и производственно-технологический виды деятельности. При формировании профессиональных компетенций ОПОП разработчики основывались на положениях профессионального стандарта 29.004.

3. Профили подготовки данных образовательных программ в рамках их ядра (профессиональных компетенций) практически не пересекаются, что обусловлено разными заказчиками подготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход к компетентностной модели образования внес существенные изменения в систему государственного контроля образовательного процесса. Федеральные государственные образовательные стандарты последних поколений носят рамочный характер: они формируют каркас образовательной программы. Содержательное наполнение ОПОП зависит от сферы труда, на которую ориентированы выпускники.

Образовательная организация в настоящее время не ограничена в правах разработки ОПОП. Данная свобода, однако, значительно повышает ответственность разработчика образовательной программы за ее кондицию, которая измеряется карьерным ростом и качеством трудоустройства выпускников.

Перманентные изменения, происходящие в сфере труда и образования, не должны приводить к деструктуризации образовательной программы, потере накопленного опыта подготовки уникальных специалистов.

Формирование комплекса профессиональных компетенций в виде неделимого ядра образовательной программы, устойчивого к динамично изменяющимся внешним условиям, обеспечит стабильность образовательного процесса и фундаментальность профиля подготовки специалиста.

Список используемых источников

1. Камынина Н.Р., Грудзинский А.О. Россия в Болонском процессе: цель – повышение конкурентоспособности высшего образования // Высшее образование в России. – 2017. – № 8/9 (215). – С. 22–31.

2. Концепция инновационной технологии обучения по дисциплинам профессионального цикла подготовки специалистов в области обработки данных дистанционного зондирования Земли в образовательных учреждениях высшего профессионального образования / А.И. Алтухов [и др.] // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2012. – Вып. 636. – С. 54–57.

3. Алтухов А.И., Сквасников М.А., Чебурков М.А. Особенности применения многофункционального тренажерного комплекса приема, хранения данных дистанционного зондирования Земли в учебном процессе // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 640. – С. 233–239.

4. Сенашенко В.С. О реформировании отечественной системы высшего образования: некоторые итоги // Высшее образование в России. – 2017. – №6 (213). – С. 5–15.

5. Алтухов А.И., Сквасников М.А., Шехонин А.А. Особенности разработки ФГОС уровня высшего и непрерывного высшего образования // Высшее образование в России. – 2020. – Т. 29, № 3. – С. 74–84.

6. Сопряжение ФГОС и профессиональных стандартов: выявленные проблемы, возможные подходы, рекомендации по актуализации / С.А. Пилипенко [и др.] // Высшее образование в России. – 2016. – № 6 (202). – С. 5–15.

7. Гармонизация квалификаций в системе высшего образования и сфере труда в условиях становления национальной системы квалификаций / А.А. Шехонин [и др.] // Высшее образование в России. – 2017. – №11 (217). – С. 5–11.

А.Б. Пауков,
кандидат военных наук, доцент

НОРМАТИВНОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГРУБОГО ДИСЦИПЛИНАРНОГО ПРОСТУПКА КАК ПРАВОВОЕ СРЕДСТВО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ

В публикации рассмотрен юридический состав грубого дисциплинарного проступка, предусмотренного Указом Президента Российской Федерации от 6 мая 2020 года № 308, выражающегося в нарушении военнослужащим законодательных запретов на распространение информации, наносящей вред интересам военной службы. Разрешается противоречие между закрепленным в законодательстве правом граждан на свободу информации и правовым запретом на размещение в СМИ информации, связанной со служебной деятельностью, установленным для военнослужащих.

Ключевые слова: воинская дисциплина, грубый дисциплинарный проступок, запреты, информация, вред интересам военной службы, СМИ, Интернет, информационная безопасность.

Воинская дисциплина, являющаяся обособленной разновидностью государственной дисциплины, рассматривается как уникальное общественное явление [1, с. 277].

К основным нормативным правовым актам Российской Федерации, устанавливающим (определяющим) сущность воинской дисциплины, обязанности военнослужащих по ее соблюдению, виды и порядок применения дисциплинарных взысканий в случаях ее нарушения, в том числе перечень грубых дисциплинарных проступков (далее по тексту статьи – ГДП), относятся Федеральный закон «О статусе военнослужащих» и Дисциплинарный устав Вооруженных Сил Российской Федерации.

Указом Президента Российской Федерации от 6 мая 2020 года № 308 перечень ГДП дополнен составами проступков, объективную сторону которых составляют деяния, связанные с запретом на распространение в средствах массовой информации сведений, наносящих вред интересам военной службы.

Необходимо отметить, что в отличие от большинства ранее установленных в Дисциплинарном уставе ГДП (таких, например, как нарушение правил несения боевого дежурства, службы во внутренних и гарнизонных нарядах, караулах; нарушения порядка использования военного имущества и эксплуатации ВВСТ), способы деяний, которыми осуществляются противоправные посягательства на информационную безопасность, прописаны очень подробно.

К установленным Указом № 308 ГДП отнесены:

1. Предоставление средствам массовой информации либо самостоятельное размещение в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (далее по тексту статьи – СМИ, ИТС «Интернет») информации, которая позволяет определить принадлежность гражданина к Вооруженным Силам.

Противоправным считается также предоставление (распространение) подобной информации в отношении других военнослужащих, а также о лицах, которые уволены с военной службы, членах семей, родителях.

Запрет на предоставление (размещение) распространяется на информацию, используя которую другие лица могут установить (определить):

- место нахождения военнослужащего (военнослужащих) в определенный период;
- данные о служебной деятельности военнослужащего;
- данные о боевой и повседневной деятельности воинских формирований.

Дисциплинарный проступок считается совершенным вне зависимости от того отнесена предоставленная (размещенная) информация к перечню сведений, которые составляют государственную тайну, либо информация не содержит таких сведений.

2. Наличие у военнослужащего при исполнении обязанностей военной службы различных приборов, изделий, технических средств, в которых могут храниться или которые позволяют с использованием ИТС «Интернет» распространять или предоставлять информационные материалы (аудио, фото, видео) и данные геолокации (далее по тексту статьи – изделия для массовой коммуникации).

Для привлечения к юридической ответственности необходимы основания: нормативное – конкретный нормативный правовой акт, который устанавливает ее наступление; фактическое – конкретное деяние, характеризующееся как противоправное [1, с. 248; 2, с. 410-411; 3, ст. 81].

Рассмотрим признаки, характеризующие рассматриваемые ГДП как противоправные деяния.

Общественная опасность. На первый взгляд усматривается некоторое противоречие между запретом для военнослужащих на самостоятельное распространение в СМИ личной информации, пусть и связанной с военной службой, и конституционно закрепленным правом военнослужащих-граждан на свободу информации.

Конституционные права в информационной сфере заключаются в свободном доступе к информации, в использовании информации в порядке, не запрещенном законом, а также в защите личной информации.

В настоящее время и в перспективе информационные и коммуникационные технологии могут использоваться для достижения противоправных целей [5, п. 10].

Публикации в СМИ негативных материалов оказывают отрицательное психологическое воздействие на человеческое сознание [6, с. 85].

Технические возможности «Интернета» допускают осуществление информационно-террористических и информационно-криминологических действий, создавая тем самым угрозу как общественной, так и личной безопасности.

В настоящее время отмечается тенденция к увеличению числа воинских дисциплинарных проступков, связанных с нарушениями информационного характера, в том числе таких, как распространение в СМИ и социальных сетях информации о служебной деятельности [7, с. 64].

Исходя из реальности указанных угроз, в качестве основополагающего принципа ограничения прав человека на доступ к ИТС «Интернет», а также на размещение информации в СМИ, рассматривается равновесие интересов личности, общества и государства [8].

Защищенность личности в информационной сфере заключается в исключении возможности причинить ей вред и подразумевает, в том числе, защиту информации, обеспечивающей личную безопасность.

Информационная безопасность личности тесно связана с правовым положением личности, т. е. с ее статусом [9; 2 с. 507].

В 2017 году, после того как Минобороны России объявило о намерении ввести запрет для военнослужащих размещать в СМИ и социальных сетях информацию, связанную со служебной деятельностью, сотрудниками ВЦИОМ был проведен опрос, в котором участвовало 1,2 тыс. российских граждан. О том, что военнослужащим необходимо запретить использовать в СМИ и социальных сетях информацию, связанную со службой, высказалось 69 % опрошенных и только 25 % придерживалось противоположной точки зрения [10].

Опыт применения воинских формирований в вооруженных конфликтах последних лет показывает, что информация, касающаяся личных данных военнослужащих, участвующих в выполнении боевых (специальных) задач, может использоваться с целью снижения морально-психологического состояния войск. Также возрастает риск использования информации о

военнослужащих, размещенной в СМИ и «Интернет», в целях осуществления противоправной (разведывательной, провокационно-подрывной, террористической) деятельности.

Так, например, в ходе проведения контртеррористической операции на территории Чечни (1994–1996) в различных средствах массовой информации были опубликованы материалы, формирующие у населения негативное отношение к участию в ней российских воинских формирований.

Только за первый месяц боевых действий в трех популярных газетах страны («Аргументы и факты», «Известия», «Московский комсомолец») было опубликовано около 300 негативных материалов в отношении силовых структур.

В опубликованных материалах давались негативные оценки целям борьбы с незаконными вооруженными формированиями, способам и методам проведения операций, а также деловым и личным качествам командного состава, осуществлявшего руководство действиями войск (сил).

В то же время участники незаконных вооруженных формирований использовали такую форму информационно-психологического воздействия на личный состав, выполняющий служебно-боевые задачи, как объявления по громкой связи или на радиочастотах подразделений личных сведений о командовании и военнослужащих, принимающих участие в операции. Объявления таких сведений сопровождалось угрозами расправы с близкими и родными офицеров и солдат, участвующих в боевых действиях, что свидетельствует о деструктивном влиянии на сформированный определенный уровень психологической подготовки военнослужащих. Командирам и офицерам воспитательных структур приходилось прикладывать большие усилия, чтобы нейтрализовать негативное влияние на личный состав [11, с. 1, 2].

Негативный опыт распространения информации в СМИ и социальных сетях был учтен в ходе проведения военной операции в Сирии. Так, заблаговременно был спланирован и систематически проводится комплекс организационных, воспитательных, технических мероприятий, направленных на исключение случаев несанкционированного распространения информации о военнослужащих в СМИ и ИТС «Интернет».

К числу основных мероприятий относятся:

- запрет на индивидуальный провоз и использование на территории САР изделий для массовой коммуникации;
- информирование военнослужащих о новых информационных технологиях и возможных рисках, связанных с их использованием;
- обеспечение работы журналистов сотрудниками временных пресс-центров группировки;
- формирование у военнослужащих бдительности и ответственного отношения ко всей охраняемой информации, информационным системам и средствам информатизации;
- применение в расположении воинских частей (подразделений) технических средств, блокирующих работу изделий, запрещенных для использования.

Противоправность. Для военнослужащих запрет на распространение (размещение) в СМИ и (или) ИТС «Интернет» информации, связанной с военной службой, а также запрет на наличие (хранение) изделий для массовой коммуникации, установлен Федеральным законом «О статусе военнослужащих» в редакции от 6 марта 2019 года, т. е. на уровне законодательного акта государства.

Следует отметить, что для сотрудников органов Федеральной службы безопасности указанные запреты в области информации были установлены законом значительно ранее – с 2011 года [12, ст. 16.2].

Виновность. В рассматриваемых деяниях должна быть установлена вина военнослужащего, выраженная:

- а) в предоставлении СМИ либо самостоятельном распространении в ИТС «Интернет» информации, связанной с военной службой;
- б) в наличии при исполнении обязанностей военной службы изделий для массовой коммуникации.

Анализ объективной и субъективной сторон указанных проступков показывает, что они могут совершаться только умышленно.

Наказуемость. Наказуемость за нарушение запретов, связанных с размещением (распространением) информации, предусмотрена Дисциплинарным уставом (в редакции Указа № 308).

Учитывая, что нарушение запретов в сфере информации отнесено к ГДП, то разбирательство по таким фактам должно проводиться обязательно в письменной форме и решение о привлечении военнослужащего к дисциплинарной ответственности может принять лично командир воинской части либо военный суд.

Таким образом, анализ правовых норм, изложенных в законодательных актах и нормативных документах Президента, позволяет сделать вывод о том, что запрет военнослужащим на размещение в СМИ информации, связанной со служебной деятельностью, установлен для защиты их личной информационной безопасности и не нарушает права на свободу информации.

Список используемых источников

1. *Корякин В.М.* Военное право: учебник. – М.: ЮСТИЦИЯ, 2019. – 430 с.
2. Теория государства и права: учебник / под ред. В.М. Корельского и В.Д. Перевалова. – М.: Издательская группа НОРМА-ИНФРА, 1998. – 570 с.
3. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации. Дисциплинарный устав Вооруженных Сил Российской Федерации. – М.: Эксмо, 2020. — С. 244.
4. Комментарий законодательства о дисциплинарной ответственности военнослужащих. – М.: За права военнослужащих, 2007. – 304 с.
5. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации: утв. Указом Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683. – URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 20.10.2020).
6. *Федак Е.И., Жуков В.Н.* Информационный вброс как популярный прием негативного информационно-психологического воздействия // Военный академический журнал. – 2020. – № 2. – С. 85–88. – URL: <https://vumo.mil.ru/> (дата обращения: 03.12.2020).
7. *Фоменко П.П., Шиханов В.В.* Деятельность военно-политических органов по поддержанию правопорядка и воинской дисциплины в Вооруженных Силах Российской Федерации // Военный академический журнал. – 2020. – № 3. – С. 61–67. – URL: <https://vumo.mil.ru/> (дата обращения: 01.12.2020).
8. *Молчанов С.В.* Административно-правовые основания ограничения конституционного права человека на распространение информации через «Интернет» в Российской Федерации. – URL: www.dissercat.com. (дата обращения: 20.11.2020).
9. *Соколов М.С.* Информационная безопасность военнослужащих: проблемы и перспективы // Военное право. – 2013. – № 1. – URL: <http://www.voennoepravo.ru> (дата обращения: 25.11.2020).
10. Россияне против присутствия военнослужащих в соцсетях [10.10.2017]. – URL: <https://iz.ru/656414/angelina-galanina-nikolai-surkov/rossiiane-khotiat-ubrat-voennosluzhashchik-iz-sotcsetei> (дата обращения: 30.11.2020).
11. *Халитов Т.М.* Совершенствование информационно-воспитательной работы во внутренних войсках МВД России в боевой обстановке: автореф. дис. ... канд. педагогических наук. – М.: Военный университет, 2005. – 24 с.
12. Федеральный закон «О Федеральной службе безопасности» от 3 апреля 1995 г. № 40-ФЗ [с изм. и доп.]. – URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 20.10.2020).

В.М. Середенко*,
кандидат филологических наук;

Г.Е. Середенко*

*Военный университет Министерства обороны РФ, г. Москва

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МОРАЛЬНО-ПОЛИТИЧЕСКОГО И ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАМЕСТИТЕЛЕЙ КОМАНДИРОВ ЧАСТЕЙ ПО ВОЕННО-ПОЛИТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

В статье показана сущность понятий надежности и морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников. Дано обоснование психологических условий обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния заместителей командиров частей по военно-политической работе, особое внимание обращено на раскрытие этих условий.

Ключевые слова: офицер-политработник, психологические условия, морально-политическое и психологическое состояние, военно-политическая работа, надежность.

В современных условиях важное место в подготовке личного состава войск, в формировании у них высоких военно-профессиональных и личностных качеств занимают вновь введенные в армии и на флоте заместители командиров воинских частей по военно-политической работе. Они отвечают за морально-политическое и психологическое состояние личного состава, состояние правопорядка и воинской дисциплины в подчиненных воинских частях и подразделениях, непосредственно организуют и проводят военно-политическую работу, осуществляют ее методическое обеспечение [1]. Государство, возложив на них столь ответственные задачи, в тоже время предъявляет высокие требования к уровню их специальной подготовки, морально-политического и психологического состояния.

Сегодня Министерство обороны Российской Федерации особое внимание уделяет модернизации системы подготовки военно-политических кадров в военных учебных заведениях. Вместе с тем, в военном ведомстве не сложилось ясного представления о концепции морально-политической и психологической подготовки будущих политработников среднего звена, отсутствует модель военно-политического работника. Со времени создания Главного военно-политического управления Вооруженных Сил Российской Федерации данной проблеме посвящено незначительное количество научных работ. Среди них можно особо выделить статью И.А. Алехина и А.А. Авузы [2]. В ней авторы раскрывают психологический портрет специалиста в области военно-политической работы, анализируют систему профессиональной подготовки военно-политических кадров на ее различных уровнях, вносят значимые предложения по усилению методической составляющей военно-образовательного процесса.

Определенный интерес для нашего исследования представляет статья С.Н. Савинкова [3]. На основе анализа ряда отечественных и зарубежных исследователей сущности и содержания понятия «надежность», он дает следующее определение этой категории: «Надежность – это не только механическое выполнение определенных функций, но также многокомпонентное качество личности, проявляющееся в профессиональных умениях, духовной зрелости и социальной компетентности» [4].

Говоря о содержательной стороне категории надежности, мы соглашаемся с В.С. Уакиевым. В качестве составляющих надежности он выделил предметную, моральную и психическую стороны [5].

Обращаясь к рассмотрению содержания морально-политического и психологического состояния военнослужащих в целом и политработников в частности, отметим, что в военной

психологии его содержанием являются: военно-профессиональный, политический, нравственный и психологический компоненты.

Рассмотрев понятия «надежность» и «морально-политическое и психологическое состояние», проведем анализ психологических условий обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников.

Надежность морально-политического и психологического состояния политработников достигается при создании определенных психологических условий и их эффективной реализации.

Вначале дадим определение понятию «психологические условия», поскольку, как нам представляется, до настоящего времени в психологической науке нет однозначного его понимания. При этом мы имеем в виду, что основополагающей, системообразующей здесь является категория «условие», базирующаяся на принципе всеобщей связи и обусловленности явлений реальной действительности.

Для более ясного понимания этой категории следует обратиться к ее философскому пониманию. В философии под условием понимается то, от чего зависит нечто другое (обусловленное), что делает возможным наличие вещи, состояния, процесса [6]. То есть, как нам представляется, если причинно-следственные связи являются внутренним источником побуждения к действию какого-либо явления, то условия являются его внешней стороной, которая дает возможность достижения определенного результата действия.

Поскольку рассматриваемые нами условия нацелены на решение задач обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников, необходимо дать определение понятию «психологические условия».

Будем рассматривать психологические условия как систему целенаправленно сконструированных возможностей содержания, форм, средств и методов обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния политработников.

С учетом этого, мы выделяем два основных признака, являющихся характерными для психологических условий:

1) данные условия следует рассматривать как совокупность форм, методов обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников, ее содержания, способствующих успешному решению поставленных задач и, в конечном счете, достижению целей;

2) данные условия следует рассматривать как совокупность взаимообусловленных психолого-педагогических стратегий, которые делают возможным достижение целей обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния военных политработников.

В процессе обоснования психологических условий обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников мы исходили из цели и ожидаемых результатов исследуемого процесса, методологических подходов, которые были положены в основание нашего исследования.

При обосновании психологических условий обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния политработников мы также исходили из того, что эти условия должны быть проверяемыми в пределах гипотезы данного исследования и, кроме того, основываться на соответствующих психолого-педагогических стратегиях.

Исходя из вышесказанного, в соответствии с нашей гипотезой исследования, опираясь на результаты анализа философских, научных психологических и педагогических трудов и накопившуюся практику психологического обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников, учитывая критерии для отбора на обучение в Военном университете офицеров-политработников для батальонного звена и выше, нами выявлены и обоснованы следующие психологические условия:

– диагностика морально-политических и психологических свойств офицеров-политработников;

- формирование единого, целостного, преемственного образовательного пространства профессиональной подготовки политработников среднего звена в интересах совершенствования процесса психологического обеспечения надежности их морально-политического и психологического состояния;

- обеспечение личностно-деятельностной основы профессиональной подготовки военных политработников:

- воинское и военно-патриотическое воспитание по привитию военным специалистам традиций Вооруженных Сил Российской Федерации, ценностей, норм морали и нравственности.

