

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

Выпуск 676

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 РФ;

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 РФ*;

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

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

Главный редактор:

доктор техн. наук, проф. Ю.В. Кулешов

Редколлегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Подписано к печ. 19.03.2021.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 90,00. Уч.-изд. л. 44,75
Тираж 26 экз. Заказ 3884/88.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Алёшин Е.Н., Гончаревский В.С., Гончаров А.М., Горланов Н.В.* Моделирование и оценивание эффективности управления движением космического аппарата при выполнении маневра уклонения 8
- Басыров А.Г., Кошель И.Н.* Алгоритм планирования параллельных вычислений в деградирующей бортовой вычислительной системе космического аппарата 17
- Груздев Н.В.* Методика обоснования рациональной организационно-штатной структуры испытательных формирований космодрома 27
- Диченко С.А., Финько О.А.* Контроль и восстановление целостности данных в защищенных информационно-аналитических системах 36
- Казахов Б.Д., Кукушкин М.А.* Методический подход к выбору рациональных вариантов восстановления информационного обеспечения функционирования организационно-технических систем военного назначения 50

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Демьянов А.В., Панкратов А.В.* Реинжиниринг программируемых логических интегральных схем электронных блоков сложных технических систем 58
- Демьянов А.В., Долгов И.И., Панкратов А.В.* Математическое моделирование автоматного тестирования реконфигурируемой бортовой электронной аппаратуры 65
- Татарка М.В., Шуваев Ф.Л.* Метод распознавания топологий информационно-телекоммуникационных сетей на основе расчета триадного вектора 73

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алексеев В.Ф., Андриевская В.Ю., Жбанов К.К.* Применение среднего квадратического прогноза при создании и использовании цифровых моделей рельефа ... 84
- Алексеев В.Ф., Данилова Т.Н., Медяников Д.О.* Методика определения градиентов силы тяжести по результатам обработки измерений относительными гравиметрами 89

<i>Алферов А.В., Карин А.И., Карин С.А., Октябрьский В.В.</i> Метод адаптивного определения приоритетов информационно-расчетных задач в системах мониторинга потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера в условиях ресурсной ограниченности.....	95
<i>Астапович А.В., Колесников Д.Д., Медяников Д.О.</i> Методика высокоточных измерений превышений электронными тахеометрами в особых условиях	105
<i>Астапович А.В., Суворов А.В., Чернов И.В.</i> Модель коррекции данных инерциальных навигационных систем наземных подвижных объектов на основе использования гироскопических, линейных и угловых измерений	112
<i>Варющенко С.Б., Косырев С.В., Лебедев М.Ю.</i> Моделирование системы управления обеспечением экологической безопасности космодрома Плесецк	124
<i>Готюр И.А., Костромитинов А.В., Яременко И.А.</i> Модель распределения гидрометеорологических данных на основе семантического анализа метаданных гидрометеорологических сообщений	131
<i>Доронин А.П., Козлов С.И., Козлова Н.А., Тимощук А.С.</i> К вопросу о классификации воздействий на различные слои атмосферы	138
<i>Чернов И.В.</i> Методика определения азимутов направлений с заданной точностью	144

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Абросимов К.М., Гнидко К.О., Макаров С.А., Сергеев А.С.</i> Скрытое выявление структуры социальных связей в учебном коллективе на основе анализа данных средств объективного контроля	151
<i>Нагибин Д.В.</i> Модель нарушителя информационной безопасности на основе руководящих документов в области защиты информации	156

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

<i>Антропова А.В., Баталов А.В., Козлов В.В., Лагун А.В.</i> Методика расчета поперечных нагрузок, воздействующих на ракетные блоки при перевозке железнодорожным транспортом	161
<i>Боровской Е.П., Кохановский А.Г., Кузнецов А.Б.</i> Обоснование выбора объектов наземного технологического оборудования стартовых комплексов, требующих дополнительного контроля технического состояния на основе аддитивной свертки частных показателей	171

<i>Булекбаева М.Ю., Гончаров П.С., Зозуля Л.П.</i> Применение вектора Лапласа для оценивания параметров сближения частицы с космическим аппаратом	179
<i>Голиков И.О., Лебедев Е.Л., Мохнаткин Д.П.</i> Алгоритм определения степени пластической деформации контролируемого участка металлоконструкции по результатам коэрцитиметрического контроля	186
<i>Головчинская Н.В., Головчинский В.О., Демидова Н.С., Птушкин А.И.</i> Методика обобщённой оценки текущего технического состояния объектов наземной космической инфраструктуры космодромов	192
<i>Горбулин В.И., Каргу Д.Л., Поляков С.А., Радионов Н.В.</i> Оценивание малых немоделируемых сил, действующих на навигационный космический аппарат, с использованием метода расщепления движения центра масс	197
<i>Горин В.А., Карагодин В.В., Хомич И.В.</i> Исследование математической модели синхронного генератора в среде MATLAB	207
<i>Капитонов О.В., Тупицин Ю.Е., Шишкин Е.В.</i> Диагностическая модель оценки технического состояния систем вентиляции и кондиционирования воздуха на основе композиции нечетких отношений	214
<i>Каргу Д.Л., Кузнецов В.А., Скопцов А.А., Тимофеев В.А.</i> Апробация модели энергобаланса системы автономного электроснабжения при помощи тренажера для изучения порядка эксплуатации солнечной электроэнергетической установки	219
<i>Крыжановский В.И., Слатов С.В., Трофимов И.А.</i> Алгоритм оптимального по быстродействию пространственного разворота космического аппарата дистанционного зондирования Земли	228
<i>Куприянов Н.А., Подъячев В.В., Шишов Ю.А.</i> Методика независимой калибровки каналов приемно-передающих модулей активной фазированной антенной решетки	239
<i>Литвинова Н.Б., Тупицин Ю.Е., Шишкин Е.В.</i> Математическая модель годового планирования технической эксплуатации технических систем специальных объектов при использовании гибких стратегий технического обслуживания	245
<i>Самойлов Е.Б., Шмелёв В.В.</i> Методика оценивания характеристик летательных аппаратов по результатам обработки внешнетраекторных измерений участка реализации маневра GEMS	250

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

- Беседин С.М., Ерофеев А.В., Кацик В.О.* Методические рекомендации по применению компьютерного тестирования при проведении текущего контроля знаний курсантов в процессе изучения тактико-специальных дисциплин 259
- Богук Ю.М., Голубев М.А.* Методика организации дополнительного профессионального образования педагогических работников академии в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений 265
- Горшков М.А., Окунев С.Ю.* Формирование эффективного педагогического мышления преподавателя военной истории как показателя его профессиональной компетентности 271
- Козлова Л.Я.* Практикум по внеаудиторному чтению как средство формирования военно-профессиональной компетенции 277

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

- Зиновьев В.Г., Мышко В.В., Огородников В.П.* Принцип детерминизма как основание вероятностно-статистического подхода к анализу данных 284
- Пивоваров Ю.Ф., Шилова С.Г.* Дикая дивизия Рабоче-Крестьянской Красной Армии в годы Гражданской войны (1919–1920) 294

ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

- Алешичев С.Е., Зарин С.В., Мацкевич А.В., Мачнев С.А., Сычева А.М.* Методика оценивания фактической степени защиты специальных фортификационных сооружений при их реконструкции и модернизации 301
- Гера В.И., Каменев Ю.А., Котович В.Г., Соломахин А.С., Сычева А.М.* Жаростойкий фибропенобетон для конструкций стартового сооружения космического ракетного комплекса «Ангара» 307
- Мищенко А.В.* Предельные состояния структурно-неоднородных стержней при термосиловом многопараметрическом воздействии 315

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

- Маслов В.П.* «Методика определения маршрутов с учетом тактических свойств местности и времени начала движения по ним подразделений 324

Рефераты статей	336
Сведения об авторах	347
Сведения о рецензентах	356

Е.Н. Алёшин,
кандидат техн. наук;
В.С. Гончаревский,
доктор техн. наук, профессор;
А.М. Гончаров,
кандидат техн. наук;
Н.В. Горланов

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МАНЕВРА УКЛОНЕНИЯ

На различных этапах проектирования, создания и эксплуатации космического аппарата возникает множество задач, решение которых обеспечивает система управления орбитальным маневром. Разработанная модель формирования оптимального управления движением космического аппарата при выполнении маневра уклонения позволила осуществить расчет характеристик маневра. На основе анализа результатов моделирования маневра уклонения сделаны выводы об их практической применимости. Приведено оценивание эффективности непрерывного и импульсного управления движением космического аппарата (КА).

Ключевые слова: маневр уклонения, управление движением, космический аппарат, оптимальное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Практическую значимость осуществления маневров уклонения (МУ) космического аппарата (КА) сложно переоценить [1–4]. Доказательством является необходимость выполнения МУ в случаях периодически возникающих угроз столкновения международной космической станции с неуправляемыми космическими объектами. Такие столкновения могли бы нанести серьезный ущерб корпусу станции и привести к его разгерметизации и/или вывести из строя панели солнечных батарей и радиаторы. При этом выполнение маневра уклонения КА может быть обусловлено не только существующими угрозами столкновения КА с орбитальными объектами вследствие ошибок управления или случайного воздействия среды, вызванного загрязнением космического пространства, но и целенаправленным воздействием на КА.

При управлении движением КА в критически опасных ситуациях может возникать необходимость выполнения маневра уклонения на предельно возможную дистанцию [3–4]. Поэтому требуется провести моделирование и оценивание эффективности управления движением для обоснования наиболее предпочтительного маневра уклонения КА на максимально возможное расстояние при заданном запасе характеристической скорости и времени выполнения маневра.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МАНЕВРА УКЛОНЕНИЯ

Для идеализации условий выполнения маневра уклонения КА приняты следующие допущения: Земля – сфера радиусом $R = 6371$ км; поле притяжения Земли – центральное; влияние атмосферы Земли не учитывается; в исходном состоянии КА находится в невозмущенном движении, управление его движением осуществляется за счет поворота про-

дольной оси его корпуса и многократного включения двигательной установки (ДУ) с постоянной по величине тягой P .

Пусть направление вектора тяги ДУ \bar{P} совпадает с продольной осью корпуса КА. В момент времени начала маневра t_0 КА движется по круговой опорной орбите радиуса r_0 в системе координат xO_3y . Начало системы координат xO_3y находится в центре Земли O_3 , ось y направлена на КА в точку $M(t_0)$, ось x параллельна вектору скорости КА $\bar{V}(t_0)$. Управляемое движение КА рассматривается в транспортирующей системе координат $x_1M(t)y_1$. Начало координат выбранной системы находится в точке $M(t)$, оси x_1 и y_1 параллельны соответствующим осям xO_3y .

Под уклонением КА понимается расстояние r_1 между той точкой, в которой КА оказался бы на расчетной траектории $M(t)$, и точкой, в которой он находится в управляемом движении (рис. 1). В рассматриваемом случае маневр уклонения КА является компланарным.

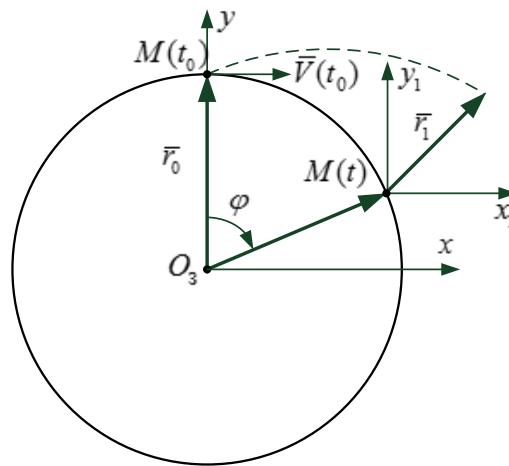


Рис. 1. Положение КА на орбите при совершении маневра уклонения

В качестве параметров управления рассматриваются направляющие косинусы, определяющие ориентацию угла вектора тяги КА относительно оси x_1 транспортирующей системы координат $u_2 = \cos \vartheta$ и $u_3 = \sin \vartheta$, а для характеристики работы ДУ – функцию управления u_1 , которая для случая релейного режима принимает значения 1 или 0, т. е. ДУ включена или выключена.

Для описания движения КА используются уравнения следующего вида [5–7]:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{\bar{P}}{m} - \frac{k}{\rho^3} \bar{\rho} + \frac{k}{r_0^3} \bar{r}_0, \quad (1)$$

где \bar{P} – вектор тяги КА;

m – масса КА;

$\bar{\rho}$ – геоцентрический радиус-вектор орбиты КА, $\bar{\rho} = \bar{r}_0 + \bar{r}_1$;

\bar{r}_0 – радиус-вектор опорной орбиты КА;

k – гравитационная постоянная Земли.

Постановка задачи содержит разработанную модель (1), представленную следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \frac{P_x}{X_5} - k \left(\frac{x_0 + X_2}{\rho^3} - \frac{x_0}{r_0^3} \right); \dot{X}_2 = X_1 \\ \dot{X}_3 = \frac{P_y}{X_5} - k \left(\frac{y_0 + X_4}{\rho^3} - \frac{y_0}{r_0^3} \right); \dot{X}_4 = X_3, \\ \dot{X}_5 = -m_0 \cdot u_1 \end{cases} \quad (2)$$

где P_x, P_y – проекции вектора тяги ДУ на оси xO_3y ;

m_0 – масса секундного расхода топлива ДУ КА.

При этом $\rho = \sqrt{(x_0 + X_2)^2 + (y_0 + X_4)^2}$; $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$.

Кроме того, $\bar{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)^T$, $X_1 = V_x$, $X_2 = x$, $X_3 = V_y$, $X_4 = y$, $X_5 = m$. Здесь x, y и V_x, V_y – координаты положения и проекции вектора скорости КА в транспортирующей системе координат $x_1M(t)y_1$, а m – масса топлива находящегося на борту КА до выполнения маневра.

Краевые условия представим вектором значений фазовых координат в начальный момент времени $\bar{X}(t_0) = (0, 0, 0, 0, m)^T$ и только одним значением фазовой координаты в конечный момент времени $X_5(t_f) = m_k$, где m_k – масса топлива, находящегося на борту КА после маневра.

Показателем качества выполнения маневра уклонения КА является квадратичный функционал в форме Лагранжа вида [5]

$$J = -(X_2^2 + X_4^2). \quad (3)$$

Требуется из множества допустимых управлений U найти такие векторные функции $\bar{u}(t) = (u_1(t), u_2(t), u_3(t))$, где $\bar{u}(t) \in U$, которые позволяют перевести объект (2) из заданного начального состояния $\bar{X}(t_0)$ в заданное конечное состояние $X_5(t_f) = m_k$, обеспечив минимальное значение показателя качества (3). Критерий выбора оптимального управления представлен в виде выражения

$$\bar{u}^*(t) = \arg \min_{\bar{u} \in U} \{J\}. \quad (4)$$

Поставленная задача в терминах теории оптимального управления [8] является задачей с фиксированным временем, закрепленным левым и подвижным правым концами траектории.

Для решения поставленной оптимизационной задачи (2)–(4) применим принцип максимума Л.С. Понтрягина. Для того чтобы процесс $(\bar{u}(t), \bar{X}(t))$ являлся решением задачи, необходимо, чтобы в каждый момент времени $t \in [t_0, t_f]$ выполнялось условие

$$H(t, \bar{X}, \bar{u}^*, \bar{\Psi}) = \max_{\bar{u} \in U} H(t, \bar{X}, \bar{u}, \bar{\Psi}), \quad (5)$$

где $H(\cdot)$ – функция Гамильтона;

$\bar{\Psi}$ – вектор сопряженных переменных $[\bar{\Psi} = (\Psi_0, \Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5)^T]$, являющийся решением системы уравнений

$$\dot{\bar{\Psi}} = -\frac{\partial H}{\partial \bar{X}}, \quad (6)$$

с начальными условиями, полученными из условия трансверсальности на правом конце траектории.

Максимизация функции Гамильтона позволяет получить условия оптимальности, связывающие сопряженные переменные с параметрами управления. Тогда выражение (5), зависящее от функции управления, можно представить в следующем виде:

$$\Delta H = u_1 \left(\frac{\rho u_2}{x_5} \Psi_1 + \frac{\rho u_3}{x_5} \Psi_3 - \Psi_5 m_0 \right). \quad (7)$$

Отметим, что для достижения максимума функции H необходимо, чтобы величина ΔH также достигала максимального значения. Функция ΔH достигает максимума при выполнении условия [8]

$$u_1 = \begin{cases} 1, & \Xi > 0 \\ 0, & \Xi \leq 0 \end{cases}, \quad (8)$$

где

$$\Xi = \frac{\rho u_2}{x_5} \Psi_1 + \frac{\rho u_3}{x_5} \Psi_3 - \Psi_5 m_0.$$

Таким образом, найдено условие, при котором ДУ КА должна быть включена. Принцип максимума позволит заключить, что векторы (u_2, u_3) и (Ψ_1, Ψ_3) должны быть одинаково направлены [8], что следует из выражений:

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{\Psi_1}{\sqrt{\Psi_1^2 + \Psi_3^2}}; \\ u_3 &= \frac{\Psi_3}{\sqrt{\Psi_1^2 + \Psi_3^2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Оптимальное управление может быть получено только при совместном решении основной (2) и сопряженной (6) систем уравнений. Причем начальные и граничные условия для основной системы уравнений заданы. Для получения граничных условий сопряженной системы уравнений применяются условия трансверсальности на правом подвижном конце, которые в общем виде определяются уравнением [8]

$$\Psi_0(t_f) \leq 0, \quad H(t_f, \bar{X}, \bar{u}^*, \bar{\Psi}) = 0. \quad (10)$$

Левый край фиксирован по условию задачи, следовательно,

$$\Psi_{2f} = 2X_{2f}, \quad \Psi_{4f} = 2X_{4f}. \quad (11)$$

Поскольку конечные значения X_{1f}, X_{3f} произвольны, то

$$\Psi_{1f} = 0, \quad \Psi_{3f} = 0. \quad (12)$$

Поставленную задачу оптимального управления (2)–(4) можно рассматривать как краевую задачу. Ввиду того, что основная и сопряженная системы уравнений являются системами нелинейных дифференциальных уравнений, краевую задачу оптимального управления решаем численно с использованием метода Ньютона [10]. Особенность данной задачи состоит в том, что, если начальные условия для фазовых переменных $\bar{X}(t_0)$ заданы, то начальные условия сопряженных переменных $\bar{\Psi}_0$ не заданы.

Для получения первого приближения $\bar{\Psi}_0 = (\bar{\Psi}_{i0})$, $i = \overline{1,5}$ применялась следующая методика.

Для описания движение КА рассматривалась модель, представленная системой линейных уравнений в возмущениях круговых орбит [9]

$$\begin{cases} \Delta r = \Delta r_0 (2 - \cos \varphi) + 2 \frac{\Delta V_{\varphi 0}}{\omega_0} (1 - \cos \varphi) + \frac{\Delta V_{r0}}{\omega_0} \sin \varphi \\ r \Delta \varphi = r_0 \Delta \varphi_0 - \Delta r_0 (3\varphi - 2 \sin \varphi) - \frac{\Delta V_{\varphi 0}}{\omega_0} (3\varphi - 4 \sin \varphi) - 2 \frac{\Delta V_{r0}}{\omega_0} (1 - \cos \varphi). \\ \Delta z = \Delta z_0 \cos \varphi + \frac{\Delta V_{z0}}{\omega_0} \sin \varphi \end{cases} \quad (13)$$

В системе линейных уравнений (13) введены следующие обозначения:

Δr – радиальное отклонение КА от круговой орбиты;

$r_0 \Delta \varphi$ – отклонение КА вдоль орбиты;

Δz – боковое отклонение КА;

ω_0 – угловая скорость КА в невозмущенном движении;

φ – равномерно изменяющаяся угловая дальность;

$\Delta r_0, \Delta \varphi_0, \Delta z_0, \Delta V_{r0}, \Delta V_{\varphi 0}, \Delta V_{z0}$ – начальные возмущения координат и компонент скорости (рис. 2).

При этом будем полагать, что

$$\Delta r_0 = 0, \Delta \varphi_0 = 0, \Delta z_0 = 0.$$

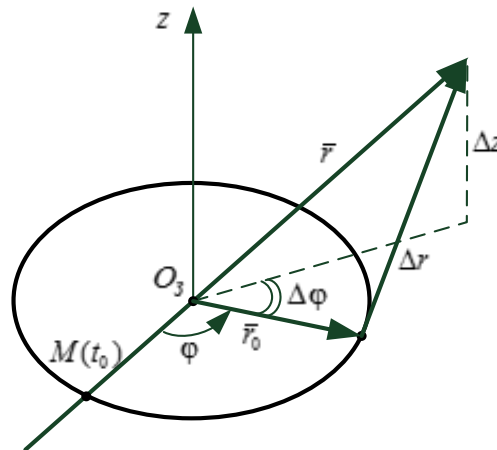


Рис 2. Кинематические характеристики маневра уклонения КА

Вектор управляющего импульса ДУ КА можно характеризовать тремя параметрами управления (рис. 3):

– модулем вектора управляющего импульса

$$\Delta V_3 = |\Delta \bar{V}| = \sqrt{\Delta V_{r0}^2 + \Delta V_{\varphi 0}^2 + \Delta V_{z0}^2};$$

– двумя углами, характеризующими ориентацию оси двигателя в транспортирующей системе координат, – α и β .

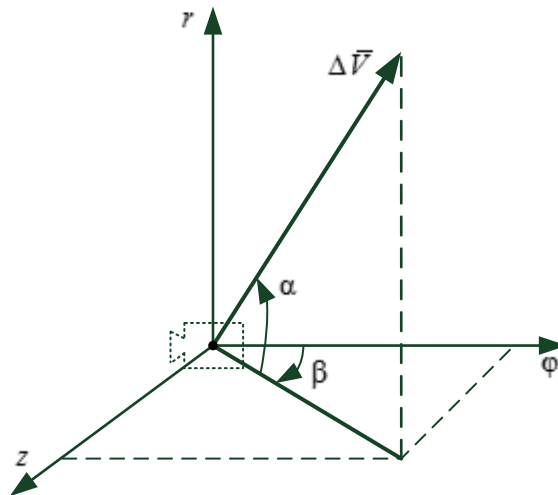


Рис 3. Параметры управления двигательной установкой КА

В соответствии с моделью (13) дальность маневра уклонения определяется выражением

$$\rho = \sqrt{\Delta r^2 + (r\Delta\varphi)^2 + \Delta z^2}. \quad (14)$$

Задача определения характеристик маневра уклонения КА заключается в необходимости нахождения параметров α и β , которые обеспечивают максимум функции (14). Математически эта задача сводится к отысканию экстремума функции двух переменных. Исследование первой и второй производной функции ρ показало, что для осуществления максимального уклонения при заданных энергетических запасах и времени выполнения маневра его следует выполнять в плоскости опорной орбиты, причем параметры управления принимают следующие значения:

$$\alpha_{\text{опт}} = \frac{1}{2} \arctg \frac{4(1 - \cos \varphi)}{3\varphi - 5 \sin \varphi} + \pi, \quad \beta_{\text{опт}} \approx 0. \quad (15)$$

Пусть $\vartheta = \alpha_{\text{опт}} = \text{const}$, $t \in [t_0, t_k]$, положение вектора тяги ДУ КА в инерциальном пространстве фиксированное, а функция управления u_1 принимает следующие значения:

$$u_1(t) = \begin{cases} 1, & t \leq t_a \\ 0, & t > t_a \end{cases}, \quad (16)$$

где t_a – время работы ДУ КА при заданном запасе топлива на маневр и $P = \text{const}$.

Интегрирование основной системы уравнений движения КА (2) при известном начальном состоянии $\bar{X}(t_0)$ и $u_1(t)$ позволило получить вектор $\bar{X}(t_f)$, а также на основании условий трансверсальности (11) и (12) – определить соответствующие значения вектора сопряженной системы на правом конце $\bar{\Psi}_f$.

Для определения $\bar{\Psi}_0$ проводилось совместное интегрирование основной и сопряженной систем с отрицательным шагом с параметрами управления (15) и (16) и начальными услови-

ями $(\bar{X}(t_f), \bar{\Psi}(t_f))$. Такая методика расчета $\bar{\Psi}_0$ гарантировала достаточно высокую степень сходимости решения краевой задачи методом Ньютона.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МАНЕВРОВ УКЛОНЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Вычислительный эксперимент проводился для случая, когда КА в свободном движении находился на опорной круговой орбите радиусом $r_0 = 6971$ км. Задача решалась для угловой дальности совершения маневра уклонения $\varphi = 10^\circ, 20^\circ, \dots, 100^\circ$, для начальной тяговооруженности КА 0,25. На основании проведенного эксперимента можно сделать вывод, что управление движением КА осуществляется на одном активном участке, который начинается в момент времени t_0 и заканчивается по выработке всего заданного количества топлива в момент времени t_a . Результаты эксперимента приведены в табл. 1, где приняты следующие основные обозначения:

φ – угловая дальность, которая соответствует времени выполнения маневра уклонения;

\mathcal{G}_t – ориентация вектора тяги ДУ КА в момент времени t ;

r_n – радиус перигея возмущенной орбиты КА;

r_1 – расстояние, на которое уклоняется КА.

Анализ данных табл. 1 показал, что для фиксированного момента времени зависимость изменения значений угла ориентации вектора тяги ДУ КА \mathcal{G}_t от времени выполнения маневра имеет линейный характер, а диапазон изменения угла не превышает двух градусов. Это позволило осреднить значение угла ориентации вектора тяги ДУ КА (рис. 4) и использовать квазиоптимальное значение угла ориентации $\bar{\mathcal{G}}_{\text{кв.опт}}(t) = \mathcal{G}_{\text{опт.ср}} = \text{const}$ при $t \in [t_0, t_k]$.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

φ	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°
$\mathcal{G}_{t=10 \text{ с}}$	162 ⁰ 36'	154 ⁰ 06'	142 ⁰ 48'	126 ⁰ 41'	101 ⁰ 33'	68 ⁰ 15'	56 ⁰ 58'	51 ⁰ 19'	46 ⁰ 53'	42 ⁰ 49'
$\mathcal{G}_{t=20 \text{ с}}$	162 ⁰ 39'	154 ⁰ 15'	143 ⁰ 06'	127 ⁰ 08'	101 ⁰ 48'	68 ⁰ 16'	56 ⁰ 49'	51 ⁰ 07'	46 ⁰ 37'	42 ⁰ 31'
$\mathcal{G}_{t=30 \text{ с}}$	162 ⁰ 43'	154 ⁰ 24'	143 ⁰ 22'	127 ⁰ 34'	102 ⁰ 16'	68 ⁰ 19'	56 ⁰ 33'	50 ⁰ 54'	46 ⁰ 22'	42 ⁰ 16'
$\mathcal{G}_{t=40 \text{ с}}$	162 ⁰ 46'	154 ⁰ 33'	143 ⁰ 39'	128 ⁰ 12'	126 ⁰ 45'	68 ⁰ 21'	56 ⁰ 41'	50 ⁰ 42'	46 ⁰ 07'	42 ⁰ 03'
r_1 (км)	15,262	31,488	47,714	66,179	96,727	135,799	174,749	219,573	271,562	330,562
Δr (км)	-16,19	-32,980	-50,912	-70,416	-91,754	114,978	139,908	166,142	193,908	220,029
$\Delta \varphi$ (км)	-1,416	-5,814	-13,629	-25,554	-42,482	-65,42	-95,377	-133,246	-179,705	-235,135
r_n (км)	6620	6636	6668	6726	6833	6927	6943	6949	6953	6965
$\alpha_{\text{опт}}$	85 ⁰ 00'	80 ⁰ 00'	75 ⁰ 00'	70 ⁰ 06'	65 ⁰ 12'	60 ⁰ 24'	55 ⁰ 24'	51 ⁰ 18'	47 ⁰ 06'	43 ⁰ 06'

Как показало проведенное исследование, переход от оптимального к квазиоптимальному значению угла не вызывает заметных изменений значения показателя качества маневра, который характеризует величину максимально возможного уклонения КА от опорной орбиты. Максимальная величина погрешности для угловых дальностей при $\varphi < 30^\circ$ не превышает

5 км, при $\varphi > 30^\circ$ находится в диапазоне 0,5–1 км. Это позволяет на практике использовать квазиоптимальные значения угла ориентации вектора тяги ДУ КА и без особых технических трудностей реализовать маневр уклонения автономной системой управления движением.