Рассмотрим подробнее приведенные психологические условия.

1. Диагностика морально-политических и психологических свойств офицеров-политработников.

Первым шагом процесса анализа и оценки морально-политического и психологического состояния политработников является диагностика их морально-политических и психологических свойств. Диагностика позволяет прогнозировать и определять конкретные меры психологического воздействия, коррекционной работы и принять решение командным и политическим составом в соответствии с уровнем надежности морально-политического и психологического состояния политработников.

Научные принципы психологии и педагогики дают нам возможность выявить смысловое содержание процесса диагностики, а также сделать прогноз уровня надежности морально-политического и психологического состояния политработника как комплексное психолого-педагогическое исследование проблем служебной деятельности политработника, определить причины этих проблем и подобрать соответствующую методику их коррекции.

2. Формирование единого, целостного, преемственного образовательного пространства профессиональной подготовки офицеров-политработников в интересах совершенствования процесса психологического обеспечения надежности их морально-политического и психологического состояния.

Вначале рассмотрим понятие «образовательное пространство». Э.В. Михайлова дает следующее определение единому образовательному пространству: «Под единым образовательным и социальным пространством мы понимаем специально организованный комплекс компонентов, обеспечивающих системную интеграцию подсистем профессионального образования в общую педагогически ориентированную систему с целью обеспечения оптимального протекания процесса подготовки будущего специалиста» [7].

Основная цель образовательного пространства заключается в том, чтобы разбудить в слушателе и максимально развить заложенный в нем потенциал саморазвития. В качестве основных системных принципов единого образовательного пространства профессиональной подготовки военных политработников мы выдвигаем:

- принцип целостности, проявляющийся в несводимости свойств процесса обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников на различных его этапах к простой сумме свойств субъектов данного процесса;

- принцип структурности – определяется возможностями описания системы через выявление основных элементов ее структуры, особенностей их внутренних связей;

- принцип иерархичности – образовательное пространство различных субъектов обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников рассматривается как система;

- принцип интеграции, обеспечивающий комплексное, многоплановое влияние на процесс обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников.

Главными элементами, придающими образовательному пространству целостность, являются выработка единых подходов к содержанию, методам и средствам обучения, внедрение новых, более глубоких форм сотрудничества обучаемых и обучающихся.

3. Обеспечение личностно-деятельностной основы профессиональной подготовки офицеров-политработников предполагает целенаправленное формирование у них организационно-волевых качеств, мотивов, направленности, потребностей, индивидуальных психологических особенностей и других качеств.

Исследование процесса обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния офицеров-политработников с позиций личностно-деятельностного подхода требует от нас обратиться к подструктурам личности, выделенным в психическом облике личности С.Л. Рубинштейном [8], В.Г. Афанасьевым [9], Б.Г. Ананьевым [10], А.Г. Ковалевым [11]. Рассмотрение подходов этих ученых к пониманию структуры личности дает нам возможность исследовать качества, способности и свойства личности офицера-политработника, определить психологические условия обеспечения надежности его морально-политического и психологического состояния.

Важнейшими составляющими морально-политического и психологического состояния личности офицера-политработника являются следующие его свойства и качества:

- мотивы и потребности;
- организационно-волевые качества;
- умственные способности;
- склонности и интересы;
- темперамент и характер;
- эмоции и другие особенности личности.

Их развитие в процессе реализации рассматриваемого нами условия приводит к формированию высокого уровня надежности как личностно-профессионального качества.

4. Военное и военно-патриотическое воспитание по привитию офицерам-политработникам традиций Вооруженных Сил Российской Федерации, ценностей, норм морали и нравственности.

Военное и военно-патриотическое воспитание офицеров-политработников мы рассматриваем не только как одно из условий, но также и как направление, основой которого является сформулированный К. Роджерсом подход к человеку как субъективно свободному, выбирающему, создающему свое «Я», ответственному за свой выбор [12].

В данном случае обеспечение надежности морально-политического и психологического состояния военно-политических работников имеет направленность, при которой офицеры-политработники ориентированы на участие в самостоятельной профессиональной деятельности и общении, при котором они осознанно ставят перед собой цель, определяют средства, направляют свои усилия на достижение и оценку своих индивидуальных результатов, результатов работы воинских коллективов.

Таким образом, психологические условия обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния заместителей командиров частей по военно-политической работе представляют собой совокупность целенаправленных сконструированных возможностей содержания, форм, методов и средств, способствующих достижению цели.

Основными психологическими условиями обеспечения надежности морально-политического и психологического состояния заместителей командиров частей по военно-политической работе выступают следующие:

- диагностика морально-политических и психологических свойств офицеров-политработников;
- формирование единого, целостного, преемственного образовательного пространства профессиональной подготовки политработников среднего звена в интересах совершенство-

вания процесса психологического обеспечения надежности их морально-политического и психологического состояния;

– обеспечение личностно-деятельностной основы профессиональной подготовки офицеров политработников;

– воинское и военно-патриотическое воспитание по привитию офицерам-политработникам традиций Вооруженных Сил Российской Федерации, ценностей, норм морали и нравственности.

Список используемых источников

1. Основы организации военно-политической работы в Вооруженных Силах Российской Федерации: прил. № 1 к приказу Министра обороны РФ от 22 июля 2019 г. № 404. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=785845&dst=100001#VEhhkwSYTc5cWRcK1> (дата обращения: 20.11.2021).

2. *Алехин И.А., Авуза А.А.* Организационно-педагогические условия совершенствования профессиональной подготовки специалистов для военно-политических органов Вооруженных сил Российской Федерации // Военный академический журнал. – 2019. – №1 (21). – С. 24–31.

3. *Савинков С.Н.* Проблема изучения надежности как личностно-профессионального качества личности в психологической науке // Мир науки. Педагогика и психология. – 2019. – № 2. – URL: <https://mir-nauki.com/PDF/45PSMN219.pdf> (дата обращения: 05.11.2021).

4. Там же.

5. *Уакиев В.С.* Проблемы формирования социальной надежности советских военных специалистов в условиях НТР. – Автореф. дис. ... канд. филос. наук. – М., 1991. – 20 с.

6. *Философский энциклопедический словарь.* – М.: ИНФРА-М, 2003. – 576 с.

7. *Михайлова Э.В.* Преемственность как средство адаптации студентов-дизайнеров в профессиональном образовании // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 1. – С. 170–175.

8. *Рубинштейн С.Л.* Основы общей психологии. – СПб.: Питер, 2000. – 712 с.

9. *Афанасьев В.Г.* О системном подходе в социальном познании // Вопросы философии. – 1973. – № 6. – С. 99–101.

10. *Ананьев Б.Г.* Избранные психологические труды: в 2 т. – М.: Педагогика, 1980. – Т. 1. – 287 с.

11. *Ковалев А.Г.* О проблеме восприимчивости личности к воспитательным действиям // Сов. педагогика. – 1980. – № 6. – С. 38–43.

12. *Роджерс К.* Взгляд на психотерапию. Становление человека: пер. с англ. / под общ. ред. и предисл. Е.И. Исенина. – М.: Прогресс «Универс», 1994. – 479 с.

К.Л. Григорьев,
кандидат технических наук, доцент;
Ю.В. Козлов,
кандидат военных наук;
Д.Ю. Пономарев

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В статье предложено направление совершенствования планирования задействования наземных технических средств управления космическими аппаратами и обоснован многокритериальный подход, использующий ранее не учитываемые показатели эффективности процесса управления. В предлагаемом подходе решение задачи многокритериальной неопределенности позволяет повысить эффективность процесса управления группировкой космических аппаратов.

Ключевые слова: планирование задействования наземных технических средств управления КА, критерии эффективности.

ВВЕДЕНИЕ

Космические системы и комплексы стали в XXI веке одним из основных инструментов обеспечения боевой и повседневной деятельности ВС развитых государств мира, а информационно-космическое обеспечение действий войск (сил) занимает приоритетное место в общей структуре информационного обеспечения. Особенности геополитического положения Российской Федерации, слабая оснащенность отдельных регионов средствами связи и инфотелекоммуникации, изменение направления вектора внешних военных угроз объективно приводят к возрастанию роли космических средств при решении задач обеспечения обороны и безопасности страны.

Анализ опыта применения группировок войск (сил) показывает, что эффективность функционирования орбитальной группировки (ОГ) КА зависит от качества решения задач управления КА, которое структурировано в сеансы управления КА, включающие различные операции управления (ОУ) их бортовыми системами с использованием наземных средств управления КА [1].

Развитие космической деятельности предполагает постоянное расширение номенклатуры и количества КА, в том числе и за счет замены отдельных больших КА группировками (кластерами, роями) малых КА. Соответственно значительно увеличивается число требуемых ОУ КА для поддержания их орбитальной структуры и использования по назначению. Рост числа требуемых в заданный промежуток времени ОУ даже при неизменном составе наземных средств управления КА приведет к повышению нагрузки на силы и наземные средства управления КА, тем более в условиях их сокращения. Следовательно, можно уверенно прогнозировать снижение качества управления ОГ КА и, соответственно, уменьшение эффективности применения группировки.

В общем случае под эффективностью задействования любого изделия военной техники (в том числе и наземных ТСр) понимается комплексная характеристика потенциальных и (или) реальных результатов (интегрального эффекта) задействования его по назначению с учетом степени соответствия результатов целям, показателям всех видов ресурсопотребления, а также других видов количественных и качественных показателей [3].

Поэтому поиск направлений совершенствования решения задачи планирования задействования наземных технических средств управления КА является в современных условиях актуальным.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ПОДХОДА К ПЛАНИРОВАНИЮ ЗАДЕЙСТВОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Решающее значение для обеспечения эффективности применения наземных технических средств (ТСр) имеет качество планирования, суть которого заключается в установлении состава и временной последовательности операций, приводящей к достижению целей функционирования КА, а также в определении порядка координированной деятельности всех служб и средств системы управления функционированием КА в ходе выполнения этих операций [2]. В связи с тем, что планирование задействования наземных технических средств для проведения ОУ КА является циклической, технологически сложной многоэтапной процедурой, увеличение нагрузки в процессе управления КА, очевидно, приведет к возрастанию конфликтных ситуаций при использовании одних и тех же наземных средств для проведения ОУ разными КА.

Существующий подход [2] предполагает решение следующих задач:

- получения заявок от потребителей (центры управления полетами КА, взаимодействующие организации), проверки на правильность представленных данных;
- формирования первоначального плана задействования наземных технических средств управления космическими аппаратами (далее – план);
- выявления конфликтных ситуаций в первоначальном плане ввиду изменения обстановки;
- устранения конфликтных ситуаций с учетом приоритетности КА;
- сведения результатов координационного планирования задействования наземных технических средств в табличную и графическую формы;
- формирования и утверждения окончательного плана.

План задействования ТСр определяет порядок и последовательность проведения ОУ КА и представляет собой совокупность частных оперативных планов по отдельным космическим программам, по отдельным КА. Он включает в себя сведения о КА, привлекаемых пунктах и наземных средствах, а также времени и режимах работы этих средств и определяет порядок и последовательность выполнения задач наземными техническими средствами при управлении существующими и планируемыми к запуску КА в соответствии с технологическим циклом управления (ТЦУ) ими. Под пунктом управления (ПУ) КА в данном контексте понимается выделенный участок территории с размещенными на нем наземными ТСр различной номенклатуры для проведения информационного обмена с КА, преобразования и передачи информации по каналам связи.

Основным принципом планирования задействования ТСр является принцип коллективного использования технических средств, заключающийся в том, что одни и те же технические средства используются для проведения ОУ КА различного назначения [2].

Концептуальная схема алгоритма сбора и контроля заявок на оперативное планирование задействования наземных технических средств показана на рис. 1.

При планировании работы наземных ТСр эффективность выполнения задачи применения зависит от правильного решения тесно взаимосвязанных задач. Первая задача заключается в правильном выборе критериев планирования. Вторая задача – это наиболее рациональное распределение ресурсов, чтобы получить наибольший эффект. Таким образом, критерий оптимальности представляет собой меру для сравнения количественно формализуемых показателей плановых решений с точки зрения затрачиваемых ресурсов и получаемых результатов [5].

Исходя из того, что основной целью планирования задействования наземных технических средств является бесконфликтное распределение их ресурса [2], в случае отказов технических средств управления КА (ТСр) требуется перепланировать (изменить) существующее расписание (план) и все запланированные на ТСр операции управления КА распределить между ограниченным числом исправных ТСр.

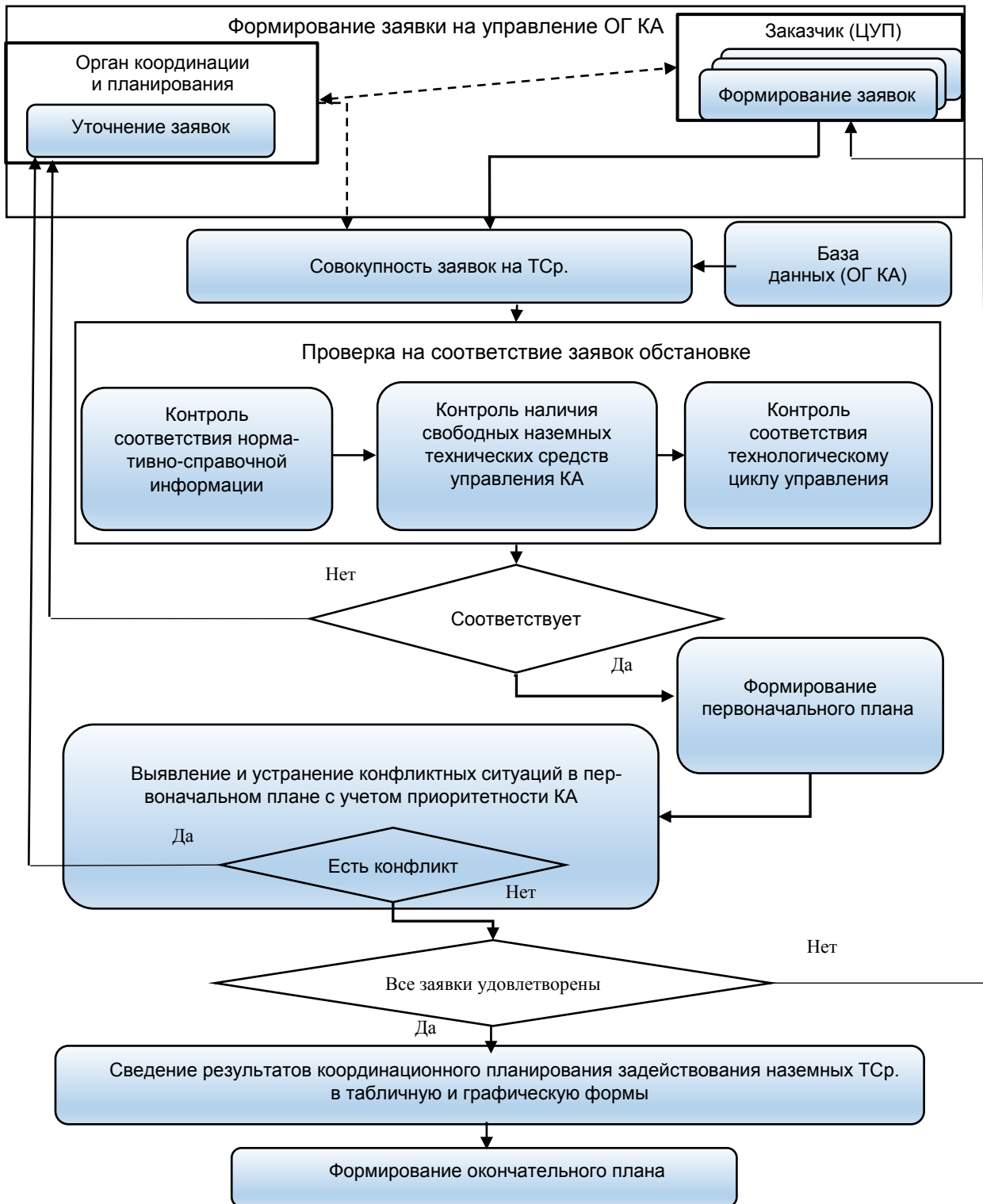


Рис. 1. Концептуальная схема существующего алгоритма планирования задействования наземных ТСр

Время, требуемое для коррекции планов (разрешения конфликтных ситуаций между заявками различных центров управления полетами (ЦУП) [2], ограничено выделенным интервалом времени (определяемым орбитальной структурой и положением КА на орбите). Задача планирования, решаемая в условиях штатной эксплуатации наземных ТСр и удовлетворяющая предъявляемым требованиям [2, 3], является двухкритериальной (все заявки удовлетворены и нет конфликтов). При этом в результате оперативного планирования (перепланирования), существует высокая вероятность получения решений, реализация которых будет подразумевать неравномерное задействование ТСр управления.

Неравномерная загруженность ТСр предопределяет появление в структуре совокупности пунктов управления КА элементов с высокой функциональной значимостью, т. е. элементов, чей выход из строя на этапе оперативного управления приводит к существенному увеличению объема операций управления для других ТСр, которые необходимо выполнить на заданном интервале. Таким образом, решение задачи планирования при существующих ограничениях может привести к перерасходу ресурсов (наработка, потребление электроэнергии) одних средств и простою других:

– нерациональное задействование личного состава боевых расчетов, определяемое задействованием ТСр для проведения сеансов управления КА на протяжении всех суток днем и ночью, что в условиях повышения нагрузки и частоты заступления на дежурство расчетов приводит к накоплению усталости персонала и возрастанию роли человеческого фактора (основной причины несанкционированных действий) при решении задач дежурства;

– такое же задействование ТСр ввиду непродолжительного простоя 1–1,5 часа между сеансами управления приводит к перерасходу электроэнергии, так как средства, как правило, обслуживаемыми расчетами не выключаются.

К перечисленным недостаткам в настоящее время добавляется влияние следующих факторов:

– в текущем году увольняется в запас большее число (в сравнении с последними пятью годами) военнослужащих (специалистов), достигших предельного возраста нахождения на военной службе (которым пять лет назад увеличили предельный срок службы);

– квалификация технических специалистов (особенно молодых) в условиях пандемии неизбежно снижается (досрочные выпуски из вузов, невозможность планового повышения квалификации, отрыв от служебной деятельности по болезни и пр.).

Существующий подход к решению задач планирования применения ТСр не учитывает ряд важных показателей, которые могут повысить обоснованность принимаемых решений на планирование и коррекцию существующих планов использования ТСр и эффективность управления КА в целом. К показателям (G1–G4), учет которых повышает качество планирования применения ТСр, можно отнести следующие:

1) привлечение к управлению КА минимально необходимого числа пунктов и средств на этих пунктах управления КА; обеспечение сгруппированности по времени ОУ, проводимых каждым наземным ТСр на суточном интервале работ (G1);

2) обеспечение равномерности загрузки ТСр на разных пунктах управления КА операциями управления КА (G2);

3) планирование ОУ с учетом широт и часового пояса привлекаемых наземных ТСр на пунктах управления КА преимущественно на дневное время суток (G3);

4) исключение одиночных ОУ для наземных ТСр на суточных интервалах времени; исключение длительных перерывов между операциями обслуживания для ТСр на суточном интервале времени (G4).

Таким образом, учет предложенных показателей качества планирования позволит повысить его качество, причем оптимизация планирования не может рассматриваться как отдельная задача, решаемая после его формирования, так как в этом случае возникают большие трудности в учете сложных отношений между различными ТСр. Поэтому данная задача должна решаться в процессе формирования заявок на задействование наземных

средств для отдельных КА формулированием соответствующих ограничений на задействование наземных ТСр.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАСШИРЕННОГО СОСТАВА КРИТЕРИЕВ

При оценивании эффективности задействования ТСр необходимо правильно выбрать систему показателей и критериев качества планирования.

Раскроем предлагаемые показатели.