Оценивание эффективности управления движением КА при выполнении маневра уклонения проводилось путем сравнения результатов (табл. 2) расчета характеристик маневра уклонения по программе непрерывного и импульсного управления движением КА.

Таблица 2

Результаты расчета характеристик маневра уклонения КА

φ	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°
$\rho_{\text{кв.опт}}$	162 ⁰ 41'	154 ⁰ 19'	143 ⁰ 13'	127 ⁰ 21'	102 ⁰ 24'	68 ⁰ 18'	56 ⁰ 46'	51 ⁰ 06'	46 ⁰ 30'	42 ⁰ 10'
$\rho_{\text{кв.опт}}$	11,619	25,688	42,87	65,351	96,04	133,678	173,13	218,871	271,492	330,412
$\alpha_{\text{имп}}$	176 ⁰ 06'	170 ⁰ 00'	165 ⁰ 06'	160 ⁰ 06'	155 ⁰ 09'	60 ⁰ 24'	55 ⁰ 24'	51 ⁰ 18'	47 ⁰ 06'	43 ⁰ 06'
$\rho_{\text{имп}}$	16,252	33,489	52,705	74,909	101,11	132,287	169,326	212,974	263,775	329,563

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительное оценивание эффективности процесса управления позволило сделать следующие выводы.

1. Для малых времен выполнения маневров уклонения КА значения показателя качества управления движением несущественно отличаются, при этом значения углов ориентации тяги ДУ расходятся. Это вызвано тем, что активный участок квазиоптимального управления оказывается соизмерим со временем выполнения маневра уклонения КА, и поэтому такое сравнение является некорректным. Для больших угловых дальностей маневров уклонения импульсное управление неприменимо, так как начинают сказываться погрешности линейной модели возмущения орбит, вызванные вековым уходом КА вдоль орбиты [5, 6].

2. Результаты импульсного и непрерывного управления достаточно точно совпадают при угловых дальностях маневров уклонения для $60^\circ < \varphi < 100^\circ$. Это позволяет рекомендовать на практике для таких угловых дальностей использовать импульсное управление движением КА.

Список используемых источников

1. *Авксентьев А.А.* Расчет оптимального расстояния для перехода к ближнему наведению в окрестности круговой орбиты // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 7–13.
2. *Авксентьев А.А., Иванов А.О., Исупов Н.А.* Метод расчета управления для сближения космического аппарата с орбитальным объектом за минимальное число витков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 8–15.
3. Моделирование защитного маневрирования космического аппарата для парирования опасных сближений с объектами космического мусора на геостационарной орбите / А.О. Иванов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 243–247.

4. Космический мусор: проблемы и пути ее решения / В.Л. Иванов [и др.]. – М.: Патриот, 1996. – 360 с.
5. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
6. Гончаревский В.С., Мануйлов Ю.С., Новиков Е.А. Моделирование управляемого движения космических аппаратов: учеб. пособие / под общ. ред. Ю.С. Мануйлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 333 с.
7. Гончаревский В.С. Методы и алгоритмы управления относительным движением космических аппаратов. – М.: МО РФ, 1998. – 87 с.
8. Атанс Н., Фалб П. Оптимальное управление. – М.: Машиностроение, 1968. – 763 с.
9. Власов С.А., Кульвиц А.В., Скрипников А.Н. Теория полета космических аппаратов: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 412 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

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

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ДЕГРАДИРУЮЩЕЙ БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассмотрено планирование параллельной обработки информации в бортовой вычислительной системе (БВС) космического аппарата (КА), деградирующей в условиях внешних деструктивных факторов. Предложен алгоритм планирования параллельных вычислений в условиях деградации вычислительной системы.

На основе моделирования функционирования БВС КА проведен анализ известных алгоритмов планирования параллельных вычислений с оценками показателя качества функционирования БВС при различных реализациях планов параллельных вычислений.

Предложен и исследован новый алгоритм планирования параллельной обработки информации, учитывающий деградацию вычислительной системы.

Ключевые слова: бортовая вычислительная система, планирование параллельной обработки информации, предельно возможная результативность.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы применения орбитальных группировок космических аппаратов связаны с развитием обработки информации на борту КА. Это существенно повышает оперативность решения целевых задач, однако требует новых подходов к построению и применению бортовых вычислительных систем.

Одной из проблем бортовой обработки целевой информации является деструктивное воздействие внешних неблагоприятных факторов на функционирование бортовой аппаратуры, в том числе и БВС. Исходя из концепции превентивного функционально-параметрического конфигурирования БВС [1], необходимо планировать вычислительный процесс в ней с учетом возможной деградации БВС и, соответственно, вычислительного процесса.

Вопросам планирования параллельной обработки информации уделено достаточно внимания [3, 4, 7], известны различные постановки задачи планирования параллельных вычислений. Целью планирования является разработка плана (расписания) вычислительного процесса, обеспечивающего завершение вычислений либо к заданному (директивному) сроку, либо к минимально возможному. В статье будет рассмотрена новая постановка задачи планирования параллельных вычислений, заключающаяся в выполнении максимально возможного объема вычислительной работы при неопределенном директивном сроке завершения вычислений.

Неопределенность завершения вычислений может быть связана с разрушением (деградацией) БВС вследствие внешних воздействий. В этих условиях при планировании вычислений требуется синтез такого плана вычислительного процесса, в соответствии с которым будет выполнен максимально возможный объем вычислений до наступления момента деградации БВС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В БВС КА В УСЛОВИЯХ ЕЕ ДЕГРАДАЦИИ

В работе [2] обобщенным показателем качества функционирования БВС КА в условиях возможной деградации БВС предлагается считать величину

$$R = \sum_{i=1}^n x_i(\xi) \cdot \tau_i / \max_i \{t_i\}, \quad (1)$$

где x_i – индикатор выполнения i -й задачи до момента времени ξ деградации БВС,

$$x_i(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{если } t_i \leq \xi; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases};$$

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

τ_i – время, необходимое для выполнения i -й задачи.

Данная величина определяет отношение объема выполненной вычислительной работы ко времени ее выполнения, т. е. производительность БВС.

Кроме того, в работе [2] отмечено, что, если в соответствии с планом параллельного вычислительного процесса (ПВП) i -я задача, $i=1,2,\dots,n$, завершается в момент времени t_i и известна функция распределения $F(\xi)$ момента времени ξ завершения вычислений, вызванного внешним деструктивным воздействием, то с вероятностью $\bar{F}(\xi) = 1 - F(\xi)$ будут решены задачи, планируемое время t_i завершения которых не превосходит ξ (рис. 1).

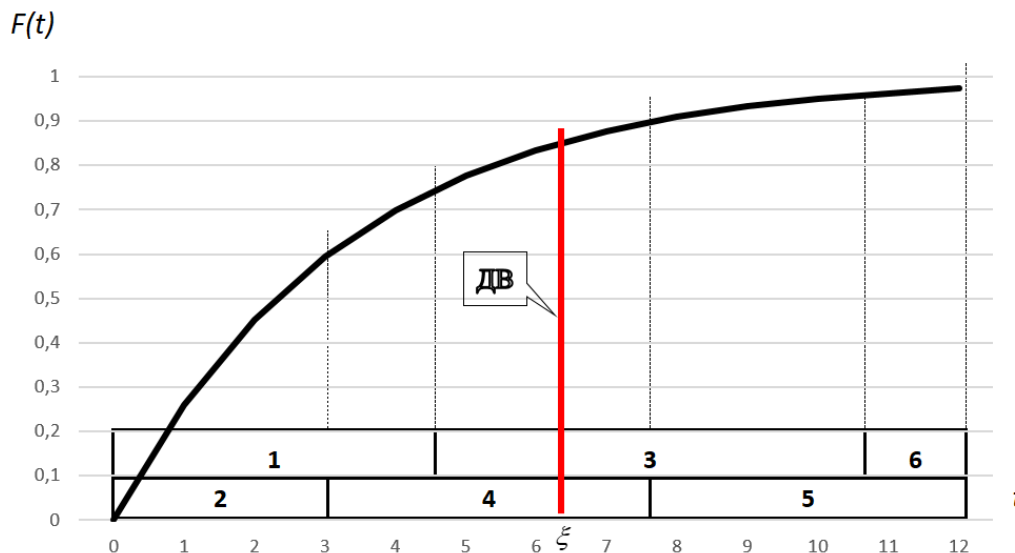


Рис. 1. Функция распределения времени завершения вычислений

Для любого алгоритма Ξ планирования параллельных вычислений можно определить функцию

$$v_{\Xi}(t) = \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot x_i(t), \quad (2)$$

значение которой равно планируемому объему выполненной работы к моменту времени t , а также функцию $v_{\Xi}(t) = \frac{V_{\Xi}(t)}{t}$, значение которой равно остаточной производительности БВС в момент времени t .

Учитывая случайный характер момента времени деградации БВС, определим *вероятный объем* выполненной БВС работы к моменту времени t , который составит

$$V_{\Xi}(t) = \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot x_i(t) \cdot (1 - F(t)), \quad (3)$$

а также определим достигаемую при этом вероятную остаточную производительность, разделив правую часть выражения (3) на t :

$$S_{\Xi}(t) = \frac{V_{\Xi}(t)}{t} = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i \cdot x_i(t)}{t} \cdot (1 - F(t)). \quad (4)$$

Чтобы найти математическое ожидание остаточной производительности БВС за все время ее функционирования, разобьем интервал планирования вычислений на q интервалов $[0, \chi_1), [\chi_1, \chi_2), \dots, [\chi_{q-1}, \chi_q)$ таким образом, чтобы правая граница каждого интервала соответствовала моменту времени завершения хотя бы одной задачи.

Тогда математическое ожидание \bar{S}_{Ξ} остаточной производительности БВС за все время ее функционирования составит

$$\bar{S}_{\Xi} = \sum_{i=1}^q \frac{v_{\Xi}(\chi_i)}{\chi_i} \cdot (F(\chi_{i+1}) - F(\chi_i)). \quad (5)$$

Отметим, что $F(\chi_{q+1}) = 1$, так как вычисления заканчиваются в момент времени χ_q .

Показатель (5) является стохастическим аналогом показателя (1), отражает «остаточную производительность» БВС и может быть использован как обобщенный показатель качества функционирования БВС КА в условиях возможной деградации БВС. Отметим, что при отсутствии деструктивных воздействий на БВС $F(\xi) = 0$ показатель (5) совпадает с «традиционным» коэффициентом ускорения параллельной обработки информации [5].

Задача планирования функционирования БВС КА в условиях деструктивных воздействий может быть сформулирована следующим образом: по заданным параметрам задач, параметрам БВС, параметрам возможного деструктивного воздействия на БВС найти план параллельного вычислительного процесса, обеспечивающий максимальное значение обобщенного показателя качества (5) функционирования БВС КА.

Математическая постановка задачи

Дано:

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

2) функция $F(t)$ распределения моментов времени реализации деструктивного воздействия на БВС.

Найти: план $\Xi = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ вычислительного процесса, где t_i , $i = 1, \dots, n$ – планируемые моменты времени завершения выполнения задач, такой, что

$$\Xi^* = \arg \max_{\Xi^* \in \Xi^{\text{доп}}} \bar{S}_{\Xi}(Z, F),$$

где \bar{S}_{Ξ} определяется выражением (5), а $\Xi^{\text{доп}}$ – множество допустимых планов.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТНЫХ АЛГОРИТМОВ НАЗНАЧЕНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ДЕГРАДАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Влияние плана параллельных вычислений на значение показателя качества функционирования БВС КА (3) покажем на примере распределения 10 задач с временем выполнения соответственно 1, 2, ..., 9, 10 единиц времени тремя различными алгоритмами планирования: алгоритмами спискового планирования [7] *LTM* и *GTM* и алгоритмом *Multi-Fit* [8]. Схематично эти три плана вычислений представлены на рис. 2. Время w вычислений (длина расписания) в соответствии с указанными планами составляет 22, 19 и 19 единиц времени соответственно.

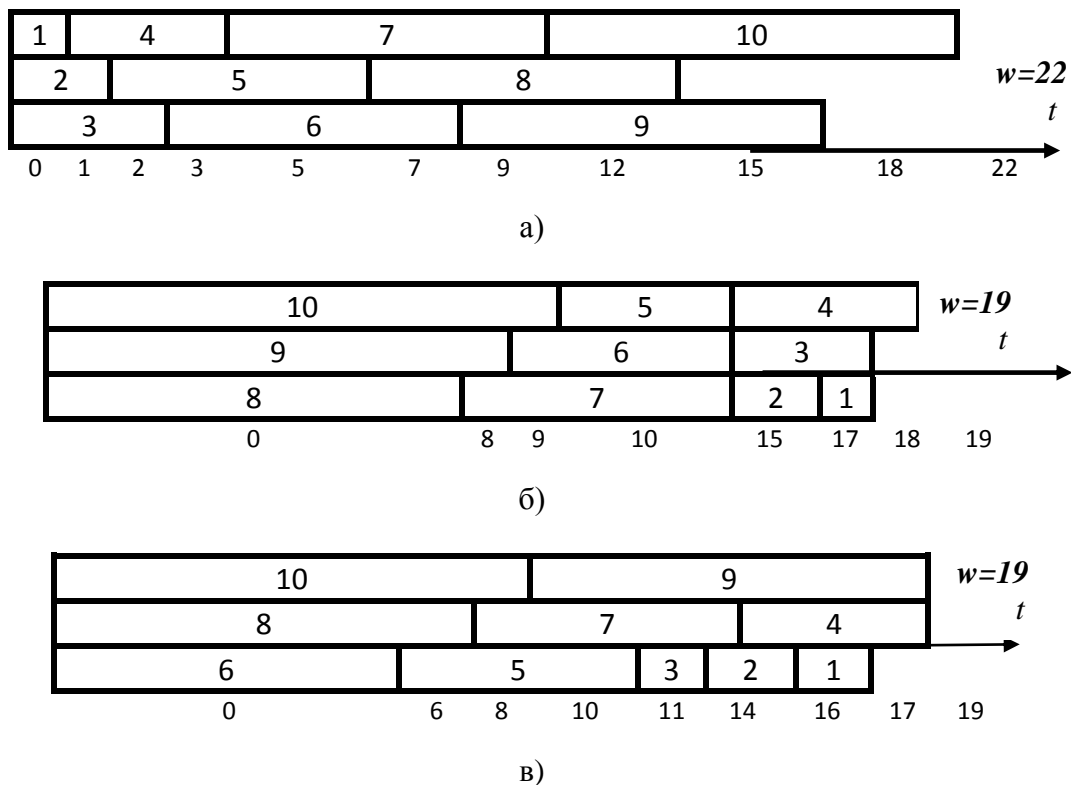


Рис. 2. Планы параллельных вычислений:
а – *LTM*; б – *GTM*; в – *Multi-Fit*

В табл. 1 приведены: количество k выполненных задач, объем (время) ν_{Ξ} выполненной работы и значения показателя качества \bar{S}_{Ξ} функционирования БВС КА при различных моментах времени деградации БВС, реализующей каждый из трех отмеченных планов.