(G1) Наилучшим способом выполнения ТЦУ КА является привлечение необходимого количества наземных ТСр и резервирование каждой ОУ КА [4]. Когда при проведении ОУ КА задействуется два пункта управления КА в полном объеме («основной» и «резервный» последовательно по трассе полета КА), в случае возникновения неисправности на ТСр на «основном» пункте, ОУ КА выполняет «резервный» пункт. С другой стороны, в условиях резкого увеличения количества обслуживаемых КА (в результате наращивания ОГ КА) и снижения количества ТСр к управлению КА будет привлекаться минимально необходимое число пунктов и ТСр (без резервирования).

Обеспечение сгруппированности по времени ОУ КА и исключение длительных перерывов между операциями обслуживания, проводимыми каждым ТСр на суточном интервале работ, требуется с целью экономии их ресурса.

Содержанием этапов подготовки к операциям управления КА являются стандартные процедуры, такие как: включение аппаратуры, автономные и комплексные проверки аппаратных комплексов и т. д. Поэтому при серии подряд запланированных ОУ КА на одном ТСр не требуется проведение всего комплекса мероприятий подготовки к операциям управления КА. Обеспечение сгруппированности по времени ОУ КА позволяет экономить электроэнергию, бумажные носители информации и другие ресурсы, кроме того, при равном количестве выполненных ОУ КА, уменьшить наработку ТСр и продлить их технический ресурс.

(G2) Обеспечение равномерности загрузки пунктов и ТСр позволяет равномерно расходовать ресурс всего парка ТСр в год, проводить их техническое обслуживание, пополнение и продление ресурса. В случае неравномерной загрузки операциями управления КА отдельных пунктов происходит существенный расход ресурса одного-двух пунктов управления КА, «лавинное» увеличение отказов и выход пунктов управления КА из контура управления КА. После выхода из процесса управления одного или нескольких средств управления КА резко возрастает нагрузка на оставшиеся и увеличивается вероятность их отказа.

(G3) Высокая важность качественного проведения ОУ КА в процессе поддержания заданной орбитальной структуры ОГ КА, особенно в целях решения задач сохранения конкурентоспособности нашей страны в космической деятельности, требует выделения любых имеющихся ресурсов (технических, людских и др.). В условиях повседневной эксплуатации ТСр выполнение задачи управления КА может достигаться с учетом требований по расходу ресурсов, а также рациональной организации труда и отдыха персонала. Спланированные операции обслуживания КА в первой половине светового дня позволяют обеспечить наибольшую внимательность персонала, что в свою очередь минимизирует ошибки по вине персонала по сравнению с вечерними и ночными интервалами суток. Увеличение количества ошибок персонала ведет к срыву выполнения задач управления КА на данном пункте управления КА и увеличивает количество коррекций в уже сформированном плане задействования ТСр на этапе его реализации, задействуются другие пункты управления КА.

(G4) Исключение одиночных ОУ КА для ТСр на суточных интервалах времени позволит сэкономить ресурсы как ТСр, так и обслуживающего персонала. Это связано с тем, что внутри пунктов управления КА для проведения одиночной ОУ КА необходимо провести весь

технологический цикл подготовки к нему в рамках одного пункта управления КА. Для проведения ОУ на одном ТСр по одному или различным КА следующих подряд по времени, нет необходимости для последующих ОУ выключать и включать аппаратуру, проводить автономные проверки и т. д.

Для решения задачи планирования с учетом предлагаемых показателей используется алгоритм многокритериальной оптимизации, позволяющий строить результирующее отношение предпочтения и задавать требования к вновь формулируемым вариантам плана в условиях, когда относительные веса показателей не заданы или одинаковы. В качестве прототипа такого алгоритма используем алгоритм, основанный на известном методе варьирования ограничений [5]. При этом будем полагать, что критерием оптимальности является минимум соответствующего показателя.

Рассмотрим подробнее алгоритм выбора рационального варианта, представленный на рис. 2.

Этап 1. Формирование исходного множества альтернатив на основе концепции «векторных уступок».



Рис. 2. Концептуальная схема алгоритма выбора рационального варианта

Шаг 1. Расчет планов, оптимальных по частным показателям.

После выполнения первого шага количество вариантов плана соответствует количеству используемых показателей качества плана и все полученные варианты принадлежат множеству недоминируемых альтернатив.

Шаг 2. Оценка каждого из планов по всем показателям (расчет матрицы показателей G_1 – G_4). В этой матрице строки соответствуют вариантам плана, а столбцы – показателям качества плана.

Шаг 3. Определение допустимых диапазонов изменения показателей. Значения показателей для следующего варианта плана не должны превышать величины, отличающейся от оптимального значения показателя на величину заданной по определенному правилу уступки [5].

Шаг 4. Расчет планов с учетом ограничений на значения показателей:

- 1) выбор номера показателя, имеющего наихудшее (максимальное) значение;
- 2) выбор из множества сформированных вариантов плана, обладающего самым низким значением выбранного показателя (т. е. является наихудшим);
- 3) оптимизация плана по «наихудшему» показателю. В результате получим новый вариант плана с более предпочтительным вектором оценок, так как, с одной стороны, вариант оптимизирован еще по одному показателю, а с другой – значения остальных показателей находятся в пределах заданных уступок;
- 4) запись в матрицу G значений элементов вектора показателей для нового варианта плана. При этом вновь полученный вектор показателей приписывается к матрице P снизу.

Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет получено множество альтернатив, диапазон изменения показателей которых удовлетворяет заданным требованиям.

Таким образом, цель первого этапа достигнута, т. е. сформировано множество вариантов плана Δ , в пределах которого на втором этапе следует искать рациональное (в рамках заданной системы показателей качества плана) решение. Это множество включает (по построению) варианты плана, значения показателей которых не превышают компромиссных значений, отклоняющихся от «идеальной» точки, полученной на шаге 1, на заданные величины уступок по каждому из показателей.

Этап 2. Выбор единственного, наиболее предпочтительного варианта плана из множества альтернатив Δ . С этой целью на нем вводится дополнительное отношение предпочтения, заданное с помощью некоторой согласующей функции. При выборе согласующей функции обычно используют две вспомогательные процедуры: нахождение идеальной точки (она уже определена на первом шаге этапа 1) и нормализация значений показателей.

Данные показатели носят неформализуемый характер и используются алгоритмически при построении вариантов планов задействования наземных технических средств. При этом используется принцип последовательного сужения множества альтернатив по правилу [5]

$$\Delta = \Delta^4 \subseteq \Delta^3 \subseteq \Delta^2 \subseteq \Delta^1. \quad (1)$$

Здесь Δ^i , $i = 1, \dots, 4$ – сужение множества допустимых альтернатив, произведенное на основе i -го критерия G_i (множество альтернатив, оптимальных по i -му критерию).

При формировании плана применения наземных технических средств необходимо стремиться к снижению количества коррекций на этапе его реализации, исключению излишнего резервирования средств управления КА, а также возможности сохранения и использования их резерва в случае необходимости (внепланового использования ресурса ТСр для проведения ОУ КА).

Каждая заявка ЦУП характеризуется: номером ЦУП; номером КА; операцией управления (информационного взаимодействия), необходимой для реализации ТЦУ; временем к которому должна быть выполнена операция управления (витком); перечнем ПУ КА и технических средств, способных выполнить указанную операцию.

Для формализованного описания методики введем в рассмотрение следующие множества.

1. Множество ЦУП, каждый из которых управляет КА определенного назначения:

$$Q = \{Q_\pi, \pi \in H\}, \quad H = \{1, \dots, h\}. \quad (2)$$

2. Множество КА, управляемых из конкретного ЦУПа:

$$A = \{A_\nu, \nu \in N\}, \quad N = \{1, \dots, n\}. \quad (3)$$

3. Множество ПУ:

$$B = \{B_\mu, \mu \in M\}, \quad M = \{1, \dots, m\}. \quad (4)$$

4. Множество операций управления (информационного взаимодействия):

$$D = \{D_\chi, \chi \in K\}, \quad K = \{1, \dots, k\}. \quad (5)$$

Каждая операция характеризуется длительностью выполнения d_χ и приоритетом $p_{\nu\chi}$.

5. Множество технических средств:

$$C = \{C_\lambda, \lambda \in L\}, \quad L = \{1, \dots, l\}. \quad (6)$$

Каждое техническое средство может выполнить только определенные операции из множества D .

6. Контактный потенциал $\varepsilon_{\nu\mu}(t)$ пары $\nu - \mu$, отражающий факт наличия или отсутствия для A_ν КА зоны видимости с B_μ ПУ КА и, соответственно, возможности выполнения находящихся на нем ТСр операций:

$$\varepsilon_{\nu\mu}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } A_\nu(t) \in B_\mu(t) \\ 0, & \text{если } A_\nu(t) \notin B_\mu(t) \end{cases}. \quad (7)$$

7. Интервал времени: $T = [t_0, t_f]$, на котором осуществляется планирование (распределение заявок на применение ТСр по управлению КА). На интервале T для A_ν КА выделим η_ν непересекающихся участков, соответствующие виткам.

8. Канальный потенциал:

$$\Theta(t)_{\nu\mu\lambda\chi} \in \{0, 1\}, \quad (8)$$

определяющий наличие ($\Theta(t)_{\nu\mu\lambda\chi} = 1$), на момент времени t , исправного (готового) технического средства C_λ на B_μ ПУ, способного выполнить D_χ операцию с A_ν КА. Канальный потенциал позволяет учитывать процесс деградации/наращивания возможностей технической и организационной структур наземного комплекса.

9. Опишем сеанс управления формально пятеркой: $\langle \nu, \chi, \mu, \lambda, \eta \rangle$, и соответствующий выполнению по КА A_ν операции D_χ средством C_λ , размещенным на B_μ ПУ КА на витке η_ν .

10. Множество возможных сеансов управления (заявок) U представляется массивом пятерок:

$$U = \{\langle \nu, \chi, \mu, \lambda, \eta \rangle\}. \quad (9)$$

Управляющее воздействие

$$u(t)_{v\chi\mu\lambda} \in \{0,1\}, \quad v = \overline{1, n}, \quad \mu = \overline{1, m}, \quad \chi = \overline{1, k}, \quad \lambda = \overline{1, l}, \quad (10)$$

определяет выполнение в момент времени t операции D_χ средством C_λ , размещенным на B_μ ПУ в сеансе управления с A_v КА.

Для включения операции управления в план применения средств необходимо выполнить совокупность технологических и технических ограничений, определяющих область допустимых альтернатив управляющих воздействий: $U^{(o)} \in U$.

Эти ограничения, формирующие область $U^{(o)}$, раскрывают причинно-следственные связи и отношения между ОУ в рамках одного сеанса:

– ограничение несовместности (запрет на выполнение несовместных операций):

$$\sum_{\chi \in K^1} \sum_{\mu=1}^m \sum_{\lambda=1}^l u(t)_{v\chi\mu\lambda} \leq 1, \quad K^1 \in K, \quad \forall v = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где K^1 – множество номеров несовместных операций;

– ограничение длительности (суммарная продолжительность операций должна быть меньше продолжительности ЗРВ):

$$\sum_{\chi}^k \sum_{\lambda=1}^l d_\chi u(t)_{v\chi\mu\lambda} \leq s(t)_{v\mu}, \quad \forall v = \overline{1, n}, \quad \mu = \overline{1, m}, \quad (12)$$

где $s(t)_{v\mu}$ – продолжительность ЗРВ A_v КА с ПУ B_μ ;

– ограничение одновременности (запрет выполнения одной операции одновременно с несколькими КА):

$$\prod_{v=1}^n \sum_{\chi=1}^k u(t)_{v\mu\chi\lambda} = 0, \quad \forall \mu = \overline{1, m}, \quad \lambda = \overline{1, l}, \quad (13)$$

– ограничение непревышения (запрет одновременной работы КА с несколькими ТСр):

$$\sum_{\mu=1}^m \sum_{\lambda=1}^l u(t)_{v\chi\mu\lambda} \leq 1, \quad \forall v = \overline{1, n}, \quad \chi = \overline{1, k}. \quad (14)$$

Тогда задача формирования плана выполнения поступивших заявок заключается в определении таких управляющих воздействий $u(t)_{v\chi\mu\lambda}$ ($v = \overline{1, n}, \mu = \overline{1, m}, \chi = \overline{1, k}, \lambda = \overline{1, l}$), при которых суммарное количество выполняемых наиболее важных операций максимально:

$$J(u(t)_{v\chi\mu\lambda}) = \sum_{v=1}^n \sum_{\chi=1}^k \sum_{\mu=1}^m \sum_{\lambda=1}^l p(t)_{v\chi} \varepsilon(t)_{v\chi\mu\lambda} \theta(t)_{v\chi\mu\lambda} u(t)_{v\chi\mu\lambda} \rightarrow \max_{u(t)}, \quad (15)$$

при $u(t)_{v\chi\mu\lambda} \in \{0,1\}$ и выполнении ограничений (11)–(14).

Данная задача относится к классу задач оптимального управления и может решаться с использованием соответствующих методов [2, 5].

Учет предложенных показателей качества планирования позволяет повысить эффективность процесса планирования применения наземных технических средств за счет рассмотрения большего количества альтернативных вариантов планов, последовательного сокращения их количества с учетом вводимых ограничений на первом этапе, что позволяет сократить также время на принятие решения, а на втором этапе – выбора управляющего воздействия $u^*(t)_{v\chi\mu\lambda}$, обеспечивающего максимальное суммарное количество выполняемых наиболее важных операций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение предлагаемого подхода к решению задачи планирования применения наземных технических средств позволит повысить качество формируемого плана за счет учета дополнительно рассматриваемых показателей и удовлетворения необходимых требований путем решения оптимизационной задачи планирования выполнения заявок, что, в свою очередь, обеспечит снижение затрат ресурсов при заданном качестве управления или повышение качества управления при заданном расходе ресурсов. Внедрение данного подхода не повлечет значительных затрат, так как требует лишь доработки существующего программного обеспечения.

Список используемых источников

1. *Колтин М.А., Проценко П.А., Слащев А.В.* Методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Труды МАИ. – М.: МАИ, 2017. – Вып. 92. – С. 100–118.
2. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов [и др.]; под общ. ред. Ю.С. Мануйлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
3. Проблемы автоматизированного управления космическими средствами: учеб. пособие / под ред. Ю.С. Мануйлова. – МО РФ, 2001. – 180 с.
4. *Соколов Б.В.* Комплексное планирование операциями и управление структурами в АСУ подвижными объектами. – МО СССР, 1992. – 232 с.
5. *Соколов Б.В., Тарасов О.М.* Оптимизация принятия решения с учетом множества показателей // Проблемы управления информатики. – 2005. – № 6. – С. 96–104.

Б.Д. Казахов,
доктор военных наук, профессор;
Д.М. Попов,
кандидат военных наук

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИОННО- ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ПРОТИВНИКА

Рассматривается методический подход к оцениванию потенциальных возможностей организационно-технических систем военного назначения по комплексному воздействию на противника. Осуществлены выбор и обоснование показателей и критерия оценивания потенциальных возможностей организационно-технических систем военного назначения по комплексному воздействию на противника. Разработана методика оценивания потенциальных возможностей ударной подсистемы организационно-технической системы военного назначения.

Ключевые слова: организационно-техническая система, ударная подсистема, комплексное воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

История войн и вооруженных конфликтов свидетельствует о высокой зависимости успеха действий войск (сил) от обоснованности решений, принимаемых командующими (командирами), базирующихся на глубоком анализе обстановки, точных расчетах, тщательном планировании и достоверной оценке ожидаемых последствий применения подчиненных формирований. Такая корреляция обуславливает актуальность проблематики, связанной с разработкой методических подходов, позволяющих органам управления адекватно оценивать потенциальные возможности имеющихся сил (средств) по выполнению поставленных задач при ожидаемых вариантах развития боевой обстановки.

К настоящему времени разработка методологических аспектов формального представления такого сложного и многопланового явления как боевые действия (бой) не может считаться завершенной [1]. Несмотря на разнообразие и многочисленность теоретических проработок в войсках, практически отсутствуют модели, обеспечивающие адекватную оценку ожидаемой эффективности выполнения боевых задач и боевых возможностей воинских формирований различных уровней иерархии и предназначения. Обязательным условием достижения успеха в современных боевых действиях является реализация способов применения войск (сил), обеспечивающих мощное воздействие на противника на всю глубину его боевых порядков и в течение всего периода вооруженного противоборства [2].

Представленные выше обстоятельства обуславливают актуальность решения научной задачи, заключающейся в совершенствовании методических подходов оценивания потенциала группировок войск (сил) или отдельных воинских формирований по оказанию на противника воздействия с целью снижения его боеспособности в ходе боя (этапа боевых действий, оперативной задачи операции). При решении озвученной задачи целесообразно руководствоваться следующими положениями:

– в основе подходов оценивания следует применять вероятностно-статистические способы исследования, обеспечивающие количественное изучение процессов вооруженного противоборства (слабоструктурированных процессов) и формирование моделей, необходимых для оценки возможностей войск (сил, воинских формирований) выполнять боевые задачи, связанные с комплексным воздействием на противника;

– группировки войск (сил) или отдельные воинские формирования рассматриваются как организационно-технические системы военного назначения (ОТС ВН), в состав которых входит ударная подсистема;

– ударная подсистема (УПдС) представлена организационными элементами, оснащенными средствами вооружения и военной техники (ВВТ) различного базирования, способными осуществлять уничтожение (подавление) целей (объектов) противника в соответствующих геофизических сферах. Основное предназначение УПдС – воздействие антагонистического характера на противника в установленной (назначенной) зоне (полосе, секторе, районе) ответственности для снижения его боеспособности до определенного (требуемого) уровня, при котором формуруются условия, позволяющие ОТС ВН в целом успешно решать задачи боя (операции, боевых действий и т. д.).

Также следует помнить, что в ходе исследования противоборства в определенной физической среде, с помощью соответствующих методических подходов целесообразно оценивать не сами конфликтующие системы, а процессы их построения и функционирования.

В целом, учитывая ограниченный формат статьи и ее целевую направленность, основными элементами, которые авторы предлагают подвергнуть оцениванию, являются:

– исследуемой целенаправленной материальной системой (оцениваемым объектом) – ударная подсистема ОТС ВН, а именно совокупность воинских формирований в составе группировки войск (сил), предназначенных для комплексного поражения определенных (назначенных) подразделений или объектов противника;

– исследуемым процессом (оцениваемым предметом) – формирование потенциала (потенциальных возможностей) УПдС по выполнению задач по предназначению в зависимости от вариантов ее построения при непосредственной подготовке к боевым действиям (операции, бою). Согласно общепринятым взглядам в военном искусстве данное построение проводится при развертывании войск (сил) в боевой порядок (оперативное построение).

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И КРИТЕРИЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ПРОТИВНИКА

При создании требуемой системы показателей необходимо учитывать сущность и содержание вооруженного противоборства, свидетельствующих, что формируемый при боевом построении потенциал воздействия УПдС на войска и объекты противника надлежит оценивать с помощью характеристик, отражающих сведения:

– о пространственных параметрах создаваемой зоны поражения УПдС в ходе оцениваемого периода боевых действий (боя, операции);

– о времени, в течение которого анализируемая УПдС сможет поддерживать свой потенциал на требуемом уровне, или другими словами, сохранять свою способность выполнять поставленные перед ней задачи;

– о достаточности возможностей УПдС по нейтрализации потенциала противостоящей группировки противника (совокупности элементов его боевого порядка).

Решая задачу по определению необходимых показателей также необходимо помнить о том, что развернутая группировка противника, находясь в статическом состоянии (на занятых позициях, рубежах, районах), уже обладает определенным ресурсным потенциалом воздействия (РПВ) на составные части ОТС ВН, который она может реализовать за период операции (боевых действий). Поэтому построение ударной подсистемы должно предусматривать формирование в составе ОТС ВН такого элемента, который бы обладал необходимыми возможностями по снижению РПВ противостоящей группировки войск (сил) противника. Для УПдС ОТС ВН данные возможности надлежит рассматривать как адекватный РПВ на

определенные (как правило – критически важные) объекты в составе противостоящей группировки противника (конфликтной ОТС ВН). Под ресурсным потенциалом воздействия понимается количественная мера возможностей сложной системы по выполнению какой-либо деятельности (созданию условий), позволяющих с помощью определенных преобразований получить желаемый результат [3, 4].