Таблица 1

Математическое ожидание остаточной производительности БВС

Вариант распределения ДВ	LTM	GTM	MultiFit
Без ДВ	2,5	2,8947	2,8947
Равномерное $F(t) = \frac{1}{b}t, 0 \leq t \leq b$			
$b = 25$	2,0427	1,7300	1,8124
$b = 50$	2,2713	2,3124	2,3536
$b = 100$	2,3857	2,6036	2,6242
Экспоненциальное $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$			
$\lambda = 0.1$	1,7932	1,0995	1,2161
$\lambda = 0.01$	2,3924	2,6189	2,6387
$\lambda = 0.001$	2,4886	2,8658	2,8678
Нормальное $F(t) = 0.5 + \Phi\left(\frac{t-\mu}{10}\right)$, где $\Phi(x)$ – функция Лапласа			
$\mu = 10$	1,7384	1,4483	1,5365
$\mu = 20$	2,2565	2,4022	2,4273
$\mu = 30$	2,4463	2,8105	2,8049

Графики зависимости остаточной производительности БВС от времени ее деградации для различных алгоритмов планирования ПВП представлены на рис. 3.

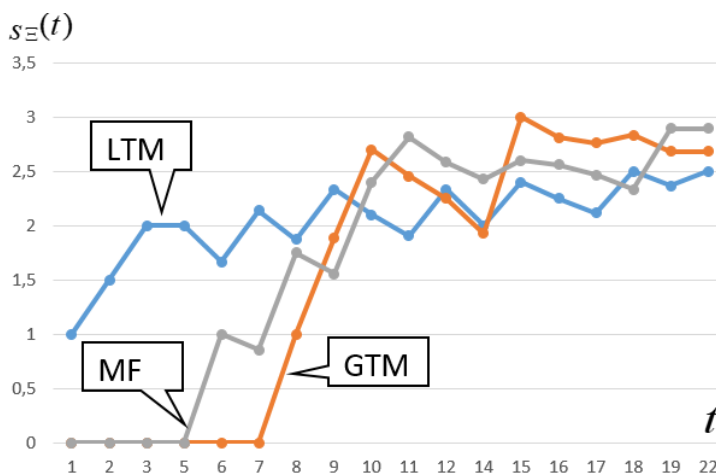


Рис. 3. Зависимость планируемого коэффициента ускорения параллельных вычислений от времени деградации БВС для различных алгоритмов планирования параллельной обработки

Анализ представленных в табл. 1 данных показывает, что вид распределения ДВ и алгоритм назначения задач на вычислительные модули влияют на значение выбранного показателя качества функционирования БВС.

Для рассматриваемого примера (рис. 2) для различных алгоритмов планирования максимальная разница в значении математического ожидания остаточной производительности БВС составляет: более 18% – для равномерного распределения, более 63% – для экспоненциального, более 20% – для нормального распределения.

ДВУХФАЗНЫЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕГРАДИРУЮЩЕЙ БВС КА

Алгоритмы планирования ПВП минимизируют количество вычислительных модулей для завершения вычислений к заданному (директивному) сроку или минимизируют срок завершения вычислений при заданной структуре вычислительной системы. В условиях функционирования БВС, описанных выше, возможна ее деградация до планируемого срока завершения вычислений, поэтому требуется построить план, максимизирующий значение (5). Такая постановка задачи планирования параллельных вычислений, заключающаяся в выполнении максимально возможного объема вычислительной работы при неопределенном директивном сроке завершения вычислений, является новой.

Алгоритмы планирования ПВП, обеспечивающие оптимальный результат, относятся к классу NP-полных, поэтому на практике в системах реального времени используют эвристические алгоритмы назначения задач на вычислительные модули (ВМ) [3].

Анализ результатов применения известных алгоритмов планирования ПВП в условиях деградации БВС показал, что значение показателя остаточной производительности (5) сильно зависит от момента времени деградации БВС.

Анализировались четыре алгоритма:

1) два списковых алгоритма: *LTM* – меньшая по длительности задача назначается раньше других и *GTM* – большая по длительности задача назначается раньше других;

2) *Multi-Fit* алгоритм – *FFD*-процедура (*First-Fit-Decreasing*, «первый пригодный с упорядочением») упаковки объектов в контейнеры с итерационным подбором объема контейнера;

3) *Multi-Fit* алгоритм с переупорядочением задач по возрастанию их длительностей (*MF+*).

Анализ заключался в расчете показателя (5) для построенного выбранным алгоритмом плана ПВП при заданной функции распределения момента времени деградации БВС. Моделировалась случайная величина – момент времени деградации БВС, распределенная по равномерному, экспоненциальному и нормальному законам распределения.

Независимо от закона распределения момента времени ξ деградации БВС, было установлено, что при математическом ожидании $\bar{\xi}$, близком к началу плана ПВП, большее значение остаточной производительности обеспечивается алгоритмом *LTM*, а при $\bar{\xi}$, близком к окончанию плана ПВП, – алгоритмами *Multi-Fit*. Эта закономерность просматривается и в примере табл. 1.

Идея предлагаемого алгоритма основана на сочетании двух процедур планирования ПВП: спискового планирования *LTM* и алгоритма *Multi-Fit* с переупорядочением.

Назначение задач на вычислительные модули проходит две фазы. На первой фазе часть задач с наименьшей длительностью распределяется по вычислительным модулям (ВМ) в соответствии со списковым алгоритмом назначения задач с функцией *LTM*. На второй фазе оставшиеся задачи распределяются по ВМ с помощью алгоритма *Multi-Fit*, после чего окончательно на каждом ВМ задачи переупорядочиваются по неубыванию их длительностей.

Важным параметром предлагаемого распределения задач является соотношение между количеством задач (объемом вычислений), распределяемых по алгоритму *LTM* и по

алгоритму *Multi-Fit*. Формализовать это соотношение можно величиной $\Delta = \Sigma_{LTM} / \sum_{i=1}^n \tau_i$,

где Σ_{LTM} – суммарная длительность задач, распределяемых по ВМ алгоритмом *LTM*. Назовем этот параметр «уровнем фазы» распределения задач. Уровень фазы Δ изменяется в интервале [0,1], причем при $\Delta = 0$ предлагаемый алгоритм полностью совпадает с алгорит-

мом $MF+$, а при $\Delta = 1$ – с алгоритмом LTM . Посредством подбора не более, чем за n итераций уровня фазы можно «настроить» алгоритм на получение максимальной остаточной производительности для конкретных исходных данных.

Приведем формальное описание двухфазного алгоритма планирования деградирующего ПВП (назовем его $LTM+MF$).

Шаг 1. Упорядочение задач по невозрастанию их длительностей: $\tau_1 \geq \tau_2 \geq \dots \geq \tau_n$.

Шаг 2. По заданному значению Δ определить максимальное количество k последних в этой последовательности задач с номерами $n-k+1, n-k+2, \dots, n-1, n$, для которых справедливо

$$\sum_{i=1}^k \tau_{n-i+1} / \sum_{i=1}^n \tau_i \leq \Delta.$$

Шаг 3. Последовательно назначать задачи с номерами $n, n-1, \dots, n-k-1$ на те ВМ, на которых очередная задача начнет свое выполнение раньше, чем на других ВМ.

Шаг 4. Для оставшихся $n-k$ задач применить алгоритм назначения *Multi-Fit*.

Шаг 5. В полученном плане ПВП на каждом ВМ переупорядочить задачи по убыванию их длительностей.

Для любых исходных данных (количество и длительность задач, количество ВМ, математическое ожидание момента времени $\bar{\xi}$ деградации ПВП) можно определить значение уровня фазы Δ , обеспечивающее максимальное значение средней остаточной производительности БВС. Для исходных данных, по которым построены планы, изображенные на рис. 2, в табл. 2 приведены значения средней остаточной производительности БВС для планов, полученных предложенным двухфазным алгоритмом планирования при экспоненциальном законе распределения момента времени деградации БВС с математическим ожиданием $\bar{\xi}$ и при различных значениях Δ .

Таблица 2

Средняя остаточная производительность БВС

$\bar{\xi}$	Δ									
	0,02	0,06	0,11	0,19	0,28	0,39	0,51	0,66	0,82	1
2	0,893	0,899	0,899	0,907	0,908	0,909	0,908	0,909	0,909	0,909
4	1,333	1,351	1,351	1,379	1,368	1,367	1,367	1,366	1,366	1,366
6	1,587	1,610	1,610	1,644	1,615	1,609	1,613	1,607	1,605	1,605
8	1,766	1,790	1,790	1,819	1,776	1,765	1,776	1,763	1,758	1,758
10	1,902	1,925	1,925	1,945	1,890	1,874	1,896	1,875	1,864	1,864
12	2,008	2,030	2,030	2,040	1,976	1,955	1,989	1,960	1,944	1,944
14	2,094	2,115	2,115	2,115	2,044	2,017	2,063	2,027	2,005	2,005
16	2,164	2,184	2,184	2,176	2,099	2,067	2,124	2,082	2,055	2,055
18	2,224	2,242	2,242	2,225	2,144	2,107	2,175	2,127	2,095	2,095
20	2,274	2,292	2,292	2,267	2,182	2,141	2,218	2,165	2,128	2,128

В табл. 2 выделены максимальные значения средней остаточной производительности БВС. Отметим, что оптимальное значение уровня фазы увеличивается с приближением математического ожидания момента времени деградации БВС к началу плана ПВП.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕГРАДИРУЮЩЕЙ БВС КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Для анализа эффективности применения разработанного двухфазного алгоритма планирования параллельных вычислительных процессов была создана имитационная модель функционирования БВС КА в условиях деструктивных воздействий.

Моделирование заключалось в многократном формировании планов ПВП различными алгоритмами планирования (*LTM*, *GTM*, *MF*, *MF+* и разработанным двухфазным алгоритмом *LTM+MF*), генерации случайной величины – момента времени деградации БВС, расчете и сравнении между собой средней остаточной производительности БВС, реализующей различные планы ПВП.

При моделировании момента времени деградации БВС использовались три закона распределения случайной величины – равномерный, экспоненциальный и нормальный [6]. Модель БВС включала 2, 4, 6 и 8 ВМ. Количество распределяемых задач варьировалось в интервале от 10 до 50, а длительность каждой задачи представляла собой случайное число в диапазоне от 1 до 30.

Сравнение результативности планирования разными алгоритмами проводилось через отношение средней остаточной производительности БВС, функционирующей по плану ПВП, сформированному разработанным двухфазным алгоритмом *LTM+MF*, к средней остаточной производительности БВС, функционирующей по планам ПВП, которые были сформированы соответственно алгоритмами *LTM*, *GTM*, *MF*, *MF+*:

$$\varepsilon_{LTM} = \frac{\bar{S}_{LTM+MF}}{\bar{S}_{LTM}};$$

$$\varepsilon_{GTM} = \frac{\bar{S}_{LTM+MF}}{\bar{S}_{GTM}};$$

$$\varepsilon_{MF} = \frac{\bar{S}_{LTM+MF}}{\bar{S}_{MF}};$$

$$\varepsilon_{MF+} = \frac{\bar{S}_{LTM+MF}}{\bar{S}_{MF+}}.$$

На рис. 4 представлены зависимости

$$\varepsilon_{\Xi}^* = (\varepsilon_{\Xi} - 1) \cdot 100\%,$$

где Ξ – алгоритм, с которым сравнивается двухфазный алгоритм *LTM+MF*, от величины p , равной отношению математического ожидания момента времени деградации БВС к интервалу планирования ПВП. Величина ε_{Ξ}^* представляет собой относительный выигрыш (в процентах) в остаточной производительности БВС, который можно получить при использовании алгоритма *LTM+MF*. Этот выигрыш зависит от вида и параметров распределения момента времени деградации БВС.

В проведенном численном эксперименте наименьший средний выигрыш отмечен в сравнении с алгоритмом *LTM*: до 9% – при нормальном распределении момента времени деградации БВС, до 12% – при экспоненциальном и до 13% – при равномерном.