Таким образом, для оценивания итогов построения УПдС в первую очередь нужен показатель, характеризующий соотношение РПВ настоящей подсистемы с РПВ противостоящей группировки противника, находящейся в статическом состоянии. Очевидно, что расчет данного показателя должен осуществляться применительно к группировке противника, действия которой предусматриваются в зоне ответственности оцениваемой ОТС ВН.

В настоящее время в практике принятия решений на применение УПдС ОТС ВН (для характеристики возможностей по борьбе с группировкой противника) широко используется показатель количества имеющихся огневых средств (ОСр) или целевых каналов (ЦК). Однако данному показателю присущи определенные недостатки. Например, использование количества ОСр или ЦК очерчивает возможности УПдС только при одном (разовом) ее воздействии на объекты группировки противника и не дает представления о потенциале этой подсистемы по нейтрализации действий противника в течение всего периода боевых действий (операции, боя). Следовательно, рассматриваемый показатель не соответствует общепринятым требованиям, а именно он не адекватен, так как дает характеристику только части воздействий УПдС. Кроме того, он не учитывает свойства процессов более высокого уровня, которыми в нашем случае являются боевые действия (бой, операция) в целом, а именно их продолжительность.

Отсюда вытекает вывод, что одной из характеристик УПдС при реализуемом варианте ее построения должен быть показатель, величина которого может ответить на вопрос: каково соотношение РПВ данной подсистемы в зоне ответственности своей ОТС ВН с РПВ противостоящей ОТС ВН за весь период боевых действий (операции, боя)? В качестве такого показателя предлагается взять «степень соотношения ресурсного потенциала воздействия УПдС оцениваемой ОТС ВН с потенциалом противостоящей группировки противника (конфликтной ОТС ВН) в зоне ответственности» или для краткости – «степень соотношения в зоне ответственности» ($\Omega_{30}^{\text{УПдС}}$).

Учитывая современный характер военных действий, ресурсный потенциал воздействия УПдС в зоне ответственности следует определять исходя из возможностей данной подсистемы по огневому поражению объектов (войск) противника, а также ее возможностей по радиоэлектронному поражению (РЭПр) радиоэлектронных средств (РЭС) конфликтной ОТС ВН. Поэтому для определения величины показателя $\Omega_{30}^{\text{УПдС}}$ предлагается использовать зависимость следующего вида:

$$\Omega_{30}^{\text{УПдС}} = \frac{\text{РПВ}_{\text{УПдС } 30}^{\text{ОП}}}{\text{ПВ}_{\text{Пр } 30}^{\text{ОТС ВН}}} \times \left(1 + \left[1 - \exp \left[- \frac{\text{РПВ}_{\text{УПдС } 30}^{\text{РЭПр РЭС}}}{\text{ПВ}_{\text{Пр } 30}^{\text{РЭС ОТС ВН}}} \right] \right] \right), \quad (1)$$

- где
- $\text{РПВ}_{\text{УПдС } 30}^{\text{ОП}}$ – ресурсный потенциал воздействия огневых формирований УПдС в зоне ответственности своей ОТС ВН;
 - $\text{ПВ}_{\text{Пр } 30}^{\text{ОТС ВН}}$ – потенциальные возможности ОТС ВН противника в зоне ответственности оцениваемой ОТС ВН в течение боевых действий (операции, боя);
 - $\text{РПВ}_{\text{УПдС } 30}^{\text{РЭПр РЭС}}$ – РПВ формирований РЭБ ударной подсистемы в зоне ответственности своей ОТС ВН;
 - $\text{ПВ}_{\text{Пр } 30}^{\text{РЭС ОТС ВН}}$ – потенциальные возможности РЭС из состава ОТС ВН противника, действующей в зоне ответственности оцениваемой ОТС ВН в течение боевых действий (операции, боя).

Из представленной зависимости видно, что показатель $\Omega_{30}^{\text{УПдС}}$ реагирует на изменения обстановки, так как зависит от возможностей анализируемой УПдС по отношению к конкретной группировке противника в течение всего оцениваемого периода (этапа) боевых действий (операции, боя), т. е. он вариативен и адекватен. Так же отметим, что величина $\Omega_{30}^{\text{УПдС}}$ сравнительно легко вычисляема и является общесистемным показателем оценивания потенциальных возможностей ударной подсистемы при определенном варианте ее построения в составе ОТС ВН. При этом величины $\text{РПВ}_{\text{УПдС } 30}^{\text{ОП}}$ и $\text{РПВ}_{\text{УПдС } 30}^{\text{РЭПрРЭС}}$, могут позиционироваться как частные показатели оценивания потенциальных возможностей рассматриваемой ударной подсистемы. Вместе с тем, показатель $\Omega_{30}^{\text{УПдС}}$ характеризует потенциальные возможности УПдС относительно группировки противника, находящейся в статическом состоянии (на занятых позициях, рубежах, районах).

Следовательно, полученный показатель не позволяет оценить потенциальные возможности УПдС в динамике антагонистических взаимоотношений с противником, а потому, при всей его важности, не может быть исчерпывающим. Данное обстоятельство обуславливает актуальность формирования системы показателей, характеризующих потенциал УПдС ОТС ВН по воздействию на конфликтную ОТС ВН при развитии обстановки в ходе боевых действий (боя, операции).

При решении озвученной задачи необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- в основе построения УПдС лежат мероприятия по определению каждому ее элементу (группе элементов) сектора (района, направления, полосы) ответственности, в пределах которого он осуществляет воздействие на объекты (войска) противника;
- зона ответственности УПдС представлена совокупностью секторов (районов, направлений, полос) ответственности отдельных элементов из ее состава.
- формирование рассматриваемых секторов (районов, направлений, полос) ответственности осуществляется в ходе последовательного распределения РПВ ударной подсистемы с целью обеспечения должного воздействия каждым ее элементом (группой элементов) в закрепленном (назначенном) пространстве.

Следуя принципу сосредоточения усилий действий войск (сил) на главном направлении, вполне логично, что РПВ ударной подсистемы между секторами (районами, направлениями, полосами) воздействия должен распределяться неравномерно.

В целом, для оценивания потенциала воздействия УПдС в динамике взаимоотношений с противником, предлагается использовать подход, аналогичный алгоритму определения «степени соотношения в зоне ответственности», т. е. возможности создаваемых секторов (районов, направлений, полос) ответственности элементов (группы элементов) УПдС при определенном варианте ее построения предлагается оценивать с применением показателя, характеризующего степень соотношения ресурсных потенциалов воздействия в этих пространствах к потенциалу воздействия охватываемой части группировки противника – $\Omega_{\text{СОк}}^{\text{УПдС}}$.

Из всего сказанного выше вполне логичным представляется значение показателя $\Omega_{\text{СОк}}^{\text{УПдС}}$ оценивать с помощью зависимости

$$\Omega_{\text{СОк}}^{\text{УПдС}} = \frac{\text{РПВ}_{\text{УПдС } \text{СОк}}^{\text{ОП}}}{\text{ПВ}_{\text{Пр } \text{СОк}}^{\text{ОТС ВН}}} \times \left(1 + \left[1 - \exp \left[- \frac{\text{РПВ}_{\text{УПдС } \text{СОк}}^{\text{РЭПр РЭС}}}{\text{ПВ}_{\text{Пр } \text{СОк}}^{\text{РЭС ОТС ВН}}} \right] \right] \right), \quad (2)$$

где $\text{РПВ}_{\text{УПдС } \text{СОк}}^{\text{ОП}}$ – РПВ огневых формирований УПдС в k -м секторе (районе, направлении, полосе) ответственности;

- $PV_{\text{Пр СОк}}^{\text{ОТС ВН}}$ – потенциальные возможности ОТС ВН противника в пространстве, охватываемом k -м сектором (районом, направлением, полосой) ответственности оцениваемой УПдС;
- $РПВ_{\text{УПдС СОк}}^{\text{РЭБ РЭС}}$ – РПВ подразделений РЭБ в составе УПдС в k -м секторе (районе, направлении, полосе) ответственности;
- $PV_{\text{Пр СОк}}^{\text{РЭС ОТС ВН}}$ – потенциальные возможности РЭС из состава ОТС ВН противника, действующие в k -м секторе (районе, направлении, полосе) ответственности.

Применение показателя $\Omega_{\text{СОк}}^{\text{УПдС}}$ позволяет сопоставлять возможности воздействия элементов (группы элементов) УПдС и противостоящих им объектов (войск) противника в ограниченном пространстве, а также оценивать достаточность потенциала сил УПдС, выделяемых для выполнения задачи в пределах конкретного сектора (района, направления, полосы) ответственности на каждом этапе боевых действий (боя, операции). Именно на базе $\Omega_{\text{СОк}}^{\text{УПдС}}$ должна формироваться схема-идея распределения РПВ оцениваемой УПдС по секторам (районам, полосам, направлениям) ответственности, а значит, данный показатель является общесистемным для оценивания «способа построения» ударной подсистемы в динамике взаимоотношений с противником.

Показатели, используемые в формульной зависимости (2) для расчета величины $\Omega_{\text{СОк}}^{\text{УПдС}}$, могут рассматриваться как частные динамичные показатели.

Опыт современных военных действий свидетельствует, что их итоги во многом определяются пространственными и временными характеристиками вооруженной борьбы конфликтующих ОТС ВН. Поэтому полноценное оценивание потенциальных возможностей УПдС при определенном варианте ее построения в динамике взаимоотношений с противостоящей группировкой без использования показателей, оценивающих сектора (полосы, направления, районы) ответственности элементов (группы элементов) данной подсистемы по пространственным и временным параметрам, не представляется возможным.

Основным показателем для пространственной характеристики определенного сектора (района, полосы, направления) ответственности может выступить степень покрытия анализируемой областью пределов территории, на которой находятся объекты противника, подлежащие воздействию со стороны оцениваемых элементов УПдС ($R_{\text{СОк}}^{\text{ВЗ}}$).

Применение показателя $R_{\text{СОк}}^{\text{ВЗ}}$ позволит ответить на вопрос: насколько тот или иной вариант построения УПдС способствует реализации принципа непрерывного воздействия данной подсистемой на противника по всей глубине расположения его объектов? Учитывая, что в основе непосредственного антагонистического воздействия ударной подсистемой на противника лежит процесс выполнения боевых задач силами и средствами огневого и радиоэлектронного поражения, можно сделать вывод, что величина показателя $R_{\text{СОк}}^{\text{ВЗ}}$ зависит:

- от пространственных показателей боевых возможностей формирований огневого и радиоэлектронного поражения УПдС, выделенных для выполнения задач в определенном (k -м) секторе (районе, полосе, направлении) ответственности;
- от параметров пространства, ограничивающего область, где размещены объекты противника, которые выполняя свои боевые задачи, должны поражаться в определенном (k -м) секторе (районе, полосе, направлении) ответственности.

Следовательно, степень $R_{\text{СОк}}^{\text{ВЗ}}$ может рассматриваться как общий показатель оценивания потенциальных возможностей УПдС при определенном варианте ее построения, величина которого формируется на основе следующих частных параметров:

- показателей, характеризующих площадь покрытия в горизонтальной плоскости интегральными реализуемыми зонами поражения (огневых средств) и радиоэлектронного подавления (функционального поражения) – для средств РЭБ k -го сектора (района, полосы,

направления) ответственности пределов территории, на которой находятся объекты противника, подлежащие воздействию со стороны оцениваемых элементов УПдС ($\delta S_{CO k}^{OP}$ и $\delta S_{CO k}^{PЭПp}$ – соответственно);

– показателя, характеризующего размеры площади горизонтального сечения пространства, на котором размещены и (или) функционируют объекты противника, подлежащие воздействию в k -м секторе (полосе, районе, направлении) ответственности оцениваемых элементов УПдС – $S_{Pr CO k}^{OTC BH}$.

При оценивании возможностей элементов УПдС, предназначенных для решения задач противовоздушной обороны, параметры указанных выше показателей вычисляются применительно к определенным (интересующим исследователя) диапазонам высот полета средств воздушного нападения противника.

Для оценивания «временных возможностей» анализируемых элементов УПдС в секторе (районе, полосе, направлении) ответственности необходим общий показатель, характеризующий способность привлекаемых сил и средств осуществлять воздействие на противника в течение определенного промежутка времени – $T_{CO k}^{B3}$. Значение данного показателя предлагается рассчитывать на основе частных показателей, характеризующих:

– возможную продолжительность осуществления огневого поражения объектов противника оцениваемыми элементами (группами элементов) в своем секторе (полосе, районе, направлении) ответственности – $T_{CO k}^{OP Pr}$;

– возможную продолжительность осуществления радиоэлектронного поражения РЭС противника оцениваемыми элементами (группами элементов) в своем секторе (полосе, районе, направлении) ответственности – $T_{CO k}^{PЭПp PЭC}$.

Анализ совокупности предложенных показателей показывает, что они имеют логические и количественные взаимосвязи и поэтому могут быть сведены в определенную систему, в которой показатели низших уровней – частные (общие), используемые для оценивания возможностей УПдС в секторах (районах, полосах, направлениях) ответственности, не противоречат показателям высших уровней – общим (общесистемным), характеризующим РПВ ударной подсистемы ОТС ВН в назначенной зоне ответственности.

Реализация предложенных в статье подходов к классификации характеристик оценивания вариантов построения УПдС ОТС ВН, определению их роли и места в синтезируемой системе показателей, способствует решению задачи целесообразного распределения сил и средств, привлекаемых для огневого и радиоэлектронного поражения объектов (войск) противостоящей группировки противника. Решив задачу формирования необходимой системы показателей, надлежит перейти к определению критерия, на основании которого будет приниматься решение о достаточности потенциальных возможностей ударной подсистемы ОТС ВН.

Учитывая цель и сущность процесса создания (построения) ударной подсистемы ОТС ВН, считаем, что при оценивании его результатов необходимо руководствоваться правилом выбора критериев, согласно которому формируемые мерилы должны иметь величину не менее допустимой и выбираться по максимальному значению из всех возможных.

Исходя из сказанного, критерии рассматриваемой процедуры должны:

– с одной стороны, отражать результаты конфликта противоборствующих систем (УПдС ОТС ВН и противостоящей группировки противника), по соотношению которых можно сделать вывод о целесообразности выбранного варианта построения оцениваемой ударной подсистемы;

– с другой стороны, определять условия достижения УПдС ОТС ВН положительного результата комплексного поражения соответствующей (назначенной) группировки (объектов) противника.

Данные условия достигаются целесообразным размещением ресурсного потенциала воздействия УПдС ОТС ВН по секторам (районам, полосам, направлениям) ответственности, обеспечивающего снижение потенциала противостоящей (конфликтной) группировки (ОТС ВН) до уровня, при котором противник теряет свою боеспособность, или, иными словами, находится в состоянии, не позволяющем ему выполнять поставленные (спланированные) задачи.

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УДАРНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В целях полноценного формирования рассматриваемого методического подхода решим задачу по обоснованию структурной схемы методики оценивания потенциальных возможностей УПдС в зависимости от вариантов их построения. В соответствии с положениями, рассмотренными ранее, можно утверждать, что в структуре интересующей нас методики можно условно выделить два этапа (рис. 1):

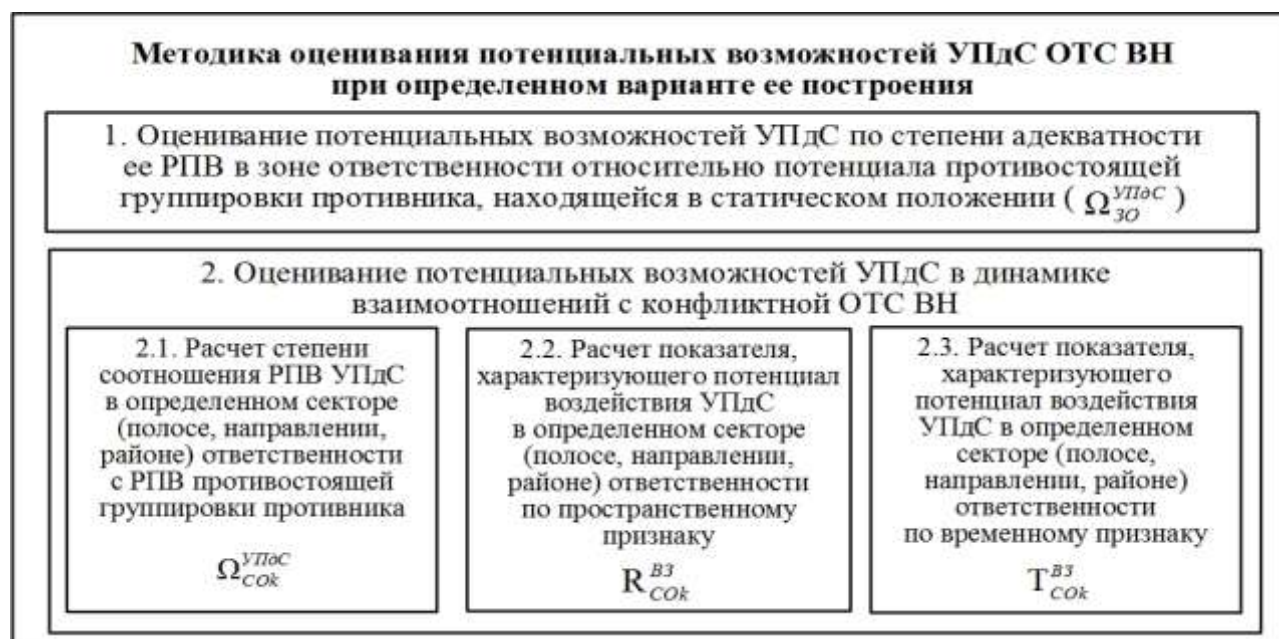


Рис. 1. Блок-схема методики оценивания потенциальных возможностей УПдС ОТС ВН при определенном варианте ее построения

– этап оценивания потенциальных возможностей УПдС по степени адекватности ее ресурсного потенциала воздействия в зоне ответственности относительно потенциала противостоящей группировки противника, находящейся в статическом положении;

– этап оценивания потенциальных возможностей УПдС по степени адекватности ее ресурсного потенциала воздействия в создаваемых секторах (полосах, направлениях, районах) ответственности относительно потенциала части группировки противника, действующей в пределах анализируемого пространства (оценивание возможностей УПдС в динамике взаимоотношений с противником).

В качестве научной основы методики, представленной на рис. 1, предлагается использовать схему оценивания, включающую в себя следующие основные компоненты:

– оценивание потенциальных возможностей УПдС при исходном порядке ее построения относительно противостоящей группировки противника;

- определение степени достаточности значений РПВ УПдС, полученных в ходе оценивания (их соответствия требуемым величинам);
- формирование факторного пространства, обуславливающего реализуемость оцениваемого варианта построения УПдС, обоснованность и достоверность результатов оценки.

Исходный порядок построения УПдС при значительном увеличении пространственных показателей современных боевых действий следует рассматривать как процедуру распределения сил данной подсистемы на ряд частных организационных элементов, представляющих собой совокупность формирований, развернутых на местности и предназначенных для огневого и радиоэлектронного поражения войск (объектов) противника в определенном секторе (полосе, районе, направлении) ответственности. Для эффективной борьбы с противником данные организационные элементы должны быть функционально достаточными, т. е. обладать возможностями реализовывать, при необходимости, самостоятельно (автономно) весь перечень функций, составляющих содержание боевых действий.

Потребность реализации второго компонента используемой схемы оценивания обуславливает необходимость применения в предлагаемой методике совокупности критериев, по сравнению с которыми будет определяться соответствие полученных результатов (при реализации того или иного варианта построения УПдС) требуемым значениям.