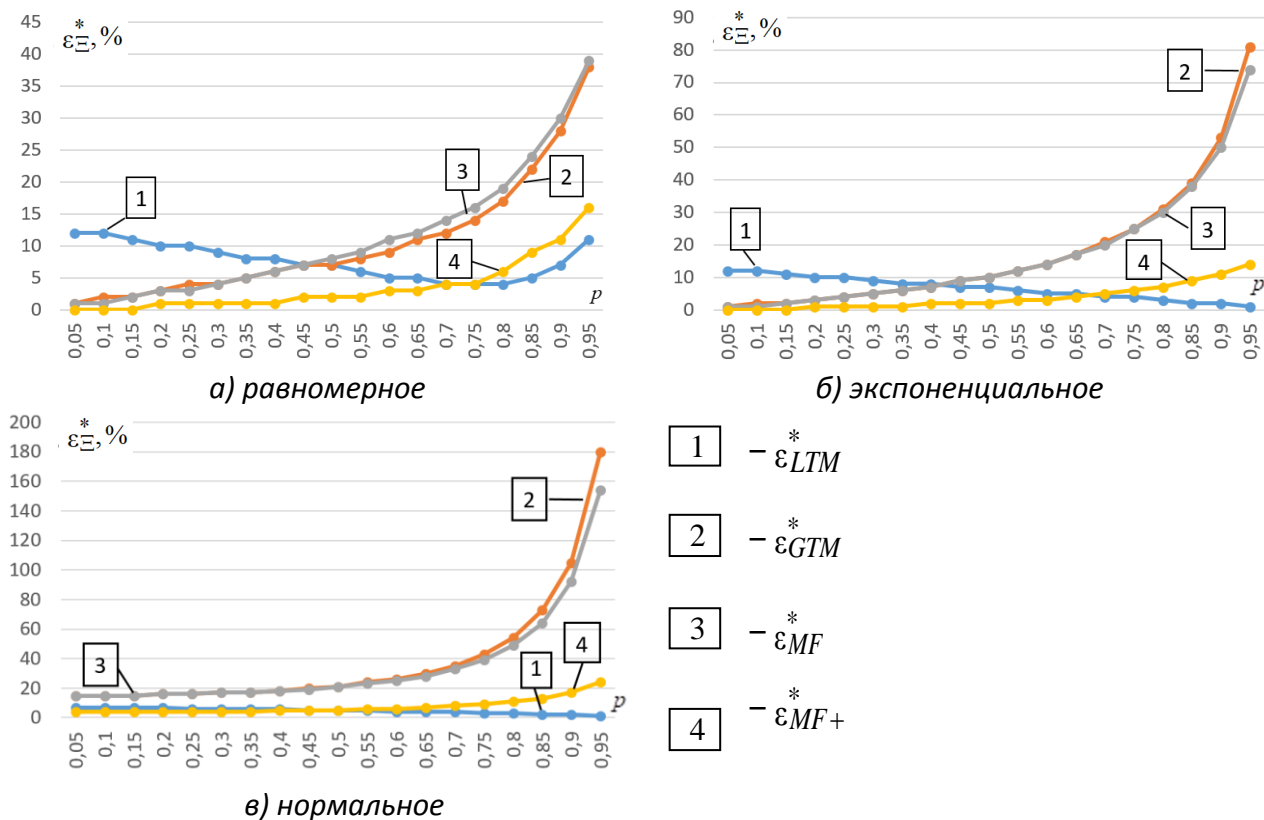


Рис. 4. Относительный выигрыш в средней остаточной производительности БВС при использовании разработанного алгоритма для различных законов распределения момента времени деградации БВС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход к планированию функционирования бортовой вычислительной системы КА позволяет назначать задачи на вычислительные модули БВС с учетом ее возможной деградации. Рассмотренный алгоритм полиномиальной сложности обеспечивает оперативное планирование параллельной обработки информации в БВС КА.

Научная новизна представленного алгоритма заключается в том, что, в отличие от известных, он позволяет рационально распределить работы (задачи) по исполнителям при случайном или неопределенном директивном сроке общего завершения всех работ.

Анализ результатов имитационного моделирования функционирования БВС КА в условиях ее возможной деградации свидетельствует о возможности существенного повышения остаточной производительности параллельной обработки информации в БВС КА на основе применения предлагаемого двухфазного алгоритма планирования ПВП.

Список используемых источников

1. Басыров А.Г., Захаров И.В., Забузов В.С. Метод превентивного функционально-параметрического конфигурирования бортовой вычислительной системы космического аппарата на основе прогнозирования ее деградации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 183–193.

2. Басьиров А.Г., Кошель И.Н., Шушаков А.О. Модель параллельных вычислений в деградирующей бортовой вычислительной системе космического аппарата // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 7–14.
3. Модели и методы исследования информационных систем: моногр. / под ред. А.Д. Хомоненко. – СПб.: Лань, 2019. – 204 с.
4. Барский А.Б. Параллельные информационные технологии: учеб. пособие. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 503 с.
5. Цилькер Б.Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем: учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2011.– 668 с.
6. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001.– 295 с.
7. Кустов В.Н. Основы теории ограниченного структурного параллелизма. – МО РФ, 1992. – 246 с.
8. Kunde M. A multifit algorithm for uniform multiprocessor scheduling / Bericht 8203, Institut für Informatik und Praktische Mathematik. – Kiel, 1990. – P. 175–185.

Н.В. Груздев,
кандидат военных наук, доцент

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ШТАТНОЙ СТРУКТУРЫ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ФОРМИРОВАНИЙ КОСМОДРОМА

В статье предлагается методика обоснования рациональной организационно-штатной структуры испытательных формирований космодрома, выполняющих задачи подготовки и пуска ракеты космического назначения. Суть данной методики заключается в том, чтобы при заданных технологических графиках подготовки и пуска ракеты космического назначения найти такое распределение специалистов, которое позволило бы обеспечить подготовку и пуск ракеты космического назначения с требуемым качеством.

Ключевые слова: организационно-штатная структура, испытательное формирование, технологический график, ракета космического назначения.

ВВЕДЕНИЕ

Практика обоснования облика организационно-технических систем различного назначения свидетельствует о том, что зачастую достигнутый уровень их эффективности оказывается ниже требуемого. В случае расхождения между требуемой и достигнутой эффективностями системы (наличия «дефицита» эффективности) возникает проблема поиска путей ее повышения. Одним из основных путей решения этой проблемы является обоснование рационального состава и структуры системы [1]. В настоящей статье предлагается рассмотреть методический подход к обоснованию рациональной организационно-штатной структуры (ОШС) испытательных формирований космодрома.

Функционирование испытательных формирований космодрома как организационно-технической системы (ОТС) предполагает привлечение большого количества специалистов различных квалификации и специальностей, в обязанности которых входит непосредственная реализация всего множества задач данной ОТС. К таким задачам относятся операции технологических графиков (ТГ) подготовки ракеты космического назначения (РКН) на техническом (ТК) и стартовом комплексах (СК), пуск РКН и послепусковые операции.

Рассматриваемая ОТС характеризуется несколькими типами структур, отражающими различные взаимосвязи элементов системы. Организационная структура ОТС характеризует состав и взаимоотношения специалистов, участвующих в функционировании системы. Для успешного решения возложенных на ОТС задач необходимо, чтобы они были управляемы, т. е. способны изменять свою структуру, состояния, параметры, режимы функционирования в различных условиях обстановки [2].

Большой объем и сложность выполняемых работ вызывают необходимость рационального распределения и загрузки специалистов, организации взаимодействия как отдельных специалистов, так и структурных подразделений.

ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимое количество специалистов в испытательных формированиях космодрома зависит от ряда факторов. К числу таких факторов относятся: требуемая оперативность выполнения целевых задач, трудоемкость выполнения задач, ресурсы рабочего времени каждого специалиста, взаимозаменяемость отдельных категорий специалистов.

При формальной постановке задачи определения количества специалистов в испытательном формировании будем учитывать следующие исходные данные:

$N = \{n_k, k \in L\}$, $L = \{1, \dots, l\}$ – множество специалистов соответствующих категорий и квалификаций (расчет подготовки и пуска РКН);

t_{ki} – общий ресурс времени, расходуемый специалистами k -й категории для выполнения i -й операции ТГ подготовки РКН на техническом комплексе и стартовом комплексе;

τ_{ki} – трудоемкости решения i -й операции ТГ специалистами k -й категории, отражающие общие затраты времени, необходимые для выполнения операции ТГ специалистами данной квалификации;

$P = \{p_j, j \in J\}$, $J = \{1, \dots, m\}$ – множество подразделений, в которых реализуется выполнение операций ТГ.

Постановка задачи определения оптимального количества специалистов в подразделениях испытательного формирования имеет следующий вид:

$$f(x) = \sum_{j=1}^m x_{kj} \rightarrow \min, \quad x \in \Delta, \quad (1)$$

где x_{kj} – количество специалистов, необходимое для выполнения задач подготовки и пуска РКН;

Δ – множество допустимых решений.

Решение такой задачи должно удовлетворять ряду ограничений, которые задают множество допустимых решений Δ :

$$x \geq 0, \quad (2)$$

$$x = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)^T, \quad \forall x_j - \text{целое.} \quad (3)$$

Определение рациональной организационно-штатной структуры испытательного формирования космодрома проводится в три этапа:

– на первом этапе определяется минимальное количество специалистов испытательного формирования;

– на втором этапе определяется численность необходимого резерва специалистов испытательного формирования;

– на третьем этапе оцениваются достаточность специалистов и степень их загруженности при выполнении операций технологических графиков подготовки и пуска РКН.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА СПЕЦИАЛИСТОВ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ

Подготовка составных частей РКН на стартовом и техническом комплексах осуществляется в соответствии с инструкциями по эксплуатации ракетно-космического комплекса (РКК). Инструкции определяют объем, последовательность и продолжительность операций при подготовке к пуску РКН. В инструкциях также отражены работы в случае принятия решения на перенос или отмену пуска. Сетевые графики подготовки РКН составляются без учета технологических пауз, необходимых для отдыха расчетов в ночное время и для организации перерывов в работе (рис. 1).

К основным этапам подготовки РКН к пуску относятся:

– подготовка составных частей РН на техническом комплексе;

– транспортирование разгонного блока (РБ) на заправочно-нейтрализационную станцию (ЗНС);

– заправка РБ компонентами ракетных топлив (КРТ) и сжатыми газами;

– транспортирование заправленного РБ на ТК;

– сборка космической головной части (КГЧ);

- транспортирование РКН с ТК на СК;
- подготовка РКН на СК и проведение пуска.

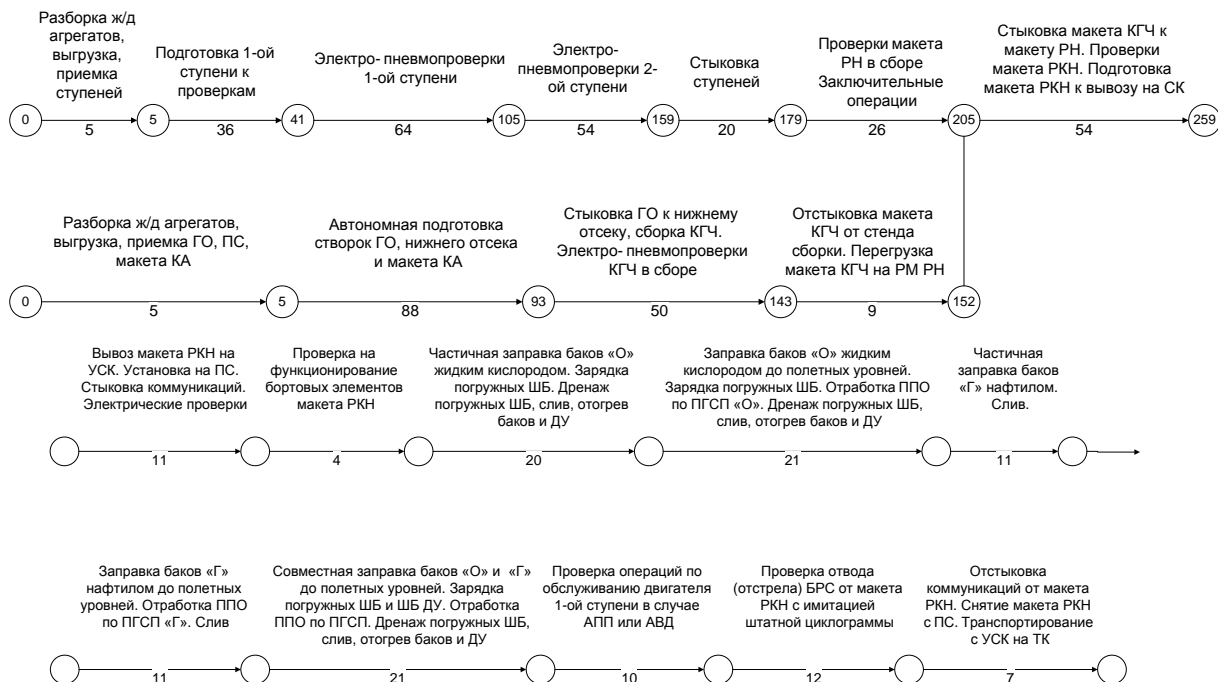


Рис. 1. Вариант сетевых графиков подготовки РКН на ТК и СК

Минимальное количество специалистов N_{\min} испытательного формирования, необходимого для выполнения операций технологического графика подготовки РКН на ТК и СК предлагается определить опытным путем в ходе проведения испытаний при подготовке РКН к пуску, а также в ходе проведения технического обслуживания составных частей РКН, агрегатов и систем ТК и СК. Определение N_{\min} проводится на этапе летно-конструкторских испытаний РКН в ходе проведения работ на ТК и СК. При расчете N_{\min} учитываются штатная численность личного состава испытательного формирования, а также численность расчета подготовки РКН, установленная эксплуатационной документацией (табл. 1).

Таблица 1

Вариант численного состава расчетов подготовки РКН на ТК и СК

Расчеты подготовки РКН	Количество специалистов	
	Инженеры	Техники
<i>Технический комплекс</i>		
Расчет электроиспытаний системы управления	3	-
Расчет двигательной установки и конструкции ракеты-носителя	3	1
Расчет транспортировки и систем термостатирования	4	2
Расчет автоматизированной системы кондиционирования воздуха и фильтрации	2	3
Расчет газоснабжения	1	1
<i>Стартовый комплекс</i>		
Расчет установки РКН на агрегат обслуживания	2	4
Расчет системы дистанционного управления	5	-
Расчет заправки	8	11
Расчет термостатирования	6	7
Расчет системы пожаротушения	1	5

Для определения $N_{оп}$ проводится несколько опытов выполнения каждой операции с последовательным увеличением количества занятых в ней исполнителей на одного человека в пределах существующей численности расчета. Максимально допустимым является такое количество исполнителей операции, дальнейшее увеличение которых не приводит к сокращению продолжительности ее выполнения. После уточнения сетевых графиков, на основе полученных статистических данных, определяют сроки совершения событий и резервы времени на выполнение операций как разницу между полученной их продолжительностью и продолжительностью, указанной в графиках. В процессе опытного определения количества специалистов $N_{оп}$ испытательного формирования выполняется хронометрирование операций ТГ и составляется карта хронометрирования. Каждая операция, подлежащая выполнению несколькими исполнителями, разбивается на отдельные элементы, выполняемые от начала и до конца одним исполнителем (подстыковка штепсельного разъема, установка колодки, вскрытие люка и т. п.) и включается в карту хронометрирования.