Реализуемость оцениваемого варианта построения УПдС, обоснованность и достоверность получаемых результатов обуславливаются:

- корректным выбором допущений, ограничений и исходных данных, используемых в ходе оценивания;
- полнотой учета факторов, влияющих на процесс распределения сил и средств УПдС, за счет применения совокупности показателей, адекватно характеризующих анализируемую процедуру;
- использованием аргументированного математического аппарата, с помощью которого предусматривается получать численные значения показателей.

В интересах достижения последнего из перечисленных условий авторами статьи предлагается комплексная методика оценивания потенциальных возможностей УПдС ОТС ВН в зависимости от варианта ее построения, структурная схема которой представлена на рис. 2.

В блоке 1 предлагаемой методики на основе анализа боевой задачи оцениваемой ОТС ВН определяются состав и расположение ее основных элементов, а также пространственные и временные показатели предстоящих боевых действий (операции, боя).

В блоке 2 на основе учета замысла построения ОТС ВН в целом, других внешних и внутренних факторов определяется вариант построения ударной подсистемы ОТС ВН. Настоящий вариант позволяет сформировать совокупность исходных данных (постоянных и переменных), используемых в последующем для вычисления РПВ УПдС в зоне ответственности.

Постоянные исходные данные вводятся заблаговременно и в ходе оценивания не корректируются. Они включают сведения о количественном составе УПдС и данные о тактико-технических характеристиках огневых средств и средств радиоэлектронной борьбы.

Переменные исходные данные вводятся в ходе решения задачи оценивания и включают:

- сведения о состоянии и структуре формирований, входящих в состав УПдС;
- качественную характеристику сил УПдС (показатели, характеризующие боевую готовность, уровни возможных потерь, возможности по восстановлению и т. д.);
- возможности сил противостоящей группировки противника по выполнению своих функциональных задач и др.

В блоке 3 формируется вариант действий противостоящей группировки противника, на основе которого в последующем определяются потенциальные возможности ОТС ВН противника в зоне ответственности оцениваемой ОТС ВН в течение боевых действий (операции, боя) – ПВ^{ОТС ВН}_{Пр 30}.

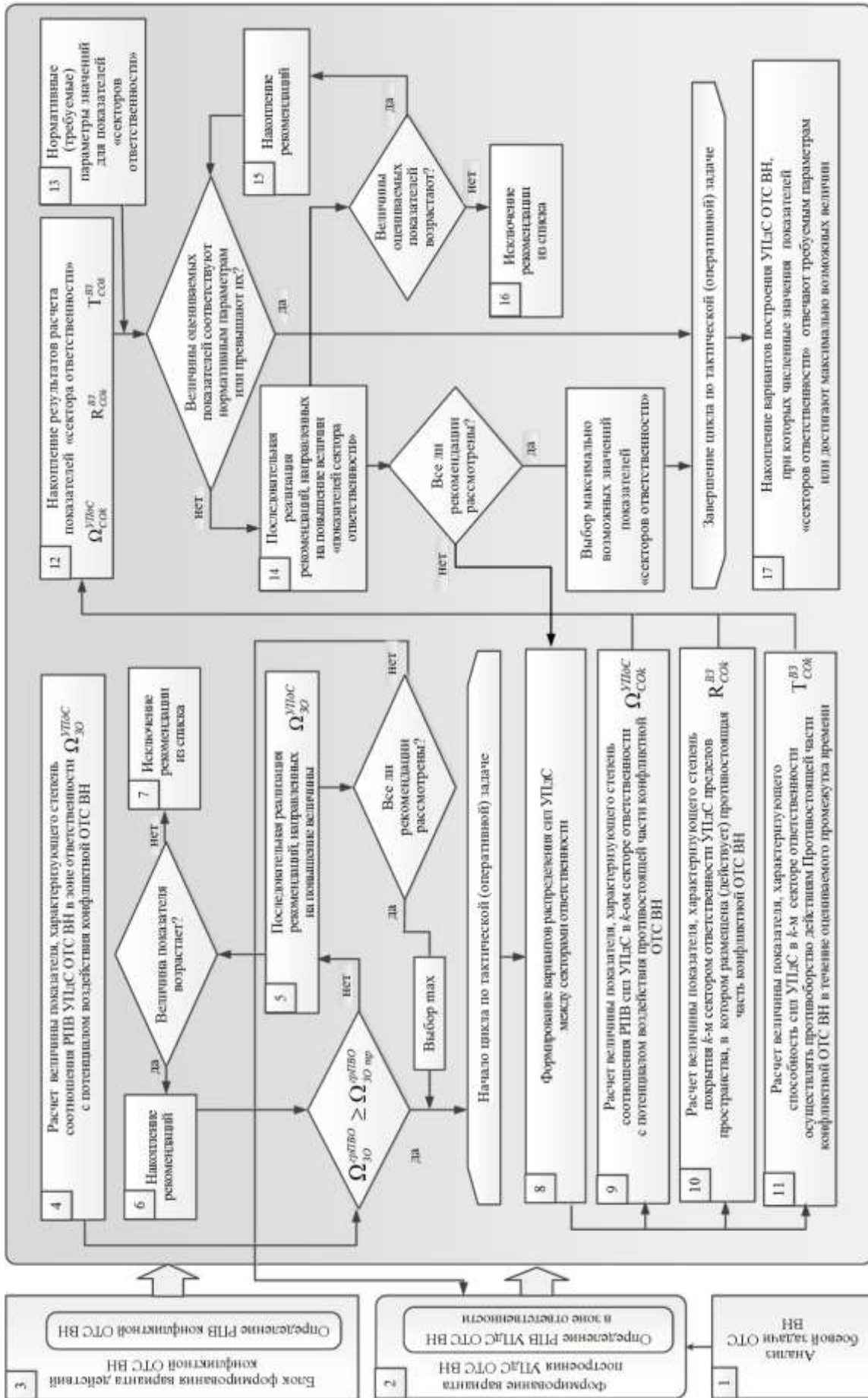


Рис. 2. Структурная схема комплексной методики оценивания потенциальных возможностей УПДС ОТС ВН при различных вариантах ее построения

В последующем, в блоке 4, определяется величина показателя, характеризующего степень соотношения ресурсного потенциала воздействия УПдС оцениваемой ОТС ВН с потенциалом противостоящей группировки противника (конфликтной ОТС ВН) в зоне ответственности – $\Omega_{30}^{УПдС}$.

Для получения представления о достаточности возможностей УПдС в предстоящих боевых действиях (операции, бою), а именно на начальной фазе построения ударной подсистемы, численное значение показателя $\Omega_{30}^{УПдС}$ сравнивается с требуемой величиной ($\Omega_{30\text{ тр}}^{УПдС}$). Вполне очевидно, что соответствующая достаточность будет достигаться при выполнении условия

$$\Omega_{30}^{УПдС} \geq \Omega_{30\text{ тр}}^{УПдС}. \quad (3)$$

В случае невыполнения условия, выраженного зависимостью (3), уже на начальном этапе построения (формирования) ударной подсистемы становится понятно, что в интересах комплексного поражения противостоящей группировки противника необходимо либо наращивать РПВ УПдС, либо снижать потенциал конфликтной ОТС ВН иными мерами, например, увеличением объема задач, решаемых в рамках боевого обеспечения. В случае установления факта недостижимости условия (3) необходимо руководствоваться правилом выбора критерия оценивания, согласно которому из всех полученных значений оцениваемого целевого показателя выбирается максимально возможное.

Исходя из вышесказанного, в блоке 5 в случае невыполнения критериального условия (3) проводится формирование рекомендации по повышению величины $\Omega_{30}^{УПдС}$ и последующий расчет анализируемого показателя с учетом ее реализации. Далее, в случае позитивного изменения величины показателя $\Omega_{30}^{УПдС}$, сформированная рекомендация накапливается в блоке 6, а в случае негативного изменения она исключается из соответствующего списка (блок 7). Формирование (выработка) рекомендаций осуществляется в рамках существующих (установленных) ресурсных ограничений до выполнения критериального условия. При невозможности достижения этого условия выбирается перечень рекомендаций, при реализации которых достигается максимально возможное значение показателя $\Omega_{30}^{УПдС}$.

Опираясь на данные, которые были получены в блоке 4, исследователь, в зависимости от условий обстановки и задач, поставленных старшим начальником, определяет возможное количество секторов (полос, районов, направлений) ответственности, формируемых оцениваемой ударной подсистемы ($K_{СО}^{УПдС}$), а также осуществляет распределение сил УПдС между создаваемыми пространствами ответственности.

Определение величины $K_{СО}^{УПдС}$ осуществляется с использованием выражения

$$K_{СО}^{УПдС} = \max \left\{ K^{ОП\ УПдС}; K^{РЭПр\ УПдС} \right\}, \quad (4)$$

где $K^{ОП\ УПдС}$ – количество расчетных операций, обусловленных зависимостью

$$\begin{aligned} & РПВ_{УПдС\ 30}^{ОП} - РПВ_{УПдС\ СО1}^{ОП} - ПВ_{УПдС\ СО2}^{ОП} - ПВ_{УПдС\ СО3}^{ОП} - \dots \\ & \dots - ПВ_{УПдС\ СО\ k}^{ОП} \approx 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$K^{РЭПр\ УПдС}$ – количество расчетных операций, обусловленных зависимостью

$$\begin{aligned} & РПВ_{УПдС\ 30}^{РЭПр\ РЭС} - РПВ_{УПдС\ СО1}^{РЭПр\ РЭС} - РПВ_{УПдС\ СО2}^{РЭПр\ РЭС} - РПВ_{УПдС\ СО3}^{РЭПр\ РЭС} - \dots \\ & \dots - РПВ_{УПдС\ СО\ k}^{РЭПр\ РЭС} \approx 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты расчетов, проведенные в блоке 4, а также величина $K_{CO}^{УПдС}$, полученная в блоке 8, позволяют перейти к решению научной задачи, связанной с определением основных показателей, характеризующих возможности УПдС по комплексному поражению элементов противоборствующей стороны в определенных секторах (полосах, направлениях, районах) ответственности. К данным показателям следует отнести характеристики, которые заключены в модулях 2.1–2.3 на рис. 1 (показатели $\Omega_{COk}^{УПдС}$, R_{COk}^{B3} и T_{COk}^{B3}).

Расчеты показателей $\Omega_{COk}^{УПдС}$, R_{COk}^{B3} и T_{COk}^{B3} предполагается проводить с помощью соответствующих частных методик (блоки 9, 10 и 11 комплексной методики), разработка которых выходит за рамки настоящей статьи. При этом расчет показателей, характеризующих возможности УПдС по комплексному поражению противостоящей группировки противника в установленных пространствах ответственности, надлежит осуществлять применительно к определенным промежуткам времени, ограничиваемым периодами выполнения тактических (оперативных) задач, совокупность которых формирует содержание боевых действий (операции, боя).

Блок 12 предназначен для накопления результатов расчетов показателей $\Omega_{COk}^{УПдС}$, R_{COk}^{B3} и T_{COk}^{B3} .

В блоке 13 формируются нормативные данные, на основании которых определяются требуемые значения для основных показателей, характеризующих возможности УПдС по комплексному поражению противостоящей группировки противника в установленных пространствах ответственности (значения $\Omega_{COk}^{УПдС\ тр}$, $R_{COk}^{B3\ тр}$ и $T_{COk}^{B3\ тр}$). В дальнейшем требуемые значения показателей используются для анализа соответствия величин $\Omega_{COk}^{УПдС}$, R_{COk}^{B3} и T_{COk}^{B3} необходимому уровню на основе выполнения критериальных условий:

$$\Omega_{COk}^{УПдС} \geq \Omega_{COk}^{УПдС\ тр} \geq 1; \quad (7)$$

$$R_{COk}^{B3} \geq R_{COk}^{B3\ тр} \geq 1; \quad (8)$$

$$T_{COk}^{B3} \geq T_{COk}^{B3\ тр} \geq T_{COk}^{T3(O3)}. \quad (9)$$

Требование к величине показателя T_{COk}^{B3} формируется путем сравнения времени выполнения задачи силами УПдС, предназначенными для поражения противостоящей группировки противника в k -м секторе (полосе, районе, направлении) ответственности со временем отдельно взятого этапа (тактической или оперативной задачи) боевых действий (боя, операции) – $T_{COk}^{T3(O3)}$.

Если признаки, описываемые зависимостями (7)–(9), не соблюдаются, исследователь действует согласно алгоритму, который применяется при не выполнении критериального условия (3) в рамках реализации блоков 14, 15 и 16. Основными направлениями повышения величин $\Omega_{COk}^{УПдС}$, R_{COk}^{B3} и T_{COk}^{B3} являются:

– наращивание количества сил и средств УПдС, привлекаемых к комплексному поражению войск (объектов) противника в определенном секторе (полосе, районе, направлении) ответственности;

– увеличение возможностей организационных элементов УПдС по поражению войск (объектов) противника за счет их оснащения средствами, обладающими более высоким потенциалом по решению возложенных на них боевых задач;

– правильное распределение имеющегося РПВ УПдС между создаваемыми секторами (районами, полосами, направлениями) ответственности, в том числе и за счет планирования реализации более рациональных форм и способов применения подчиненных сил и средств.

В последующем, в блоке 17, осуществляется накопление вариантов построения УПдС оцениваемой ОТС ВН, при которых численные значения основных показателей, характеризующих возможности ударной подсистемы по комплексному поражению противостоящей группировки противника в определенных пространствах ответственности, отвечают требованиям (достигают максимально возможных величин).

В целом, анализ комплексной методики, представленной на рис. 2, показывает, что она может служить инструментом для определения потенциальных возможностей ударной подсистемы ОТС ВН в зависимости от варианта ее построения. При этом завершенность предложенной методики предусматривает разработку, но уже вне рамок настоящей статьи, детальных подходов к определению численных величин частных показателей, используемых в зависимостях (1) и (2).

Учитывая содержание и логико-временное соотношение этапов, характеризующих функционирование сложных организационно-технических систем (этап построения и этап применения), можно заключить следующее. Результаты оценивания потенциала УПдС, обусловленного вариантом ее построения, полученные с использованием комплексной методики (рис. 2), формируют определенное объективное факторное пространство (совокупность актуальных исходных данных), в рамках которого надлежит в последующем проводить оценивание уже эффективности применения (действий) ударной подсистемы ОТС ВН в ходе ведения боевых действий (боя, операции).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке методического подхода к оцениванию возможностей организационно-технических систем военного назначения по комплексному воздействию на противника усилия авторов статьи были сосредоточены на получении адекватного алгоритма оценивания потенциала УПдС в зависимости от варианта ее построения, базирующегося на использовании комплекса показателей.

Реализация предлагаемой методики предусматривает разделение процедуры оценивания на два взаимозависимых этапа (см. рис. 1). На первом этапе оценивание производится с использованием показателей зоны ответственности ударной подсистемы, характеризующих взаимоотношение УПдС ОТСВ ВН с противостоящей группировкой противника, находящейся в статичном состоянии (на занятых рубежах, позициях, районах и т. д.). На втором этапе с задействованием показателей оценивания секторов (районов, полос, направлений) ответственности элементов (групп элементов) ударной подсистемы осуществляются расчеты, итоги которых характеризуют динамику взаимоотношений УПдС с объектами противника, развернутых и (или) действующих в пределах рассматриваемого пространства.

В целом, предложенный в статье методический подход, включающий систему показателей оценивания возможностей ударной подсистемы в зависимости от вариантов ее построения, а также методику расчета этих характеристик, надлежит рассматривать как инструмент для формирования объективного факторного пространства (совокупность исходных данных, касающихся потенциала анализируемой УПдС по поражению войск и объектов противника), в рамках которого надлежит проводить последующее оценивание эффективности применения (боевых действий) рассматриваемой организационно-технической системы военного назначения.

Список используемых источников

1. Дульнев П.А., Колесниченко А.П., Котов А.В. Системный анализ общевойскового боя: монография. – М.: Издательский дом «Граница», 2018. – 271 с.
2. Основы победы в бою: учеб. пособие / В.В. Герасимов [и др.]. – М.: ВА ГШ ВС РФ, 2017. – 22 с.
3. Философия: курс лекций / В.Л. Калашников [и др.]. – М.: ВЛАДОС, 1999. – 384 с.
4. Философский энциклопедический словарь. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 576 с.

В.А. Новиков,
доктор военных наук, профессор;
Д.М. Попов,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ РАБОТЫ ШТАБА ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОИНСКИХ ФОРМИРОВАНИЙ

В статье рассматривается методика обоснования рекомендаций по совершенствованию работы штаба при принятии решения и планировании применения воинских формирований. Применение предлагаемой методики основывается на математических методах ориентированных гиперграфов. Представлены основные возможности предлагаемой методики на примере формирования множества допустимых процедур, выполняемых в ходе выработки замысла применения воинского формирования тактического уровня. Описаны возможные ограничения на выполняемые процедуры, а также способы их графического отображения.

Ключевые слова: принятие решения на применение воинских формирований, планирование применения воинских формирований, ориентированные гиперграфы.

ВВЕДЕНИЕ

Применение воинских формирований осуществляется на основе принятого соответствующим командиром решения. В последующем производится детальная проработка принятого решения – планирование применения воинских формирований. В настоящее время состав и последовательность операций, выполняемых командиром и штабом при принятии решения и планировании, достаточно жестко регламентирована руководящими документами. В тоже время мы сталкиваемся с постоянным развитием и внедрением новых форм и способов вооруженной борьбы, что безусловно требует соответствующей адаптации процесса принятия решения и планирования применения.

С целью адаптации к новым условиям процесс принятия решения и планирования применения воинских формирований постоянно наполняется новыми операциями, информационно-расчетными задачами и процедурами. Реализация всех указанных процедур позволяет добиться того, что принятое решение и план применения воинского формирования будут в полной мере соответствовать обстановке. В то же время может возникнуть некоторая избыточность выполняемых штабом работ в виду отсутствия необходимости реализации ряда операций. Данное обстоятельство указывает на необходимость совершенствования процесса принятия решения и планирования применения воинских формирований за счет выбора необходимого набора операций и удаления невостребованных, а также составления рациональной последовательности их выполнения.

Предположим, что существует N возможных операций, реализуемых в ходе процесса принятия решения и планирования применения воинских формирований, для которых имеется M возможных вариантов последовательности их выполнения. Исходя из этого можем определить количество существующих альтернатив работы командира и штаба – M^N . Большинство из полученных альтернатив будут нереализуемыми по ряду ограничений. В практике работы штабов используется подход, предполагающий формирование нескольких вариантов работы с последующим выбором из них рационального по заданному критерию. Несмотря на всю его очевидные достоинства, данный подход не лишен ряда недостатков. Один из них заключается в отсутствии возможности анализа всех возможных альтернатив, что позволяет

говорить лишь о выборе лучшего из предложенных, а не о рациональном варианте из полного множества альтернатив.

В случае применения соответствующих методов и методик, становится возможным формирование множества допустимых альтернатив с последующим их анализом. Учитывая вышесказанное, задача полного множества допустимых альтернатив работы штаба при принятии решения и планировании применения воинских формирований является актуальной. В данной статье рассматривается возможный способ решения этой задачи.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ МНОЖЕСТВА ДОПУСТИМЫХ АЛЬТЕРНАТИВ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ШТАБА ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОИНСКИХ ФОРМИРОВАНИЙ

Одним из возможных способов решения задач данного вида является применение математических методов теории графов. При реализации данного подхода осуществляется построение графа взаимосвязей между операциями и процедурами. На основе определенных связей определяются альтернативы организации работы штаба при принятии решения и планировании применения воинских формирований.

Граф функциональных связей является содержательной и интересной моделью. Она полноценно может использоваться для получения многих задач структурного анализа и синтеза структур сложных систем, которым и является процесс принятия решения и планирования применения воинских формирований. В то же время с ее помощью не удастся получить точное описание условий реализации операций и процедур, поскольку обычный граф не содержит сведений о возможных взаимных вариантах связей, задающих определенность в их последовательном выполнении.