В процессе хронометрирования операций ТГ определяются минимальные численности специалистов N_{min}^B и N_{min}^C испытательного формирования. Эти численности обозначают: N_{min}^B – количество специалистов высокой квалификации, имеющих высшее техническое образование (инженеры); N_{min}^C – количество специалистов средней квалификации, имеющих среднее техническое образование (техники).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ НЕОБХОДИМОГО РЕЗЕРВА СПЕЦИАЛИСТОВ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ

Для определения численности необходимого резерва специалистов требуется рассмотреть все технологические графики, которые способны выполнить испытательное формирование в соответствии с поставленными задачами, наличием наземного технологического оборудования и его мест дислокации. Резерв специалистов необходимо обеспечить с целью снижения нагрузки на личный состав испытательного формирования при выполнении операций ТГ. Имеющийся резерв специалистов компенсирует отсутствующий личный состав по причине болезней, отпусков, командировок. Кроме того, номер расчета, допустивший в ходе эксплуатации космических средств несанкционированные действия, нарушения правил эксплуатации или требований безопасности, приведшие или создавшие предпосылки к происшествию, а также показавший неудовлетворительные знания и навыки по требованиям безопасности, отстраняется от работы.

Пусть испытательное формирование выполняет множество G из I технологических графиков. Каждый технологический график G_i ($i = 1, \dots, I$) состоит из J_i операций, для выполнения каждой из которых необходимо определенное количество специалистов соответствующих категорий N_{ji}^B и N_{ji}^C . Эти категории обозначают: N_{ji}^B – количество специалистов высокой квалификации, необходимое для выполнения j -той операции i -го ТГ; N_{ji}^C – количество специалистов средней квалификации, необходимое для выполнения j -той операции i -го ТГ.

В ходе решения задачи выбираем максимальное значение:

$$N_i^B = \max_j N_{ji}^B \quad (4)$$

$$N_i^C = \max_j N_{ji}^C \quad (5)$$

Продельваем эту процедуру для всех ТГ и определяем максимальное значение для каждой категории специалистов:

$$N_{max}^B = \max_i N_i^B, \quad (6)$$

$$N_{max}^C = \max_i N_i^C. \quad (7)$$

Необходимый резерв специалистов испытательного формирования определяется как разница максимальной и минимальной численностей специалистов соответствующих категорий:

$$N_{\text{рез}}^B = N_{\text{max}}^B - N_{\text{min}}^B, \quad (8)$$

$$N_{\text{рез}}^C = N_{\text{max}}^C - N_{\text{min}}^C. \quad (9)$$

Схема алгоритма определения необходимого резерва специалистов испытательного формирования представлена на рис. 2.

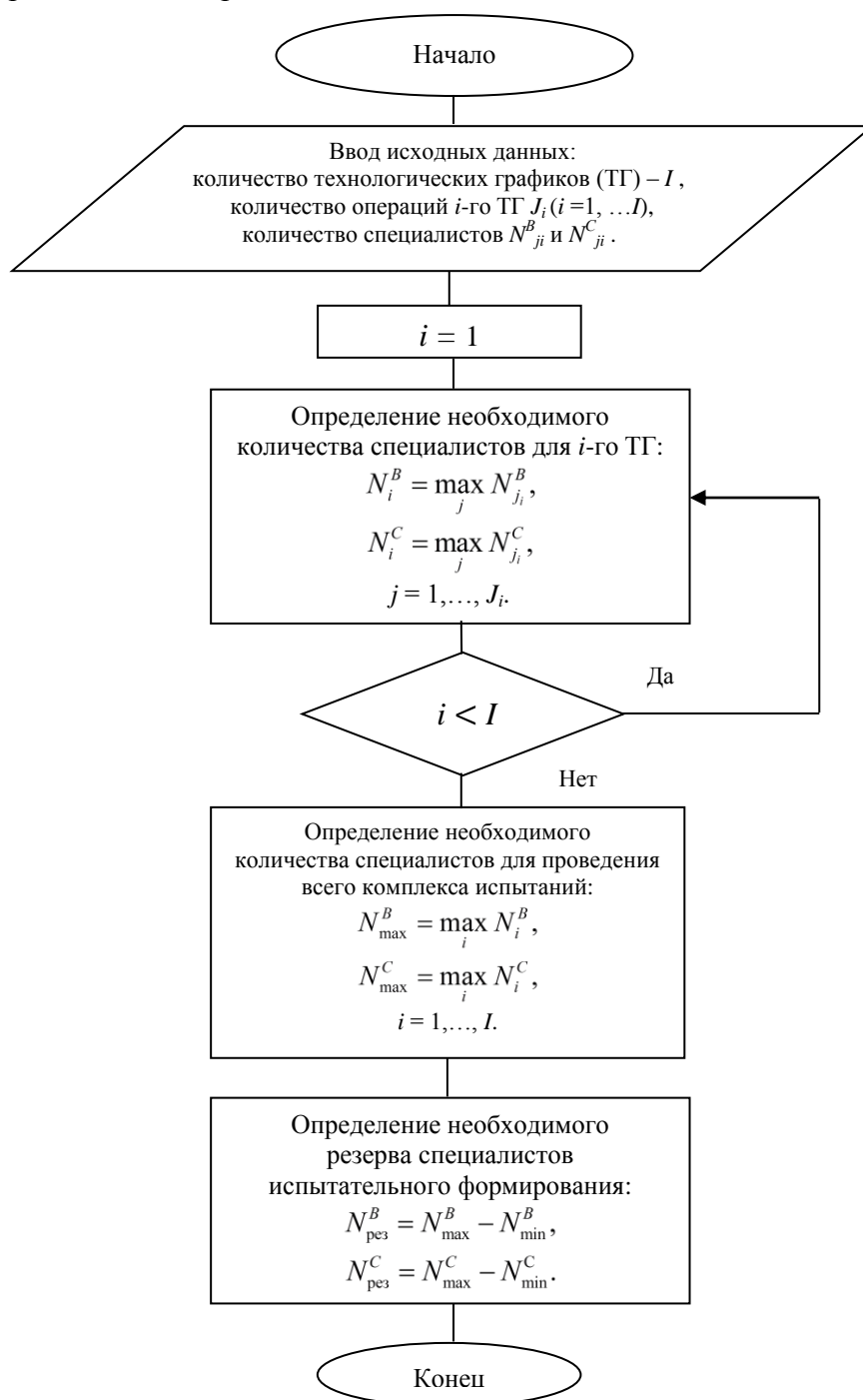


Рис. 2. Схема алгоритма определения необходимого резерва специалистов в испытательном формировании

ОЦЕНИВАНИЕ ДОСТАТОЧНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ И СТЕПЕНИ ИХ ЗАГРУЖЕННОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГРАФИКОВ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА РКН

С целью оценивания достаточности специалистов и степени их загруженности при выполнении операций технологических графиков введем соответствующие коэффициенты достаточности и загруженности специалистов.

Коэффициент достаточности специалистов определяется по формуле

$$K_d = \frac{N_{\phi}}{N_{\max}}, \quad (10)$$

где N_{ϕ} – фактическая численность специалистов, установленная штатным расписанием;
 N_{\max} – требуемая численность специалистов, необходимая для выполнения работ по подготовке РКН, а также проведения годового технического обслуживания агрегатов и систем ТК и СК.

Коэффициент загруженности специалистов определяется по формуле:

$$K_z = \frac{T_p}{T_{\text{подг}}}, \quad (11)$$

где T_p – среднее приведенное время работы расчета в ходе подготовки РКН,

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^k T_i * n_i}{N_{\text{расч}}};$$

$N_{\text{расч}}$ – общая численность оцениваемого расчета;
 $T_{\text{подг}}$ – общее время подготовки РКН на ТК (СК);
 T_j – время работы расчета в i -й операции;
 n_j – число исполнителей i -й операции в расчете.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДОСТАТОЧНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ И СТЕПЕНИ ИХ ЗАГРУЖЕННОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГРАФИКА

С целью оценивания достаточности специалистов и степени их загруженности при выполнении операций технологических графиков, примем в качестве исходных данных численность специалистов основных расчетов подготовки и пуска РКН «Рокот» на техническом и стартовом комплексах.

Достаточность специалистов оценивается в соответствии с инструкциями по эксплуатации и технологическими графиками работ по подготовке агрегатов и систем ТК и СК. В качестве показателей достаточности специалистов и степени их загруженности при выполнении операций технологических графиков рассчитаем коэффициент достаточности специалистов K_d и коэффициент загруженности специалистов K_z .

Результаты оценивания достаточности и загруженности специалистов при подготовке РКН «Рокот» на техническом комплексе представлены на рис. 3.

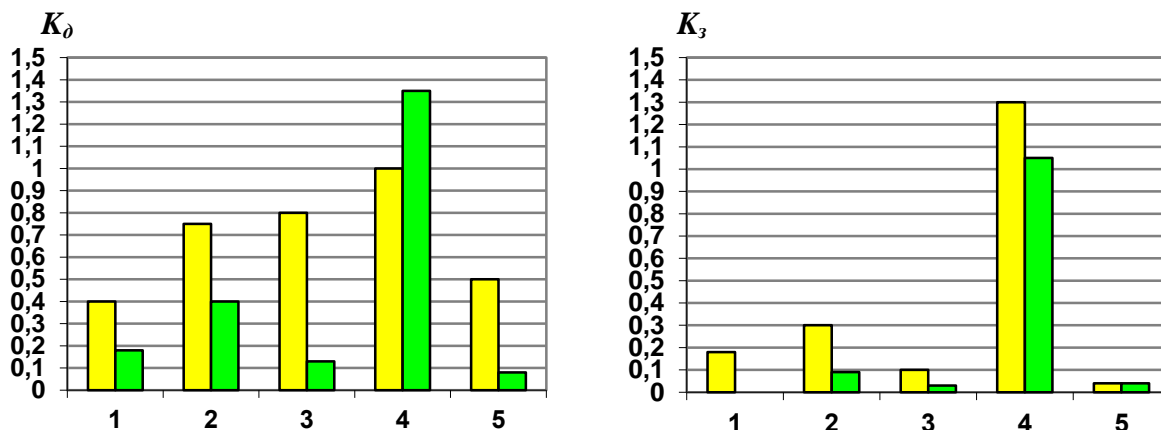


Рис. 3. Результаты оценивания достаточности и загрузки специалистов при подготовке РКН «Рокот» на техническом комплексе

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

– для категорий специалистов испытательного формирования:

 – специалисты высокой квалификации (инженеры);

 – специалисты средней квалификации (техники);

– для основных расчетов технического комплекса:

1 – расчет электроиспытаний системы управления;

2 – расчет двигательной установки (ДУ) и конструкции ракеты-носителя (РН);

3 – расчет транспортировки и систем термостатирования;

4 – расчет автоматизированной системы кондиционирования воздуха и фильтрации;

5 – расчет газоснабжения.

Результаты оценивания достаточности и загрузки специалистов при подготовке РКН «Рокот» на стартовом комплексе представлены на рис. 4.

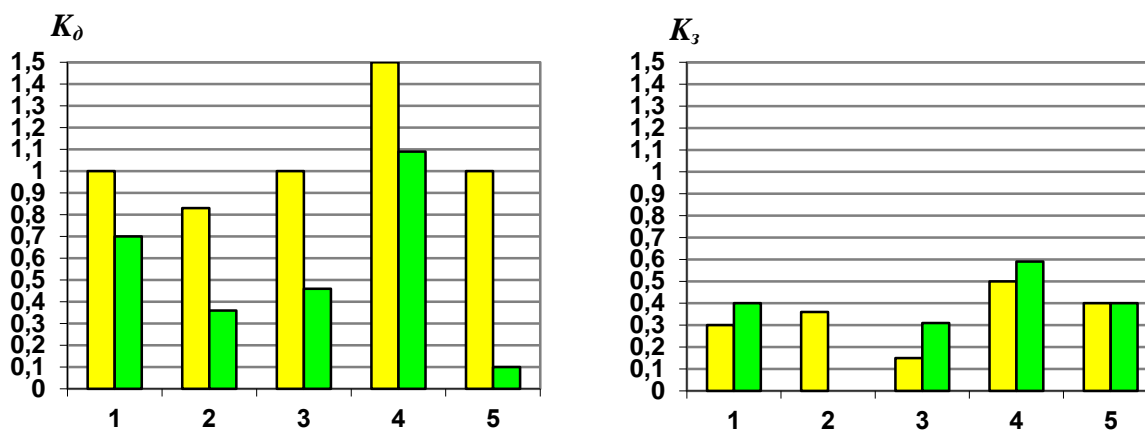



Рис. 4. Результаты оценивания достаточности и загрузки специалистов при подготовке РКН «Рокот» на стартовом комплексе

На рис. 4 приняты следующие обозначения:

– для категорий специалистов испытательного формирования:

 – специалисты высокой квалификации (инженеры);

 – специалисты средней квалификации (техники);

- для основных расчетов стартового комплекса:
 - 1 – расчет установки РКН на агрегат обслуживания;
 - 2 – расчет системы дистанционного управления;
 - 3 – расчет заправки;
 - 4 – расчет термостатирования;
 - 5 – расчет системы пожаротушения.

Результаты расчетов, представленные в виде гистограмм на рис. 3 и 4, показывают неравномерное распределение и задействование специалистов испытательного формирования. Коэффициенты достаточности специалистов в расчетах на ТК в основном ниже 1, что говорит о необходимости доукомплектования расчетов. Однако, если оценивать по коэффициентам загруженности, то задействование номеров расчетов на фоне всего цикла подготовки РКН на техническом и стартовом комплексах весьма слабое. Формирование расчетов подготовки и пуска РКН обусловлено сложностью технологии подготовки РКН. Все расчеты имеют определенную специализацию, поэтому достичь $K_3 = 1$ возможно, если расчет ежедневно на протяжении всего цикла подготовки РКН будет работать в полном составе в течение всего рабочего времени. Статистика проведенных работ показывает что, как правило, уложиться в установленные сроки при подготовке РКН к пуску не удастся из-за отказов в бортовой и наземной аппаратуре. Как следствие, появляются дополнительные трудоемкие операции, выполняемые по отдельным техническим решениям (заданиям). Продолжительность таких работ может быть от нескольких часов до нескольких суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, подтверждается необходимость оптимизации организационно-штатных структур испытательных формирований космодрома. При этом, как показывает практика эксплуатации ракетно-космических комплексов, уровень профессиональной подготовки номеров расчетов достаточен для выполнения поставленных задач в установленные сроки.