Для решения данной задачи предлагается использовать гиперграф функциональных связей. Его возможно сформировать учитывая ряд правил. Вершины гиперграфа описывают полное множество операций, процедур и информационно-расчетных задач, выполняемых в ходе принятия решения и планирования применения. В свою очередь гиперребра представляют минимальные, по заданным ограничениям, группы выполняемых операций [1]. Такими группами могут быть совокупности операций, процедур, а также информационно-расчетные задачи, взаимные ограничения которых полностью определены. Исходя из этого, гиперребро, описывающее совокупность ограничений, называется минимальным, если изъятие любой операции и процедуры из его состава нарушает свойство их функциональной целостности. Поскольку граф и гиперграф функциональных связей имеют общее множество вершин, то в ряде случаев возможно их совместное отображение.

Для решения задачи формирования полного множества допустимых альтернатив организации работы штаба при принятии решения и планировании применения воинских формирований была разработана методика, в основе реализации которой лежит использование аппарата гиперграфов. Структурная схема предлагаемой методики изображена на рис. 1.

Рассмотрим основные этапы реализации методики. Первым этапом реализации методики является задание системы ограничений работы штаба на выполняемые операции. Таковыми являются ограничения, определяющие:

- строгую последовательность выполнения операций;
- условия строгой одновременности выполнения операций;
- условия строгой недопустимости одновременного выполнения операций.

На втором этапе осуществляется формирование гиперграфа ограничений. В отличие от обычного графа связи (ребра) в гиперграфе могут соединять две и более вершины. Множество вершин гиперграфа, соответствующих какой-либо связи, делится на подмножество входных вершин и подмножество выходных вершин. В рассматриваемом процессе принятия решения и планирования применения воинских формирований гиперграф может быть задан

на двух непересекающихся множествах: N – вершин (выполняемых операций) и M – ребер (ограничений на их выполнение), на элементах которых задана пара двухместных предикатов-отношений инцидентности $\Gamma_1(N, M)$ и $\Gamma_2(M, N)$ [1]:

$$H_M(N, M, \Gamma_1, \Gamma_2), \exists m_j \in M (|\Gamma_1 m_j| + |\Gamma_2 m_j|) > 2.$$

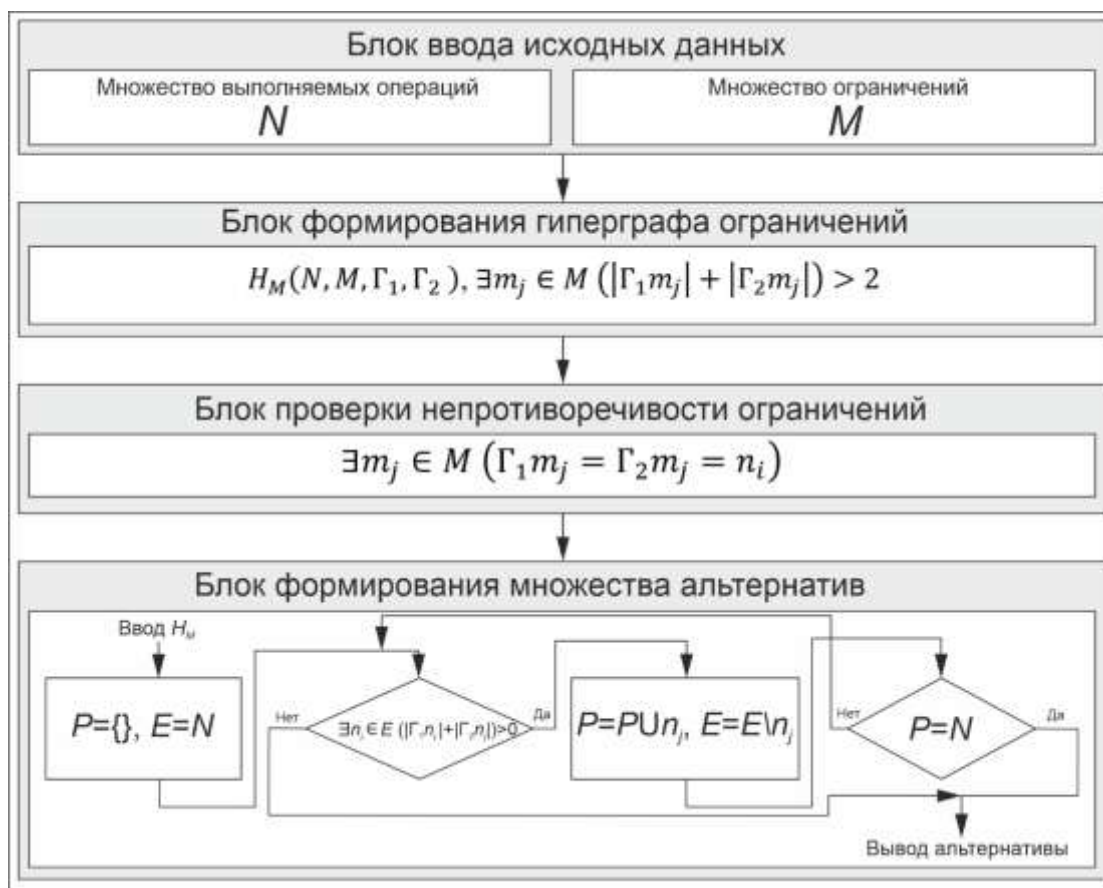


Рис. 1. Методика построения множества допустимых альтернатив работы командира и штаба при принятии решения и планировании применения воинских формирований

Представим ориентированный гиперграф ограничений набором вершин (входных и выходных), а также объединяющих их гиперсвязей (рис. 2). К подмножеству вершин N относятся вершины (операции) $1, 2, \dots, i-1, i, i+1, \dots, N-1, N$, входящие в полный перечень возможных операций (процедур), выполняемых при принятии решения и планировании применения воинских формирований тактического уровня. К подмножеству ограничений M относятся A, B, C, D, E, F . К подмножеству входных вершин T относятся вершины $1, 2, 3, 4, 5, i-1, N-1, N$ (эти вершины имеют исходящие гиперсвязи). К множеству выходных вершин R относятся вершины $2, 3, 5, i, i+1$ (эти вершины имеют входящие гиперсвязи). Также необходимо учитывать возможность взаимного пересечения подмножеств входных и выходных вершин.

Например, гиперсвязь (ограничение) $A = \{\{1, 2\}, \{5\}\}$ означает, что операция (процедура) 1 может быть выполнена с операцией (процедурой) 2 как совместно, так и последовательно, а выполнение операции (процедуры) 5 невозможно, причем порядок выполнения $\{1, 2\}$ или $\{2, 1\}$ не имеет существенного значения. Также не представляется возможным выполнить две операции (процедуры), требующие выполнения между ними другой операции (процедуры). Например, указанное ограничение запретит последовательность выполнения операций 1425, 4231i5, т. е. тех, в которых операция 5 выполняется после операций 1 и 2.

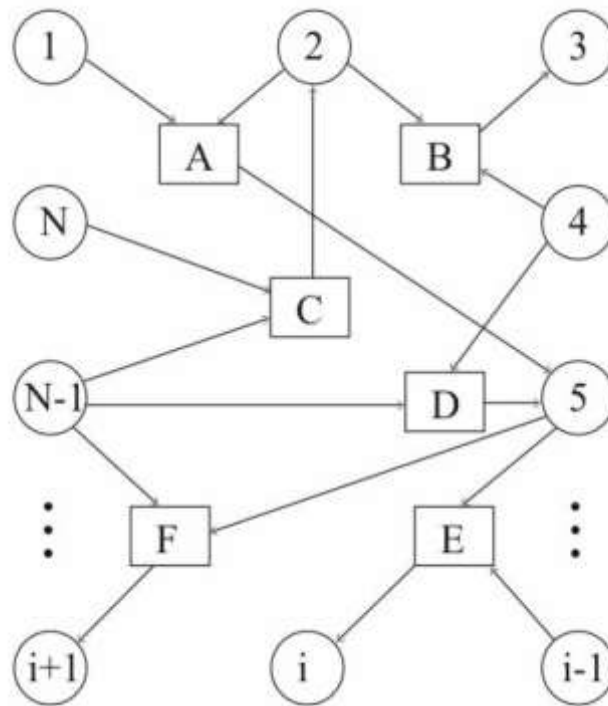


Рис. 2. Ориентированный гиперграф ограничений выполнения операций в ходе процесса принятия решения и планирования применения воинских формирований

Необходимо отметить, что гиперграф ограничений не имеет возможность отобразить последовательность выполнения операций. Заданные ограничения используются для удаления нереализуемых вариантов при формировании допустимого множества альтернатив командира и штаба. Таким образом, каждая гиперсвязь ограничений обозначает, что «если ранее были выбраны варианты T , выбор вариантов из R запрещен, заданная последовательность выполнения операций – невозможна».

Третьим этапом реализации методики является проверка непротиворечивости системы ограничений на выполнение операций. Система ограничений является непротиворечивой, если сформированное на ее основе множество альтернатив не является пустым. Проверка непротиворечивости отмечает противоречивые связи, выделяя места, нуждающиеся в корректировке. Основным признаком существования противоречий является наличие у гиперграфа одного или более циклов.

Четвертым этапом реализации методики является непосредственное формирование множеств допустимых альтернатив. Таковыми множествами являются множество допустимых альтернатив $P = \{ \}$ и множество оставшихся альтернатив $E = N$ [2].

Последовательно производится выборка элемента $n \in E$. Далее осуществляется сверка с исходным гиперграфом ограничений. Если существует один из предикатов Γ_1, Γ_2 (т. е. операция недопустима), выбирается следующий элемент из E , иначе (операция допустима) элемент n переносится в P и шаг повторяется. Если $P = N$, то фиксируется допустимая альтернатива выполнения операций (процедур).

В случае завершения перебора всех элементов E или $P = N$, принимается решение о том, что элемент, записанный в P в предыдущей итерации переносится обратно в E и производится выборка последующего элемента из E . Процесс заканчивается в случае, если переносимый в E элемент является последним в множествах N и P .

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ МНОЖЕСТВА ДОПУСТИМЫХ АЛЬТЕРНАТИВ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ШТАБА ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОИНСКИХ ФОРМИРОВАНИЙ

Рассмотрим практическое применение предлагаемой методики для одного из этапов принятия решения и планирования применения воинских формирований – оценка воздушного противника. Он задается следующим множеством операций:

операция 1 – определение аэродромов базирования средств воздушного нападения (СВН) противника;

операция 2 – определение типов и количества СВН противника;

операция 3 – расчет рубежей досягаемости СВН противника с аэродромов базирования;

операция 4 – определение типов средств поражения, доставляемых СВН для уничтожения объектов воинского формирования;

операция 5 – определение перечня объектов воинского формирования;

операция 6 – расчет требуемого количества СВН для уничтожения объектов воинского формирования;

операция 7 – определение объектов воинского формирования, по которым возможно воздействие СВН противника;

операция 8 – расчет требуемого количества средств поражения, для уничтожения объектов воинского формирования.

Данные операции обладают некоторым набором функциональных связей, что позволяет сформировать на их основе граф, вершинами которого является указанное множество операций, а ребрами – множество функциональных связей между ними (рис. 3).

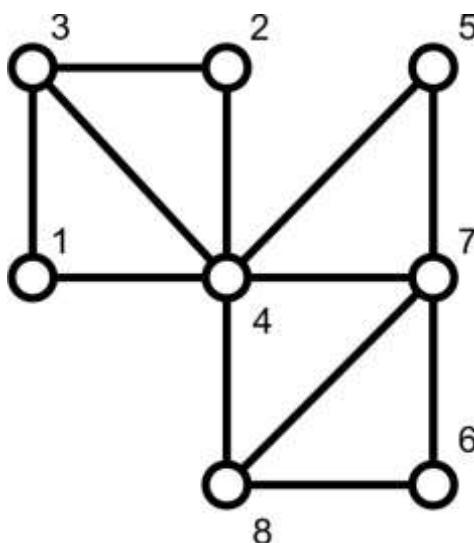


Рис. 3. Граф функциональных связей между операциями и процедурами, выполняемыми в ходе оценки воздушного противника

Следующим этапом реализации предлагаемой методики является определение минимальных, по заданным ограничениям, групп выполняемых операций. Для определения минимальных групп выполняемых операций необходимо определить ограничения на выполняемые операции. Таковыми ограничениями являются:

– для расчета рубежей досягаемости СВН противника необходима информация об аэродромах базирования и размещаемых на них СВН;

– для определения объектов, по которым возможно воздействие СВН противника, необходима информация обо всех объектах, рубежах досягаемости СВН и типах средств поражения, доставляемых ими;

– для определения типов средств поражения, доставляемых СВН для уничтожения объектов воинского формирования, необходима информация о СВН и объектах воинского формирования, подлежащего уничтожению;

– для расчета потребного количества СВН для уничтожения объектов воинского формирования необходима информация об объектах, по которым возможно воздействие СВН противника, потребное количество средств поражения, необходимое для уничтожения одного объекта, и количество средств поражения, доставляемых одним СВН.

Гиперграф функциональных ограничений, заданный указанным множеством ограничений будет иметь вид, представленный на рис. 4.

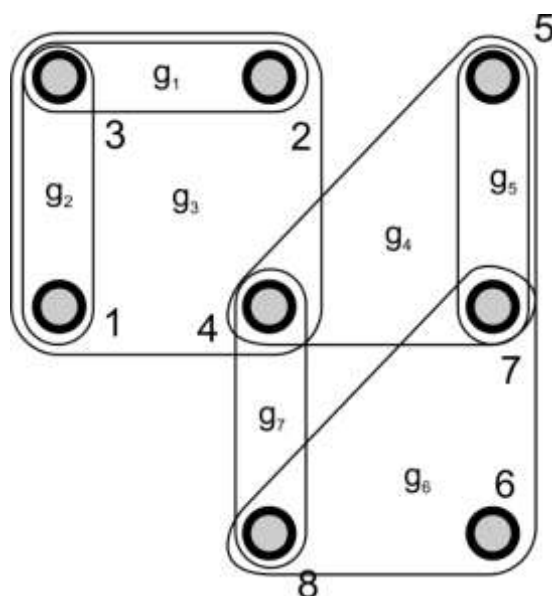


Рис. 4. Гиперграф функциональных ограничений между операциями и процедурами, выполняемыми в ходе оценки воздушного противника

Формирование множества возможных допустимых альтернатив организации работы штаба при принятии решения и планировании применения воинских формирований осуществляется последовательным стягиванием гиперребер, имеющих кратность, равную двум. Данную кратность имеют гиперребра, соединяющие только две вершины. Процедура стягивания значительно упрощает гиперграф, так как число его связей сокращается и уменьшается кратность инцидентных гиперребер [1]. Примером завершеного процесса служит гиперграф, стянутый в точку, а последовательность стягиваний дает описание очередности выполняемых операций. На рис. 5 показан возможный вариант стягивания гиперграфа $g_1 \rightarrow g_2 \rightarrow g_3 \rightarrow g_5 \rightarrow g_7 \rightarrow g_4 \rightarrow g_6$, задающий последовательность выполнения операций: $2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6$. Так же возможны другие варианты стягивания гиперграфа, задающие соответствующие последовательности выполнения операций при оценке воздушного противника (табл. 1).

Данные последовательности отражают полное множество возможных последовательностей выполнения операций при оценке воздушного противника. Выбор рационального варианта осуществляется в соответствии с заданными критериями. Таковыми могут быть суммарное время выполнения операций, максимальное число одновременно задействованных должностных лиц штаба и др.

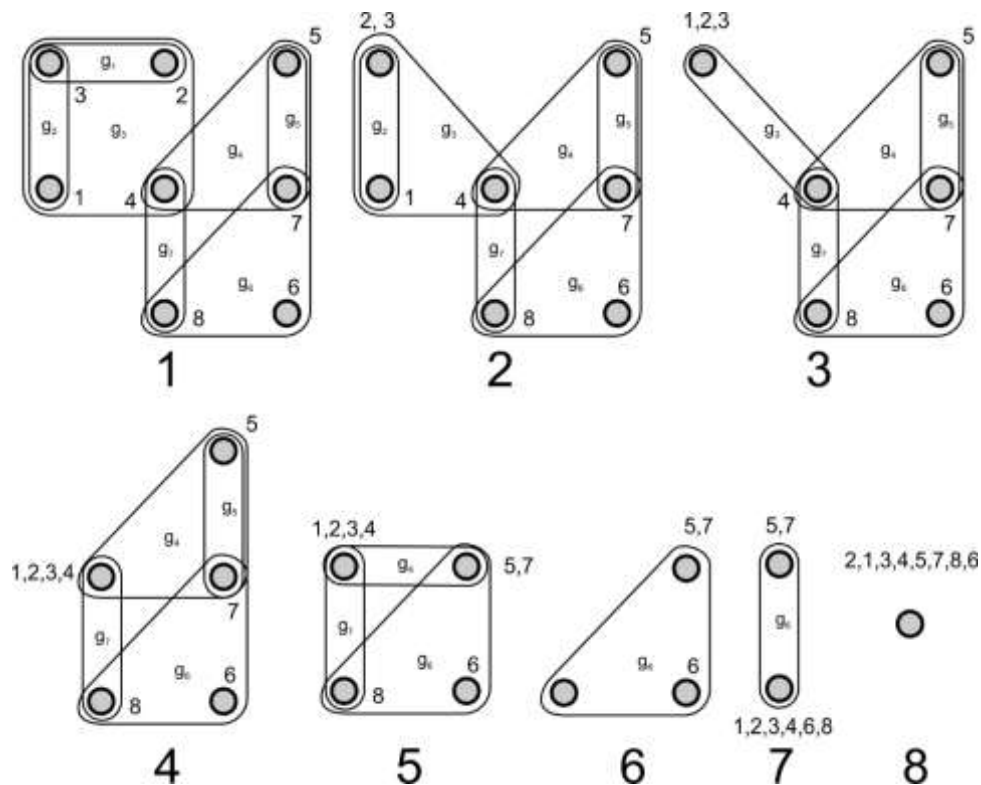


Рис. 5. Последовательность стягивания гиперграфа функциональных ограничений между операциями и процедурами, выполняемыми в ходе оценки воздушного противника

Таблица 1

**Варианты стягивания гиперграфа ограничений
и задаваемые ими последовательности выполнения операций**

№ п/п	Последовательность стягивания гиперграфа	Задаваемая последовательность выполнения операций
1	$g_1 \rightarrow g_2 \rightarrow g_3 \rightarrow g_5 \rightarrow g_7 \rightarrow g_4 \rightarrow g_6$	$2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6$
2	$g_2 \rightarrow g_1 \rightarrow g_3 \rightarrow g_5 \rightarrow g_7 \rightarrow g_4 \rightarrow g_6$	$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6$
3	$g_5 \rightarrow g_2 \rightarrow g_1 \rightarrow g_3 \rightarrow g_7 \rightarrow g_4 \rightarrow g_6$	$5 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6$
4	$g_5 \rightarrow g_1 \rightarrow g_2 \rightarrow g_3 \rightarrow g_7 \rightarrow g_4 \rightarrow g_6$	$5 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6$
5	$g_1 \rightarrow g_2 \rightarrow g_3 \rightarrow g_5 \rightarrow g_4 \rightarrow g_7 \rightarrow g_6$	$2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 6$
6	$g_2 \rightarrow g_1 \rightarrow g_3 \rightarrow g_5 \rightarrow g_4 \rightarrow g_7 \rightarrow g_6$	$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 6$
7	$g_5 \rightarrow g_2 \rightarrow g_1 \rightarrow g_3 \rightarrow g_4 \rightarrow g_7 \rightarrow g_6$	$5 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 6$
8	$g_5 \rightarrow g_1 \rightarrow g_2 \rightarrow g_3 \rightarrow g_4 \rightarrow g_7 \rightarrow g_6$	$5 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 6$

Аналогичным образом осуществляется формирование множества альтернатив работы командира и штаба для остальных процессов, выполняемых в ходе принятия решения и планирования применения воинских формирований.

Предлагаемая методика является методической основой для обоснования рекомендаций по совершенствованию работы должностных лиц органа управления при принятии решения и планировании применения воинских формирований. Сформированные способы организации работы должностных лиц управления оцениваются по совокупности соответствующих

показателей. Выбор рационального способа осуществляется в соответствии с принятым критерием оценивания эффективности работы должностных лиц органа управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассматривается методика формирования множества допустимых альтернатив организации работы штаба при принятии решения и планировании применения воинских формирований. Применение предлагаемой методики основывается на математических методах ориентированных гиперграфов. Представлены основные возможности предлагаемой методики на примере формирования множества допустимых процедур, выполняемых в ходе выработки замысла применения воинского формирования тактического уровня. Описаны возможные ограничения на выполняемые процедуры, а также способы их графического отображения.

Использование математических методов ориентированных гиперграфов ограничений, позволяет значительно снизить трудоемкость решения задач формирования множества допустимых альтернатив организации работы штаба в ходе принятия решения и планирования применения воинских формирований, что в итоге повысит оперативность управления. Кроме того, представлены ее основные возможности на примере построения множества допустимых последовательностей операций, выполняемых в ходе формирования замысла применения воинского формирования, описаны возможные ограничения и способы их графического отображения.

Список используемых источников

1. *Овчинников В.А.* Графы в задачах анализа и синтеза структур сложных систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 423 с.
2. *Болотина И.А., Круглов П.В., Тарасов В.А.* Метод формирований совокупности допустимых вариантов сборки изделий на основе применения ориентированных гиперграфов // Наука и образование: электрон. научн. журн. – 2012. – № 2. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/339658.html> (дата обращения: 12.07.2021).

Avksentyev A.A., Dinzhos R.I., Lizan V.M. Method of solving spacecraft interorbital flight tasks by terminal guidance using visible direction line corrections // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 7–15.

The method is based on the corrections of the cosmic object line of vising direction. The cosmic object observed from the spacecraft board. The line of vising direction is correcting according to the prognosis terminal errors. Comparison of guidance quality without correction and with correction is made. Statistical calculations were carried out, taking into account the dynamics of the longitudinal and rotational motion, the effects of the frequency of obtaining measurement results and their errors, restrictions on operation values, effects of the non-centrality gravitation field, applying in the control algorithms only onboard parameters. Average and maximal errors are calculated. The conclusions about the expedience of application and features of the terminal guidance method are made.

Key words: terminal guidance, spacecraft, mathematical modeling, line of vising.

Atamas A.S., Atarshchikov A.N., Kukushkin M.A. Methodological approach to the development of a decision by the commander in the course of managing mobile organizational and technical systems for military purposes in a dynamically changing environment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 16–26.

A methodical approach to decision-making by the commander is proposed during the management of mobile organizational and technical systems for military purposes (OTS (M)) in a dynamically changing environment, taking into account the state of the road network, terrain, as well as simultaneously acting means of optoelectronic and radar reconnaissance of the enemy on the route and means of enemy radio-technical reconnaissance, when the OTS (M) is working on radiation. The application of the methodological approach developed by the authors, based on the promptly received information about changes in the environment, allows us to prepare proposals for the commander's decision in the shortest possible time in order to increase the survivability of the OTS (M).

Key words: development of solutions by the commander, mobile organizational and technical systems for military purposes, increased survivability, dynamically changing environment.

Vlasov V.A., Radionov N.V., Yahvarov E.K. Application of operations research methods for solving the problems of estimating the optimum volumes of financing development of space weapons and equipment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 27–37.

The proposed article examines the model and technical and economic aspects of creating samples of space weapons and equipment. The formulation of the technical and economic task of integer programming of the assessment in complex military-economic systems (at the middle and upper levels of the hierarchy) of the economic effect determined by models of the "cost-result" or "cost-effect" type, provided that the possible technical characteristics of the system are maximized. The ways of its solution with linear and exponential dependence on the parameters of the system are proposed. The adequacy of the power dependence of the quality function of the military-economic system in the optimal cost function has been substantiated.

Key words: military-economic system, financing of the development of weapons and military equipment, the upper level of the hierarchy, the efficiency standard of V.V. Novozhilov, the random value of discounting strategies, method of economic analogue, efficiency standard.

Improving the efficiency of information processing in the space monitoring system based on CUDA technology / A.I. Zakharov, A.I. Zimovets, I.A. Molodkin, K.A. Neretina, A.D. Homonenko

// Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 38–44.

The use of the CUDA technology (parallel programming with the use of graphic processors) to increase the efficiency of information processing in the space monitoring system is considered. The influence of parallelization on the computational speed is estimated by the example of solving the problem of determining the motion parameters of a space object using the numerical integration of differential equations by the Runge Kutta method of the 4th order. Numerical data on the acceleration of parallel computations on a graphics processing unit (GPU) as compared to parallel computations on a central processing unit (CPU) are presented. The required conditions for the organization of parallel processing of information in the monitoring system of outer space, under which an increase in the efficiency of information processing with the use of a graphics processor, is achieved.

Key words: information processing, Runge Kutta method, multiprocessor systems, parallel programming, graphic processors.

Alsayed S., Efimov V.V. Correction method for strapdown inertial navigation system of unmanned aerial vehicle based on neural network approximation of navigation measurement errors // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 45–51.

A method is proposed for correcting the errors of a strapdown inertial navigation system (SINS) of an unmanned aerial vehicle (UAV) in the interest of increasing the autonomy of the functioning of an integrated inertial-satellite navigation system (IISNS) in conditions of electronic warfare (EW) of satellite navigation channels. The method is based on the construction of a SINS error model using neural-like networks (NN), trained according to the navigation parameters generated by the ISNS at the stage before the use of EW means. The functional structure of the IISNS with the neural network approximator of the SINS errors is presented.

Key words: approximation of errors, unmanned aerial vehicle, strapdown inertial navigation system, neural network.

Methodology for estimating the ready coefficient of the radio linking of airline-lifting vehicle on the flight route / S.O. Burlakov, S.S. Kuznetsov, D.V. Levanov, K.U. Tsvetkov, A.G. Shadrin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 52–60.

The article discusses the link with the flight-lifting device as a set of satellite and radio relay communication lines. It is proposed to evaluate the shielding of several Fresnel zones. A method for assessing the availability factor on a flight route is presented, which allows one to estimate the availability factor in a short time interval, commensurate with the duration of a communication session, and set the task of choosing a rational mode of its operation. An example of calculation is given.

Key words: flight-lifting device, flight route, reference line, observation interval, signal attenuation, bit error probability, availability factor.

Voznuk V.V., Galandzovskiy A.V., Komlyk D.A. Output of the refined energy ratio for radio channels with broadband signals // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 61–69.

The output of refined energy relations for radio communication lines with broadband signals is presented. For a more accurate calculation of the main energy parameters of radio communication lines with wide-band signals, the broadband coefficient of the signal is taken into account, in the form of the ratio of the bandwidth of the spectrum of this signal to its central or carrier frequency, which allows correcting the error in calculating the power of the considered types of signals that occurs when using known energy ratios.

Key words: broadband signal, broadband coefficient, energy ratio, communication radio line.

Zvonarev V.V., 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, 2021. – Release 679. – P. 70–80.

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.

Kulikov M.V., Sagalaev M.P. Methods of the radio masking Earth communication satellite stations location // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 81–86.

Methods of deliberate protection (masking) of Earth stations of satellite communication from TDOA location are proposed, based on the emission the time-shifted copies of this signal synchronously with the main signal to the satellites and on the emission the noise-like signals with high time resolution synchronously with the main signal in the directions of the main and mirror satellites too. The results of the implementation of the developed methods of radio masking of satellite stations, confirmed by mathematical modeling and natural experiments, are presented.

Key words: heolocation, TDOA, radio masking, satellite communication station.

Lisickii V.V., Pankov B.B. Methodology for monitoring the energy parameters of real-time information-measurement systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 87–93.

The presented technique is intended for monitoring the energy parameters of real-time information-measurement systems using mathematical apparatus of ordinal statistics theory.

Key words: energy potential, effective scattering area, transmitter power, receiver noises, information-measurement system, majority conversion.

Alyohin S.G., Ivanov R.D., Shemelov V.A. Training model for an intelligent system for the collection and processing of meteorological information on board unmanned aerial vehicles // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 94–99.

The issues of machine training on the example of an-board intelligent system for collecting and processing meteorological information for unmanned aerial vehicles are considered. A Bayesian-based learning model has been proposed.

Key words: intelligent system, artificial intelligence, machine-learning models, meteorological information.

The results of determining the division price of the gravimeter GNY-KV counting device on the reference gravimetric polygon / K.K. Zhanov, D.D. Kolesnikov, D.O. Medyanikov, D.V. Sergeev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 100–105.

The article provides a description and results of the work on the determining the price of the division of relative gravimeters of terrestrial narrow-band with a quartz sensitive system on a reference gravimetric polygon (Irkutsk city), carried out by a research group MSA named after A.F. Mozhaisky.

Key words: reference, the price of dividing the counting device, gravimeter.

Abasheva I.V. The model of structural and semantic features of the sources of news text content of telecommunications networks, taking into account the features of linguistic interference // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 106–114.

The analysis of the features of the phenomenon of linguistic interference in the interests of forming a set of informative features that take into account the peculiarities of writing texts by non-native speakers of the Russian language. The results of a statistical study of the supposed informative signs of recognition of negative content distributed by foreign-language authors under the conditions of their use of masking elements are presented.

Key words: linguistic interference, informational impact, negative content.

Abasheva I.V., Alekseev V.N., Zharkov D.A. Trends of complicating methods of protection against "recovery" of passwords from hash codes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 115–121.

The article discusses the main ways of "recovering" passwords from hash codes, their classification, principles of operation, the complication of hash codes countering the existing methods of "recovering" steam leaks, as well as a modern and promising method of protection.

Key words: recovery, password, hash code, hash functions, hash code with salt.

Afanasev A.O., Pilkevich S.V. Features of perception of text content on web-pages // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 122–127.

The publication is devoted to the problem of placing controls on web pages. The purpose of the research is to determine the parameters of text content that characterize the degree of attracting the attention of a personal computer user when they familiarize themselves with the content of web pages. The experiments made it possible to instrumentally record the characteristics of visual perception of the subjects, depending on the type and location of controls on web pages.

Key words: textual content, the eye tracker, videooculography, the tipping point, the area of attention.

Approach to malware analysis using multiclass classification / A.A. Kriulin, V.S. Nefedov, G.Y. Poterpeev, V.I. Yakunin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 128–136.

An approach to the formation of malware classes using syntactic analysis of the results of scanning by antivirus tools and the use of machine learning algorithms in determining the malware class is presented, which allows you to systematize and integrate the new knowledge gained into the process of ensuring the security of information objects of the information infrastructure. The classification of malicious programs using the random forest algorithm and the support vector method is proposed. In contrast to the existing approach, it uses averaged macro and micro indicators to evaluate the accuracy of algorithms for different classes of malware.

Key words: computer attack, malicious software, executable file, machine learning algorithm, multiclass classification, classifier, support vector method.

Approach to profiling adversary's behavior based on executed tactics, techniques and procedures of computer attacks / V.A. Ovcharov, I.A. Solovyov, N.A. Trofimova, A.F. Shinkarenko //

Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 137–148.

The article presents an approach for build, test, and refine behavioral-based adversary model for determining the composition of current threats to the network infrastructure. The analytical process of identifying and profiling the adversary's behavior used in relation to the target information and telecommunications network can be used to develop means to increase its security.

Key words: adversary emulation, behavioral-based model, adversary's profile, Cyber Games.

Absalyamov D.R., Senchenkov V.I. Formation of the set of controlled parameters of special technical systems based on the theory of orthogonal transformations // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 149–162.

Methodical and mathematical schemes for the formation of the set of informative (controlled) parameters of special technical systems of rocket-space complexes during interval condition control are presented. The content of the schemes consists in processing the trajectories of the output parameters of the system using the theory of orthogonal transformations. The choice of the controlled parameters as an ordered set of coefficients of the decomposition of trajectories into partial sums of the Fourier series based on orthogonal algebraic bases is substantiated. An approach to the approximation of trajectories by partial sums of the Fourier series using the orthogonal Legendre basis is proposed, which is modified for use at any time intervals of control the technical condition. An improved method for determining the power of the set of controlled parameters is developed. A numerical procedure is presented for finding the values of the controlled parameters in the decomposition of trajectories, the analytical form of which is unknown.

The results of processing the trajectory of one of the physical quantities that characterize the functioning of special technical systems, and setting on this basis the set of controlled parameters, are shown.

Key words: interval control of technical condition, partial sums of the Fourier-Legendre series, orthogonal algebraic basis, mean square convergence.

Arseniev V.N., Baluev S.Y., Belichin E.N. Method of identification parameters of on-board optoelectronic device with a centroid algorithm for image processing of point radiation sources // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 163–172.

The problem of identifying the parameters of an on-board optoelectronic device, which uses an algorithm for calculating the energy center of images of point radiation sources in a cluster of pixels of a matrix optical radiation receiver, is considered. The features, advantages and disadvantages of this algorithm are noted when solving problems of determining the image centers of point radiation sources using space observation equipment. A method is proposed for determining the values of the parameters of the on-board optoelectronic means that provide the required accuracy of trajectory measurements of the parameters of the orbits of observed space objects (SO) by the method of space triangulation in different double-view zones (DVZ).

Key words: on-board optoelectronic devices, space object, measurement accuracy, space triangulation method, double-view zones, centroid algorithm.

Astankov A.M., Golovchinskaya N.V., Mironenkov O.V. Method definition of optimal complexing methods of a set of means and methods of nondestructive control during diagnostic measures on ground space infrastructure facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 173–184.

Mathematical models have been developed for solving problems on the optimal integration of a set of tools and methods of non-destructive testing for assessing the technical state of typical units

of the launch complex of the rocket-space complex based on the sim-plex method and the generalized decreasing gradient method. A comparative analysis of the efficiency of using the discrete programming method, the simplex method and the generalized descending gradient method in solving such problems is carried out. Using a practical example, the advantages of the simplex method and the generalized lowering gradient method over the discrete programming method are shown when solving the direct and inverse problem of optimal integration of non-destructive testing tools and methods.

Key words: integration, non-destructive testing methods, optimization, discrete programming, simplex method, generalized decreasing gradient method.

Bashilov A.I., Okorokov M.V., Suchoruchenkov B.I. Method of evaluating the dynamics of indicators reliability of the restored technical systems based on the results of a limited testing period // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 185–192.

The article proposes a method for improving the accuracy of statistical estimation of variable reliability indicators (PB) of restored technical systems of rocket and space technology based on the results of testing. The method is based on the use of a mathematical model of the dynamics of the failure rate of the restored technical systems, taking into account possible undetected (hidden) defects and the statistical method of unbiased estimates, which provides a higher accuracy of estimating the reliability indicators of technical systems based on the results of a limited testing period.

Key words: the restored technical system, the dynamics of reliability indicators, the probability density of estimates, the method of unbiased estimates.

Vedernikov M.V., Stepanova K.A., Syrcsov L.A. Heat transfer modeling with a radioparent dome using // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 193–199.

A methodology for heat transfer modeling with a radioparent dome using is proposed. The mathematical model of heat transfer at the surface of RD is developed. Calculation of heat transfer on the surface of radioparent dome of hypothetical RD is made.

Key words: heat transfer, mathematical model, heat transfer coefficient, similarity criteria.

Velikiy Z.S., Shakmaev I.V. Method of calculating the specific thrust impulse of the main propulsion system of the «Fregat» upper stage // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 200–209.

A method for calculating the specific thrust impulse of the main propulsion system of the Fregat upper stage is proposed. Other methods of calculating the specific thrust impulse were analyzed. The features that impose limitations on the application of the proposed methodology are revealed. The method is illustrated by graphs of the engine operation on several inclusions, the specific thrust impulse in these sections is estimated and conclusions are made. A table is constructed for ten starts with finding the average values.

Key words: specific thrust impulse, propulsion system, real-time analysis, efficiency.

Kazantsev D.I., Karytko A.A., Karytko E.S. A method for predicting the load of a computing system based on a recurrent lstm network with an attention layer // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 210–220.

The results of solving the problem of forecasting time series characterizing the load of a server-class computing system based on multidimensional data are presented. To solve the problem, the mathematical apparatus of recurrent LSTM networks is used. Three variants of neural network

architecture are considered: without using the attention layer, using the attention layer based on the softmax function, as well as using the attention layer based on the convolutional neural network. The article presents the results of a computational experiment conducted on the basis of statistical information collected by the zabbix computer systems and networks monitoring system. The results obtained can be used in systems of dynamic configuration of hardware resources distributed by a hypervisor between multiple virtual machines.

Key words: LSTM-network, computing system, time series, neural network attention.

Kozlov V.V., Lagun A.V., Syrov A.D. Solving the problem of reducing the destructive impact on the elements of the launch device and the launch structure during the launch of the launch vehicle // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 221–231.

The article outlines the role of the launch equipment as part of the launch complex. A thermal calculation of the metal plating of a gas reflector when exposed to a gas jet of combustion products of a space rocket propulsion system and subsequent cooling is carried out. The results of modeling thermal deformations are shown. The influence of thermal loading on metal plating has been evaluated. A method has been developed and described to reduce the destructive effect on the elements of the starting equipment of the gas jet of the combustion products of the propulsion system by creating a film water curtain.

Key words: gas dynamic loads, thermal loads, space rocket, propulsion system, launchers, gas reflector.

Korbut V.A., Mishchenko V.I., Novikov A.N. Model of the formation the cost of operation of radio-electronic means rocket-space defense // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 232–242.

The article addresses issues of ensuring the basic model operation of radio-electronic means rocket-space defense, taking into account not only the frequency and duration of maintenance, but also the reliability of controlling the technical condition conducted within the framework of service. The results of the analysis of the nature effect of reliability controlling the parameters of the technical condition of system for the duration of operation the object of operation in one of many possible states, taking into account the specifics of the operation of radio electronic tool and cosmic defense, used in constructing a model of the function of main parameters of the operation system, are presented. The results of study of the base model are applied in constructing analytical dependences of formation the cost of operation of radio-electronic means rocket-space defense, which make it possible to investigate the impact of the characteristics the process of operation on the total costs.

Key words: model of operation process, coefficient of readiness, accuracy of control, regenerating the process of functioning of the technical system, the conditional probability of failure detection, the amount of total costs.

Slatov V.L., Sokolova T.V., Farafonov A.V. Creation of the special shape «equipment» of ssc of a series resident of «Mozhaets» // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 243–249.

In article experience of creation of the onboard equipment of the small spacecrafts "Residents of Mozhaisk-4" and "Mo-zhayets-5" developed in Military space academy of A.F. Mozhaysky is described. The detailed description, the principles of work and also drawings of components of the developed equipment, function and electric circuits are provided. Material of article can be useful when developing elements of the onboard and special equipment of small spacecrafts.

Key words: small spacecraft, onboard equipment, equipment of industrial automation, photodetector, microcontroller, power supply, impulse.

The using of weight-lifting in power training of a student of a logistics university - as a condition of professional longevity of a military specialist / A.S. Berezin, A.N. Martyshev, M.S. Fedotov, A.A. Shaposhnikov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 250–254.

The article discusses the mechanism for extending the professional longevity of logistics specialists of the Ministry of Defense of the Russian Federation. The negative factors of the military-professional activity of this category of servicemen are described. A thorough analysis of the level of strength preparedness of candidates for the positions of future logistics specialists was carried out and the main reason for its decline was considered. As an increase in the level of strength readiness as a basic physical quality and its long-term preservation during the period of professional activity, an effective complex of physical exercises with weights is proposed. The advantages of using the proposed set of exercises in the process of forming the strength training of a cadet - a future specialist in the rear profile are presented.

Key words: candidates entering universities of the Ministry of Defense of the Russian Federation, cadets of a rear university, physical activity, physical inactivity, analysis of strength readiness, means of kettlebell lifting.

Vaskevich V.M., Vaskevich N.V. Intensification of engineering graphics training at a military university based on the information computer technologies // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 255–259.

The article examines the experience of intensifying the training of cadets in a military university, reveals the relevance of the tasks solved by engineering graphics, its role in the development of students.