При оптимизации ОШС испытательных формирований космодрома необходимо также учитывать проведение технического обслуживания космических средств и наземного технологического оборудования.

Предложенная методика позволяет решить задачу обоснования рациональной организационно-штатной структуры испытательных формирований космодрома. При этом учитываются особенности применения состоящей на вооружении ракетно-космической техники и технологические графики подготовки и пуска РКН, что обеспечивает подготовку и пуск РКН с требуемым качеством.

Список используемых источников

1. Коробейников А.С., Ярыгин Ю.Н., Скопин Д.В. Методический подход к обоснованию рационального состава и структуры многофункциональной организационно-технической системы военного назначения // Вооружение и экономика. – 2010. – № 2(10). – С. 21–30.
2. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник / А.Н. Павлов [и др.]; под общ. ред. А.Н. Павлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 360 с.
3. Москвин Б.В. Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 383 с.

4. *Головчинский В.О., Козлов В.В., Лагун А.В.* Координация ресурсораспределения в иерархической структуре ракетно-космического комплекса // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 207–215.

5. *Груздев Н.В., Крупский К.А., Шавин А.С.* Методика обоснования рационального состава экспериментально-испытательной базы полигона (космодрома) в соответствии с потребностями обеспечения испытаний космических средств // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 250–256.

6. *Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю., Хлебников С.Г.* Имитационная модель управления ресурсами космодрома // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 25–34.

С.А. Диченко^{*},
кандидат техн. наук;

О.А. Финько^{*,**},
доктор техн. наук, профессор

^{*} Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции
Краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко, г. Краснодар;

^{**} Российская академия ракетных и артиллерийских наук, г. Москва

КОНТРОЛЬ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ В ЗАЩИЩЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО- АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассматриваются системно-функциональные аспекты построения защищенных информационно-аналитических систем при решении задачи надежного и безопасного хранения данных. Предлагается способ формализованного представления данных в системах хранения защищенных информационно-аналитических систем для описания конструкций контроля и восстановления их целостности в условиях разрушающих воздействий злоумышленника и среды.

Представлена математическая модель контроля и восстановления целостности данных на основе «криптокодовых» преобразований, основанных на агрегировании методов из области безопасности информации и методов теории надежности.

Показана особенность комплексирования существующих решений, заключающаяся в осуществлении контроля и восстановления целостности данных с одновременным снижением вводимой избыточности контрольной информации (по сравнению с методами кратного резервирования), а также в обеспечении подсистемы защиты информации информационно-аналитических систем новым свойством – подтверждением достоверности и полноты восстановления целостности данных.

Представлены результаты оценивания полученной подсистемы защиты информации.

Ключевые слова: защищенные информационные системы, хранилища данных, представление данных в многомерной форме, контроль целостности данных, восстановление целостности данных, криптографические методы, помехоустойчивое кодирование, криптокодовые конструкции, эмерджентность.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач государства по развитию отрасли информационных технологий является развитие центров обработки и хранения информации как материальной основы для обработки и хранения больших массивов данных [1]. Разработке новых методов и алгоритмов сбора, хранения и интеллектуального анализа больших объемов данных, способов хранения и других видов обработки посвящено достаточно много научных и практических работ [2–6]. Однако вопросы обеспечения устойчивости функционирования информационных систем в условиях постоянного возрастания объемов информации, обрабатываемой при разрушающих воздействиях злоумышленника и среды, по нашему мнению, оставались до последнего времени без должного глубокого научного изучения. Известны работы [7–10], в которых задача построения устойчивых информационных систем решалась исключительно через обеспечение их живучести, надежности и помехоустойчивости. При этом проблемы безопасности информации, обрабатываемой в информационных системах или хранящейся в подсистемах хранения, во многих своих аспектах остаются за рамками исследований. Актуальность проведения таких исследований подтверждается необходимостью развития защищенных информационно-аналитических систем (ИАС), предназначенных для обработки специальной информации, достоверность и полнота которой играют особую роль.

Важным сегментом ИАС является система хранения данных (СХД). Качество ее функционирования во многом определяет уровень основных показателей самой ИАС, таких как обоснованность и своевременность принимаемых должностными лицами решений.

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В современных условиях увеличения объема и ценности обрабатываемой информации при создании и внедрении новых СХД возникает проблема нахождения решения задачи эффективного контроля и восстановления целостности хранящейся в них информации.

Особую актуальность разработка СХД с эффективными решениями для контроля и восстановления целостности данных приобретает при ограничениях на их ресурсы. В этом случае объем вводимой для контроля и восстановления целостности данных избыточности будет иметь большое значение при обеспечении устойчивости ИАС в процессе их целевого функционирования.

Многokратное резервирование данных и вычисление эталонных значений, сравниваемых при осуществлении контроля целостности данных после каждого восстановления, могут привести к полному израсходованию ресурсов СХД, наступление которого, в свою очередь, приведет к снижению вероятности выполнения задачи их функционирования или даже к ее невыполнению. Несмотря на это на сегодняшний день наиболее популярным из существующих решений является обеспечение целостности данных. При осуществлении такого решения, к сожалению, задачи контроля и восстановления целостности данных решаются раздельно: для контроля целостности данных применяются криптографические преобразования, а для восстановления целостности – методы теории надежности (технология резервного копирования), что, как известно, достигается ценой высокой избыточности. Кроме того, общепринятая последовательность решения задачи – сначала контроль, а затем, в случае обнаружения ошибки, восстановление целостности данных – приводит к отсутствию возможности подтверждения правильности восстановления данных. Это является критичным для защищенных ИАС, в которых обрабатывается специальная информация.

Для устранения указанных недостатков предлагается объединить методы теории надежности и безопасности информации, а также построить криптокодовые конструкции для контроля и восстановления целостности данных. Несмотря на то, что предлагаемый подход обеспечения целостности данных недостаточно исследован, а известные предложения по применению подобных решений весьма немногочисленны [11–13], комплексирование известных классических решений должно позволить снизить вводимую избыточность при заданном уровне защищенности данных.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

Зафиксировав два произвольных измерения на одном из срезов гиперкуба данных [14], получим множество ячеек – блоков данных, которые обозначим как M_i ($i = 1, 2, \dots, k$) блоки, полученные посредством декомпозиции гиперкуба данных M . Такое представление данных будет являться представлением данных в 1-мерном пространстве.

В 1-мерном пространстве данные также можно представить путем фиксирования двух разных измерений гиперкуба данных на различных срезах. При этом получим два пересекающихся в пространстве сечения, содержащие в себе множество ячеек – блоков данных M_i .

Полученные блоки данных могут интерпретироваться:

– как целые неотрицательные числа, представленные в двоичной системе счисления:

$$M_i = (\mu_{i-1}^i \dots \mu_1^{(i)} \mu_0^{(i)})_2,$$

где $\mu_g^{(i)} \in \{0,1\}$; $g = 0,1,\dots,t-1$;

– как элементы расширенного поля $\text{GF}(2^t)$:

$$M_i(z) = \sum_{g=0}^{t-1} \mu_g^{(i)} z^g = \mu_{t-1}^{(i)} z^{t-1} + \mu_{t-2}^{(i)} z^{t-2} + \dots + \mu_0^{(i)},$$

где z – фиктивная переменная; $\mu_g^{(i)} \in \{0,1\}$; $g = 0,1,\dots,t-1$;

– как векторы:

$$\mathbf{M}_i = [\mu_1^{(i)} \quad \mu_2^{(i)} \quad \dots \quad \mu_t^{(i)}],$$

где $\mu_g^{(i)} \in \{0,1\}$; $g = 1,2,\dots,t$.

Декомпозиция гиперкуба \mathbf{M} (при векторной интерпретации) представлена как

$$\text{Frag}(M) = [\mathbf{M}_1 \parallel \mathbf{M}_2 \parallel \dots \parallel \mathbf{M}_k],$$

где $\text{Frag}(M)$ – операция фрагментации;

« \parallel » – операция конкатенации (объединения);

k – размерность гиперкуба M .

Порядок выполнения фрагментации при декомпозиции гиперкуба данных на блоки данных в 1-мерном пространстве поясняется с помощью рис. 1.

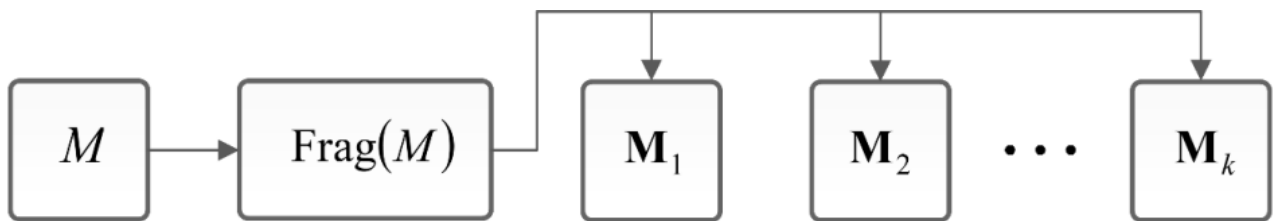


Рис. 1. Декомпозиция гиперкуба данных на блоки в 1-мерном пространстве

В результате получим вектор

$$\Omega = [\mathbf{M}_1 \quad \mathbf{M}_2 \quad \dots \quad \mathbf{M}_k]. \quad (1)$$

В то же время, зафиксировав одно измерение, получим сечение гиперкуба данных, состоящее из ячеек M_{ij} ($i = 1,2,\dots,n$; $j = 1,2,\dots,k$) блоков данных. Такое представление будет являться представлением данных в 2-мерном пространстве. В этом случае полученные блоки данных могут интерпретироваться:

– как двоичные числа:

$$M_{ij} = (\mu_{t-1}^{(ij)} \dots \mu_1^{(ij)} \mu_0^{(ij)})_2,$$

где $\mu_g^{(ij)} \in \{0,1\}$; $g = 0,1,\dots,t-1$;

– как элементы расширенного поля $\text{GF}(2^t)$:

$$M_{ij}(z) = \sum_{g=0}^{t-1} \mu_g^{(ij)} z^g = \mu_{t-1}^{(ij)} z^{t-1} + \mu_{t-2}^{(ij)} z^{t-2} + \dots + \mu_0^{(ij)},$$

где $\mu_g^{(ij)} \in \{0,1\}$; $g = 0,1,\dots,t-1$; или векторы

$$\mathbf{M}_{ij} = [\mu_1^{(ij)} \quad \mu_2^{(ij)} \quad \dots \quad \mu_t^{(ij)}],$$

где $\mu_g^{(ij)} \in \{0,1\}$; $g = 1,2,\dots,t$.

Декомпозиция гиперкуба M в этом случае представлена как

$$\text{Frag}(M) = [\mathbf{M}_{11} \parallel \dots \parallel \mathbf{M}_{1k} \parallel \mathbf{M}_{21} \parallel \dots \parallel \mathbf{M}_{2k} \parallel \dots \parallel \mathbf{M}_{n1} \parallel \dots \parallel \mathbf{M}_{nk}].$$

Порядок выполнения операции фрагментации при декомпозиции гиперкуба данных на блоки данных в 2-мерном пространстве поясняется с помощью рис. 2.

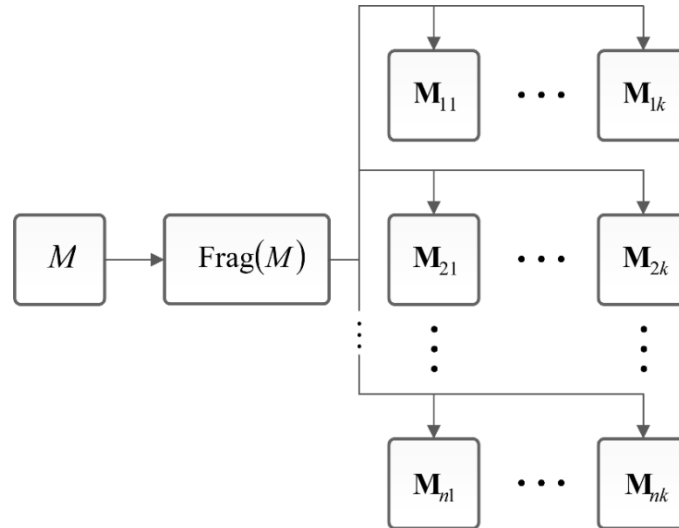


Рис. 2. Декомпозиция гиперкуба данных на блоки в 2-мерном пространстве

В результате получим $n \times k$ матрицу

$$\Psi = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} & \dots & \mathbf{M}_{1k} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} & \dots & \mathbf{M}_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{M}_{n1} & \mathbf{M}_{n2} & \dots & \mathbf{M}_{nk} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Также матрицу (2) можно получить путем заполнения произвольной матрицы векторами $\mathbf{M}_{i1}, \mathbf{M}_{i2}, \dots, \mathbf{M}_{ik}$ вида (1).

В соответствии с работой [15] хранящиеся в многомерном кубе данные могут быть представлены p -мерной матрицей, где совокупность элементов обозначим как $C_{i_1 \dots i_p}$ (индексы $i_1 \dots i_p$ принимают значения от 1 до n_a ; $a = 1, \dots, p$). При этом p -мерная матрица, содержащая $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_p$ элементов, обозначается как

$$\mathbf{C}_M = [c_{i_1 \dots i_p}].$$

Рассматривая многомерный куб данных как систему координат (для 3-мерного куба с осями x, y, z), к примеру, при фиксировании значений по оси x , получим:

– при $x = 1$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{111} & \mathbf{M}_{112} & \dots & \mathbf{M}_{11r} \\ \mathbf{M}_{121} & \mathbf{M}_{122} & \dots & \mathbf{M}_{12r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{M}_{1k1} & \mathbf{M}_{1k2} & \dots & \mathbf{M}_{1kr} \end{bmatrix};$$

– при $x = 2$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{211} & \mathbf{M}_{212} & \dots & \mathbf{M}_{21t} \\ \mathbf{M}_{221} & \mathbf{M}_{222} & \dots & \mathbf{M}_{22t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{M}_{2k1} & \mathbf{M}_{2k2} & \dots & \mathbf{M}_{2kt} \end{bmatrix}$$

и так далее до случая, когда $x = n$. Тогда

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{n11} & \mathbf{M}_{n12} & \dots & \mathbf{M}_{n1t} \\ \mathbf{M}_{n21} & \mathbf{M}_{n22} & \dots & \mathbf{M}_{n2t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{M}_{nk1} & \mathbf{M}_{nk2} & \dots & \mathbf{M}_{nkt} \end{bmatrix}.$$

При этом каждому блоку данных M_{ijr} ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, k$; $r = 1, 2, \dots, t$) определяется его место – определенная ячейка, в которой будет размещаться его содержимое. Такое представление данных в виде (1) или (2) позволит описать конструкции контроля и восстановления их целостности.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Общей характерной чертой, объединяющей известные в настоящее время решения обеспечения целостности данных в СХД, является устоявшаяся последовательность применения криптографических методов (к примеру, функции хэширования) – для контроля целостности данных и методов теории надежности (наиболее популярна технология резервного копирования) – для восстановления целостности данных, что, как известно [16–18], достигается ценой высокой избыточности.