Approaches in the application of information computer technologies in the study of the discipline Engineering Graphics at the A.F. Mozhaisky VKA are described.

Key words: engineering graphics, intensive training technologies, information computer technologies, cadets.

Dulishkin R.M., Inysheva E.A., Kasavtsev M.Y. On the results of a pedagogical experiment to improve the efficiency of cadets readiness for service in a dress using a computer program // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 260–264.

A pedagogical experiment is considered, the purpose of which is to improve the methodology of training cadets and increase the efficiency and quality of practical training in the section "General Military regulations of the Armed Forces of the Russian Federation" of the module "General Military training". The main results of the experiment are considered.

Key words: methodology of training cadets, quality of practical training, training software package of the automated place of preparation of daily dress, pedagogical experiment.

Erofeev A.V., Katicik V.O. Methodological and organizational aspects of the use of information technologies in conducting tactical and special exercises // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 265–270.

The article analyzes the possible causes of emergency situations when a separate command-measuring complex performs tasks as intended. Methodological methods of actions of training at crews in practical classes are proposed, which contribute to the adoption of decisions by students in accordance with the current documents and instructions during the preparation and conduct of a control session of a spacecraft in an emergency situation.

Key words: contingency, decision-making method, time schedule, combat crew, control session, external factors, spacecraft, ground control complex.

Markina M.K., Osipova I.V., Sakhno I.V. The features of construction, application and development directions of the space troops samples training facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 271–280.

The article discusses the features of the construction and application of educational and training facilities, taking into account the specifics of space systems and facilities. The classification, the typical structure of educational and training facilities is given. Proposals for the implementation of educational and training tools with modeling functions and performance indicators are formulated.

Key words: educational and training tool, simulator, software and methodological complex, training complex, geographically distributed objects of VVST KV.

Skvaznikov M.A., Torshina I.P. Principles of preserving the fundamental training of a specialist in development of basic professional educational programs // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 281–287.

The article analyzes changes in the structure of the basic professional educational program caused by the change of state educational standards of higher education in the specialty “Electronic and optoelectronic devices and system for special purposes”. The main tendencies of changes in the architecture of educational program for training specialists in the field of data collection and processing of remote sensing of the Earth over the past ten years are revealed.

The basic principles of preserving the fundamentality of training profiles within the specialties of higher education are formulated. Resistant cardinal characteristics of basic educational programs have been determined. The possibility of developing multidisciplinary basic professional educational program within the framework of one specialty is shown.

Key words: specialty of higher education, educational standard, basic professional educational program, training profile, graduate competence.

Paukov A.B. Normative consolidation of gross disciplinary misconduct as a legal means of ensuring information security of military personnel // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 288–291.

The publication examines the composition of a gross disciplinary offense established by decree of the President of the Russian Federation No. 308 of may 6, 2020, which is expressed in violation of the military's legal prohibitions on the dissemination of information in the media that harms the interests of military service. The conflict between the right of citizens to freedom of information enshrined in the legislation and the legal ban on the publication of information related to official activities in the media, established for military personnel, is resolved.

Key words: military discipline, gross disciplinary misconduct, prohibitions, information, harm to the interests of military service, mass media, Internet, information security.

Seredenko V.M., Seredenko G.E. On the issue of substantiating the psychological conditions for ensuring the reliability of the moral-political and psychological state of deputy commanders of units for military-political work // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 292–296.

The article shows the essence of the concepts of reliability and the moral-political and psychological state of the officers-political workers. The substantiation of the psychological conditions for ensuring the reliability of the moral-political and psychological state of deputy commanders of units for military-political work is given, special attention is paid to the disclosure of these conditions.

Key words: political officer, psychological conditions, moral-political and psychological state, military-political work, reliability.

Grigoryev K.L., Kozlov Y.V., Ponomarev D.Y. Substantiation of proposals for improving the quality of planning for the use of ground-based technical means for controlling the orbital grouping of spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 297–306.

The article suggests a direction for improving the planning of the use of ground-based technical means of spacecraft control and justifies a multi-criteria approach that uses previously ignored performance indicators of the control process. In the proposed approach, solving the problem of multi-criteria uncertainty makes it possible to increase the efficiency of the spacecraft grouping management process.

Key words: planning of the use of ground-based technical controls for spacecraft, performance criterion.

Kazakhov B.D., Popov D.M. Methodological approach to assessing the potential capabilities of organizational and technical systems for military purposes in terms of complex impact on the enemy // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 307–319.

The paper considers a methodological approach to assessing the potential capabilities of organizational and technical systems for military purposes in terms of complex impact on the enemy. The selection and substantiation of indicators and a criterion for assessing the potential capabilities of organizational and technical systems for military purposes in terms of complex impact on the enemy have been carried out. A methodology has been developed for assessing the potential capabilities of the strike subsystem of the organizational and technical system for military purposes.

Key words: organizational and technical system, shock subsystem, complex impact.

Novikov V.A., Popov D.M. Methods of forming a set of permissible alternatives for organizing the work of the staff in making decisions and planning the use of military units // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 320–327.

The article discusses the method of forming a set of feasible alternatives for organizing staff work when making decisions and planning the use of military formations, the implementation of which is based on the use of mathematical tools of constrained hypergraphs, which significantly reduces the complexity of problem solving. It shows the main features of the example of constructing the set of allowable sequences of operations performed during the formation of the idea of the use of military formation, describes the possible limitations and how to graphically display them.

Key words: making decisions on the use of military formations, planning the use of military formations, oriented hypergraphs.

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

Абсалямов Дамир Расимович, начальник 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 268-15-33, e-mail: vka@mil.ru

Авксентьев Александр Алексеевич, старший научный сотрудник 21-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-21.

Алексеев Валерий Николаевич, начальник отдела войсковой части 74455 (Россия, Москва, К-160); тел.: 8 (499) 215-65-65, e-mail: alexVN@rambler.ru

Алёхин Сергей Григорьевич, начальник 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Альсаед Саид, адъюнкт 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Арсеньев Владимир Николаевич, профессор 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 262-02-22, e-mail: vka@mil.ru

Астанков Алексей Михайлович, начальник 143-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 980-73-21, e-mail: aam21012831@gmail.com

Атамас Алексей Сергеевич, слушатель отделения подготовки специалистов с ВВОТП Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (964) 290-83-23, e-mail: vka@mil.ru

Атарщиков Александр Николаевич, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (981) 896-81-71, e-mail: vka@mil.ru

Афанасьев Антон Олегович, курсант 661/3-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 105-59-39, e-mail: antona.98@mail.ru

Балуев Сергей Юрьевич, заместитель начальника 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 992-65-14, e-mail: vka@mil.ru

Башилов Александр Иванович, заместитель генерального директора АО «Корпорация «Московский институт теплотехники» по качеству (127273, Россия, Москва, ул. Березовая аллея, 10); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (903) 219-44-54.

Белихин Евгений Николаевич, инженер 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 731-58-80, e-mail: vka@mil.ru

Березин Алексей Сергеевич, старший помощник начальника отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Бурлаков Сергей Олегович, профессор кафедры военных систем космической радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 907-79-34, e-mail: soburlakov@yandex.ru

Васкевич Виктор Михайлович, доцент 110-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (981) 148-95-59, e-mail: vvm2006@mail.ru

Васкевич Нэлли Владимировна, старший преподаватель 110-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.); тел.: 8 (911) 956-89-48, e-mail: nelli_1975@mail.ru

Ведерников Михаил Васильевич, доцент 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 242-55-26, e-mail: m-wedernikow@mail.ru

Великий Захар Сергеевич, инженер-испытатель войсковой части 75117 (164170, Россия, Архангельская область, Мирный-12); тел.: 8 (921) 721-09-92, e-mail: vezase81@googlemail.com

Власов Вячеслав Александрович, доцент 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.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 (812) 347-95-35.

Галандзовский Алексей Викторович, старший преподаватель 37-й кафедры – начальник радиоэлектронной борьбы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-35.

Головчинская Наталья Владимировна, научный сотрудник 142-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (911) 839-30-57, e-mail: gvoseverples1@ramber.ru

Григорьев Кирилл Леонидович, преподаватель 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 237-93-72.

Динжос Роман Игоревич, адъюнкт 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-21.

Дулишкин Руслан Михайлович, инженер отдела (автоматизированных систем учета) Управления учета военнослужащих (Главного управления кадров Министерства обороны Российской Федерации) (125284, Россия, Москва, 1-й Хорошевский проезд, 3).

Ерофеев Алексей Васильевич, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (911) 981-21-74.

Ефимов Владимир Васильевич, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

Жарков Дмитрий Алексеевич, начальник группы войсковой части 74455 (Россия, Москва, К-160); тел.: 8 (499) 215-65-65, e-mail: zharaDA@rambler.ru

Жбанов Константин Константинович, адъюнкт 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Захаров Анатолий Иванович, доцент 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 743-10-96, e-mail: vka@mail.ru

Звонарев Виталий Валерьевич, начальник 233-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 254-58-70, e-mail: zvonarev.v.v@yandex.ru

Зимовец Алена Игоревна, младший научный сотрудник 473-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 743-10-96, e-mail: vka@mail.ru

Иванов Роман Дмитриевич, помощник начальника отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-95-19, e-mail: vka@mil.ru

Инюшева Елена Александровна, доцент 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-29.

Казанцев Денис Иванович, начальник отдела информационных технологий Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.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 (911) 200-44-95.

Карытко Анатолий Александрович, старший преподаватель 95-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; e-mail: vka@mil.ru

Карытко Екатерина Сергеевна, инженер войсковой части 28289 (142409, Россия, Московской обл., Ногинск-9).

Касавцев Михаил Юрьевич, старший преподаватель 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-29.

Кацик Владимир Олегович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 447-55-09.

Козлов Владимир Владимирович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof.kozlov@yandex.ru

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) 237-93-72.

Колесников Денис Дмитриевич, преподаватель 73-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: vka-onr@mil.ru

Комлык Дмитрий Александрович, адъюнкт 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35.

Корбут Валентин Анатольевич, начальник 129-го военного представительства Министерства обороны Российской Федерации (196143, Россия, Санкт-Петербург, ул. Орджоникидзе, 42); тел.: 8 (921) 182-73-78, e-mail: tubrok@mail.ru

Криулин Артур Андреевич, доцент кафедры прикладных информационных технологий Российского технологического университета (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20); кандидат технических наук; тел.: 8 (927) 348-89-39, e-mail: kriulin1905@bk.ru

Кузнецов Сергей Сергеевич, соискатель кафедры военных систем космической радиорелейной, тропосферной связи и навигации Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); тел.: 8 (926) 451-87-42, e-mail: Kuznetsov_ss80@mail.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 (921) 754-04-28, e-mail: vka@mil.ru

Куликов Максим Владимирович, докторант 45-й кафедры (информационно-аналитической работы и иностранных армий) Военной академии связи (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 205-56-80, e-mail: mr.maximus85@mail.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.

Леванов Денис Владимирович, адъюнкт 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931) 244-93-24, e-mail: dane76@list.ru

Лизан Вячеслав Миронович, младший научный сотрудник 172-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Лисицкий Владимир Вадимович, начальник 81-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.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

Мартышев Андрей Николаевич, преподаватель кафедры физической подготовки Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева МО РФ (198504, Россия, Санкт-Петербург, г. Петергоф, ул. Суворовская, 1); тел.: 8 (921) 970-07-48; e-mail: kudotibr47@yandex.ru

Медяников Даниил Олегович, начальник 162-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Мироненков Олег Вячеславович, научный сотрудник 143-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат химических наук; тел.: 8 (961) 647-23-13, e-mail: mironenkov70@gmail.com

Мищенко Владимир Ильич, профессор 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (920) 663-82-04, e-mail: mishtchenko@mail.ru

Молодкин Игорь Андреевич, аспирант Петербургского государственного университета путей сообщения (190031, Россия, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 113); тел.: 8 (906) 226-44-04, email: molodkin@pgups.ru

Неретина Кристина Андреевна, инженер 531-й учебной лаборатории 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (962) 692-58-15, email: vka@mail.ru

Нефедов Владимир Сергеевич, доцент кафедры прикладных информационных технологий Российского технологического университета (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 547-21-24, e-mail: nefedov_9090@mail.ru

Новиков Александр Николаевич, доцент 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (904) 602-04-83, e-mail: novallol@mail.ru

Новиков Владимир Александрович, профессор 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (911) 200-44-95.

Овчаров Владимир Александрович, начальник 31-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 237-10-21.

Окороков Максим Владимирович, докторант кафедры баллистических ракет Военной академии РВСН имени Петра Великого (143900, Россия, Московская обл., Балашиха, ул. Карбышева, 8); кандидат технических наук; тел.: 8 (999) 873-02-20, e-mail: okorokovm00@mail.ru

Осипова Ирина Викторовна, младший научный сотрудник 111-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 191-69-88, e-mail: osipova.irisha.spb@gmail.com

Панков Борис Борисович, адъюнкт 81-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

Пауков Александр Борисович, профессор 108-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (981) 170-44-50.

Пилькевич Сергей Владимирович, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 955-89-00, e-mail: ambers@list.ru

Пименов Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 22-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 (960) 280-23-77, e-mail: pimvikf@yandex.ru

Пономарев Дмитрий Юрьевич, преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-93-72.

Попов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник 231-й лаборатории 23-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 (961) 806-26-58, e-mail: arahar@mail.ru

Попов Дмитрий Митрофанович, старший преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (909) 587-05-52.

Потерпеев Герман Юрьевич, доцент кафедры прикладных информационных технологий Российского технологического университета (107076, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20); кандидат технических наук; тел.: 8 (916) 821-19-25, e-mail: gуро@mail.ru

Радионов Николай Васильевич, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор экономических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Сагалаев Михаил Петрович, соискатель ученой степени докторант 45-й кафедры (информационно-аналитической работы и иностранных армий) Военной академии связи, начальник отдела ООО «СТЦ» (195220, Россия, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21, лит.Б, офис 53); тел.: 8 (962) 695-18-92, e-mail: micsag@mail.ru

Сахно Игорь Викторович, начальник 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) 210-08-82, e-mail: is_33@mail.ru

Сеньченков Валентин Иванович, профессор 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 250-60-79, e-mail: vka@mil.ru

Сергеев Дмитрий Викторович, начальник 163-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 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Середенко Владимир Михайлович, старший преподаватель 40-й кафедры (дальневосточных языков) Военного университета Министерства обороны РФ (123001, Россия, Москва, ул. Б. Садовая, 14); кандидат филологических наук; тел.: 8 (915) 022-46-06, e-mail: ichi210@mail.ru

Середенко Галина Евгеньевна, адъюнкт 23-й кафедры (военно-политической работы) Военного университета Министерства обороны РФ (123001, Россия, Москва, ул. Б. Садовая, 14); тел.: 8 (985) 119-15-22, e-mail: g.e.seredenko@mail.ru

Сквазников Михаил Алексеевич, доцент 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: vka@mil.ru

Слатов Валерий Леонидович, старший научный сотрудник 133-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 937-19-61, e-mail: Slatov65@mail.ru

Соколова Татьяна Владимировна, младший научный сотрудник 131-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 703-95-21, e-mail: Tatusic90@mail.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.

Степанова Ксения Андреевна, инженер-исследователь факультета систем управления и радиотехники Университета ИТМО (197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49); кандидат технических наук; тел.: 8 (931) 007-76-11, e-mail: ledy.xs93@yandex.ru

Сухорученков Борис Иванович, профессор кафедры баллистических ракет Военной академии РВСН имени Петра Великого (143900, Россия, Московская обл., Балашиха, ул. Карбышева, 8); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (909) 979-25-14.

Сыров Артем Дмитриевич, курсант 15-го курса Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (922) 021-60-32.

Сырцов Леонид Аркадьевич, доцент 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 917-40-69, e-mail: dzitoi8@gmail.com

Торшина Ирина Павловна, декан факультета оптического приборостроения Московского государственного университета геодезии и картографии (105064, Россия, Москва, Гороховский пер., 4); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (499) 404-12-20.

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.

Фарафонов Александр Владимирович, начальник 133-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 558-25-59, e-mail: Farik196@mail.ru

Федотов Михаил Сергеевич, старший преподаватель кафедры физической подготовки Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева МО РФ (198504, Россия, Санкт-Петербург, г. Петергоф, ул. Суворовская, 1); тел.: 8 (911) 087-84-81, e-mail: anet882@mail.ru

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 (981) 826-48-49, e-mail: khomon@mail.ru

Цветков Кирилл Юрьевич, профессор 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 947-19-58, e-mail: wavelet3@mail.ru

Шадрин Александр Геннадьевич, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 901-33-72, e-mail: wavelet3@mail.ru

Шакмаев Игорь Витальевич, старший научный сотрудник научно-информационного центра войсковой части 13991 (164170, Россия, Архангельская область, Мирный-12); тел.: 8 (931) 401-07-58, e-mail: shiva112@yandex.ru

Шапошников Александр Александрович, доцент кафедры физической подготовки Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии

материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева МО РФ (198504, Россия, Санкт-Петербург, г. Петергоф, ул. Суворовская, 1); кандидат педагогических наук; тел.: 8 (911) 239-20-10, e-mail: P.G.S.2018@yandex.ru

Шемелов Владимир Александрович, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Шинкаренко Антон Фёдорович, начальник 363-й лаборатории 36-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) 237-10-21.

Якунин Владимир Иванович, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 812-03-74, e-mail: vka@mil.ru

Яхваров Егор Константинович, начальник лаборатории 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат экономических наук; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Абдурахимов Алексей Александрович, начальник 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mil.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 217-03-39.

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, заслуженный деятель науки Российской Федерации; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: a_aleshkin@mail.ru

Бирюков Денис Николаевич, начальник 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; e-mail: vka@mil.ru

Гаврилов Анатолий Дмитриевич, профессор 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор.

Гнидко Константин Олегович, профессор 61-й кафедры информации Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (999) 532-71-82, e-mail: greeny598@yandex.ru

Горбулин Владимир Иванович, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Готюр Иван Алексеевич, начальник 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Ефимов Владимир Васильевич, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

Захаров Иван Вячеславович, доцент 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-24, e-mail: vka@mil.ru

Казахов Батраз Джумаевич, начальник 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (951) 664-50-26.

Карагодин Владимир Викторович, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 227-36-79, e-mail: vladimirkar@rambler.ru

Копкин Евгений Вениаминович, профессор 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: kopkins@mail.ru

Кужекин Николай Сергеевич, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (911) 794-16-72, e-mail: kns656@mail.ru

Лебедев Евгений Леонидович, начальник 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; тел.: 8 (812) 347-97-32.

Минаков Евгений Петрович, профессор 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 247-98-01, e-mail: ep.minakov12345@mail.ru

Мионов Андрей Николаевич, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-74, e-mail: mironov-anik@yandex.ru

Мысливцев Тимофей Олегович, профессор 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Назаров Андрей Вячеславович, начальник 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Новиков Владимир Александрович, профессор 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор, действительный член Академии военных наук; тел. 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

Овчаров Владимир Александрович, начальник 31-го отдела – заместитель начальника управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-59.

Пилькевич Сергей Владимирович, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 955-89-00, e-mail: ambers@list.ru

Пирогов Сергей Юрьевич, начальник 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-13, e-mail: kafedra17@rambler.ru

Радионов Николай Васильевич, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор экономических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: radionov_nv@mail.ru

Разумов Александр Владимирович, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 785-28-51, e-mail: vka@mil.ru

Сазонов Константин Викторович, начальник 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-54, e-mail: vka@mil.ru

Тарасов Анатолий Геннадьевич, заместитель начальника 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 251-42-53, e-mail: Atol-77@mail.ru

Хайрусов Денис Сергеевич, доцент кафедры гуманитарных и социально-экономических дисциплин Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва (198504, Санкт-Петербург, наб. Адмирала Макарова, 8); кандидат юридических наук.

Шалдаев Сергей Евгеньевич, заместитель начальника Военного института (научно-исследовательского) по научной работе Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 237-10-21, e-mail: vka@mil.ru