Кроме того, в условиях разрушающих воздействий общепринятая последовательность решения задачи – сначала контроль, а затем, в случае обнаружения ошибки, восстановление целостности данных – приводит к невозможности подтверждения правильности восстановления целостности данных, так как указанная процедура является вероятностной [19–21]. Это критично для защищенных ИАС, в которых обрабатывается специальная информация.

Для одновременного контроля и восстановления данных с подтвержденной (криптографическими методами) целостностью предлагается построение так называемых «криптокодовых» конструкций [22, 23], применение которых позволит исключить недостатки известных решений.

Правила построения криптокодовых конструкций будут определяться посредством φ -функции («фи-функции»), под которой будем понимать функцию, отображающую совокупность данных X и Y в дополнительные данные Z :

$$\varphi^{(nD)}(X, Y) := Z.$$

где nD – мерность пространства, в котором выполняются преобразования (зависит от модели представления данных в СХД). К примеру, $n = 1, 2, 3, \dots$ обозначает: одномерное, двумерное и трехмерное пространство соответственно; X и Y – аргументы φ -функции, являющиеся результатами разных типов преобразований. При этом данные X будут использоваться для контроля целостности данных, подлежащих защите, а данные Y – для последующей возможности восстановления их целостности.

Например, если за аргументы φ -функции X, Y принять значения функций кодирования $f(M)$ и хэширования $h(M)$ соответственно, где M – произвольный блок данных, подлежащий защите, то φ -функцию можно представить как

$$\varphi^{(nD)}(f(M); h(M)) := Z.$$

Значения функций кодирования $X = f(M)$ и хэширования (сигнатуры) $Y = h(M)$ будем считать «контрольными символами», используемыми для контроля и восстановления целостности, а значение φ -функции Z – дополнительными «контрольными символами», используемыми при обеспечении целостности произвольного блока данных гиперкуба M , подлежащего защите.

Пример 1. В 2-мерном пространстве (частный случай) под φ -функцией понимается функция, отображающая совокупность данных, представленных двоичными векторами X_{iv} и Y_{gj} , в дополнительные данные Z_{gv} :

$$\varphi^{(2D)}(X_{iv}, Y_{gj}) := Z_{gv},$$

где X_{iv} , Y_{gj} – контрольные символы, полученные в результате преобразований над данными, представленными блоками M_{ij} ;

Z_{gv} – дополнительные контрольные символы.

Получим

$$\Psi = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} & \dots & \mathbf{M}_{1k} & \mathbf{X}_{11} & \dots & \mathbf{X}_{1\nu} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} & \dots & \mathbf{M}_{2k} & \mathbf{X}_{21} & \dots & \mathbf{X}_{2\nu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{M}_{n1} & \mathbf{M}_{n2} & \dots & \mathbf{M}_{nk} & \mathbf{X}_{n1} & \dots & \mathbf{X}_{n\nu} \\ \hline \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} & \dots & \mathbf{Y}_{1k} & \mathbf{Z}_{11} & \dots & \mathbf{Z}_{1\nu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{u1} & \mathbf{Y}_{u2} & \dots & \mathbf{Y}_{uk} & \mathbf{Z}_{u1} & \dots & \mathbf{Z}_{u\nu} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где X_{iv} , Y_{gj} и Z_{gv} – двоичные векторы, являющиеся элементами матрицы (3), образующие подматрицы $[X_{iv}]$, $[Y_{gj}]$ и $[Z_{gv}]$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $\nu = 1, 2, \dots, \nu$; $j = 1, 2, \dots, k$; $g = 1, 2, \dots, u$).

Приняв за аргументы результаты вычислений функций кодирования $f(\mathbf{M}_{ij})$ и хэширования $h(\mathbf{M}_{ij})$, φ -функцию можно представить выражением

$$\varphi^{(2D)}(f(\mathbf{M}_{ij}), h(\mathbf{M}_{ij})) := Z_{gv}.$$

Здесь аргументами φ -функции являются значения функций кодирования $f(\mathbf{M}_{ij})$ и хэширования $h(\mathbf{M}_{ij})$, которые условно будем считать контрольными символами X_{iv} и Y_{gj} соответственно. Порядок вычисления дополнительных контрольных символов Z_{gv} , являющихся результатом преобразований, в которых принимают участие контрольные символы Y_{gj} , X_{iv} матрицы (3), поясняется с помощью рис. 3.

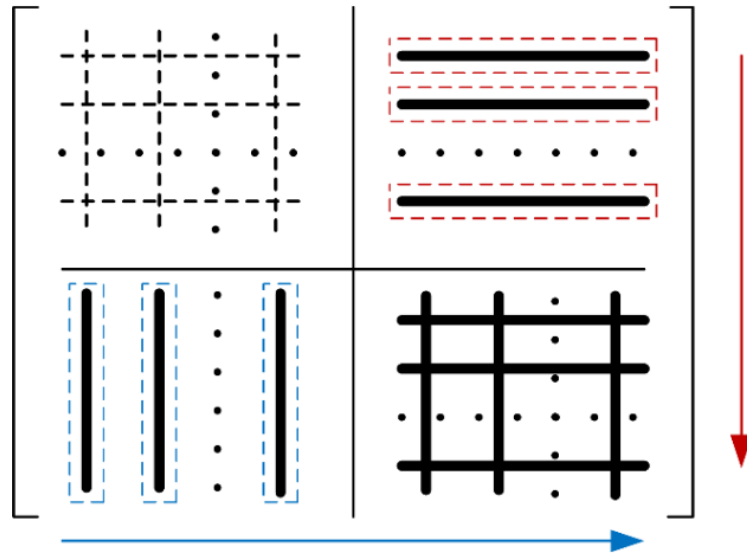


Рис. 3. Порядок вычисления дополнительных контрольных символов

Сокращенно матрицу (3) можно записать как

$$\Psi = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{M}_{ij} & \mathbf{X}_{iv} \\ \hline \mathbf{Y}_{gj} & \mathbf{Z}_{gv} \end{array} \right],$$

где \mathbf{Z}_{gv} – элемент матрицы Ψ , являющийся результатом вычисления φ -функции.

ПОРЯДОК ПРИМЕНЕНИЯ φ -ФУНКЦИИ ВО ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВЕ

Применение φ -функции во времени определяется очередностью использования ее аргументов при выполнении преобразований.

Пример 2. При вычислении $\varphi^{(2D)}$ -функции от двух аргументов, представленных значениями функций кодирования $f(M)$ и хэширования $h(M)$, существует только два варианта очередности следования аргументов, для которых есть единственное преобразование. Это определяется свойством φ -функции. В представленном примере очередность следования аргументов не имеет значения.

Важное значение очередность следования аргументов при преобразованиях имеет при вычислении φ -функции в n -мерном пространстве, где n принимает значение от 3 и выше (соответственно, при этом количество аргументов также принимает значение от 3 и выше).

Пример 3. Рассмотрим вычисление $\varphi^{(3D)}$ -функции в 3-мерном пространстве от трех аргументов, представленных значениями функции кодирования $f(M)$ и двух ключевых хэш-функций $h_{k_1}(M)$ и $h_{k_2}(M)$, где k_1, k_2 – секретные ключи.

Все возможные варианты очередности применения $\varphi^{(3D)}$ -функции для этого случая представлены в табл. 1.

Таблица 1

Порядок применения $\varphi^{(3D)}$ -функции во времени

Вид $\varphi^{(nD)}$ -функции	Виды аргументов $\varphi^{(nD)}$ -функции	Очередность применения аргументов		
		1-й элемент	2-й элемент	3-й элемент
$\varphi^{(3D)}$	$f(M);$ $h_{k_1}(M);$ $h_{k_2}(M)$	$f(M)$	$h_{k_1}(M)$	$h_{k_2}(M)$
		$f(M)$	$h_{k_2}(M)$	$h_{k_1}(M)$
		$h_{k_1}(M)$	$f(M)$	$h_{k_2}(M)$
		$h_{k_1}(M)$	$h_{k_2}(M)$	$f(M)$
		$h_{k_2}(M)$	$f(M)$	$h_{k_1}(M)$
		$h_{k_2}(M)$	$h_{k_1}(M)$	$f(M)$

Применение φ -функции в пространстве поясняется с помощью рис. 4, на котором представлены все возможные варианты применения $\varphi^{(3D)}$ -функции. Здесь используется система координат с тремя осями: x, y, z (частный случай для 3-мерного куба данных).

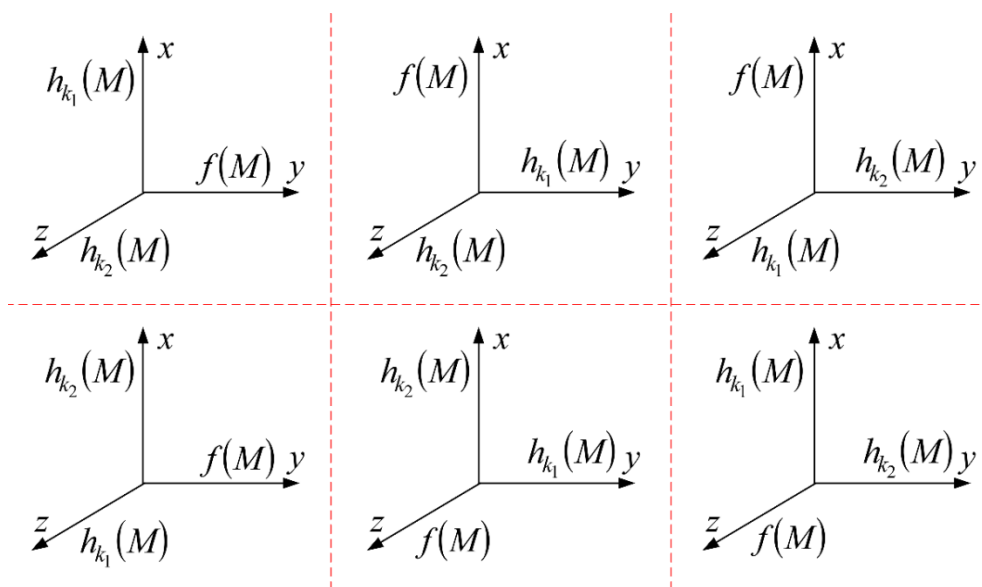


Рис. 4. Варианты применения $\varphi^{(3D)}$ -функции в пространстве

При применении φ -функции в пространстве учитывается последовательность выполнения преобразований в системе координат по осям.

СВОЙСТВА φ -ФУНКЦИИ

Свойства φ -функции подразделяются на две группы.

К первой группе относятся свойства, характеризующие правила выполнения преобразований для той или иной φ -функции. Так, посредством φ -функции для контрольных символов

X и Y из множества G ($X \in G, Y \in G$) определен дополнительный контрольный символ Z , причем таким образом, что

$$\varphi^{(nD)}(Z, Y) := X; \quad \varphi^{(nD)}(X, Z) := Y.$$

Ко второй группе относятся свойства, появляющиеся в результате выполнения преобразований. У построенных путем применения φ -функции криптокодовых конструкций, позволяющих обеспечивать целостность данных, где аргументы X и Y – значения функций кодирования $f(M)$ и хэширования $h(M)$ соответственно, появляется эмерджентное свойство: исправляющие способности $t_{\text{испр}}$ используемого избыточного кода (корректирующего ошибки) функции $f(M)$ равны его обнаруживающей способности $t_{\text{обн}}$, так как функция локализации ошибок выполняется за счет применения криптографической хэш-функции ($h(M)$).

ОПЕРАЦИИ С КРИПТОКОДОВЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

Кроме преобразований, совершаемых над данными – двоичными векторами \mathbf{M}_{ij} , определенный интерес представляет исследование операций с самой матрицей данных (3). Эти операции позволяют определить порядок размещения основных и контрольных данных в пространстве памяти СХД, что с технической точки зрения может оказывать влияние на некоторые характеристики СХД, если это влияет на последовательность выполняемых СХД операций.

Операция «вращения» матрицы. Посредством поворотов матрицы (3) могут быть получены еще три эквивалентных матрицы (рис. 5).

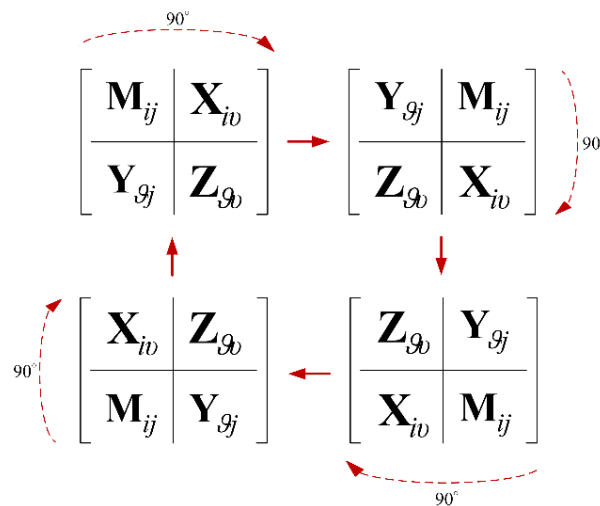


Рис. 5. Операция «вращения» матрицы

Утверждение 1. При поворотах матрицы (3) ее свойства, связанные с возможностями по контролю и обеспечению целостности данных, не изменяются.

Доказательство. Рассмотрим матрицы, порождаемые при «вращении» матрицы (3), при этом под кратностью «вращения» будем понимать количество поворотов матрицы на 90° .

При однократном вращении матрица (3) примет вид

$$\Psi^{(1)} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \mathbf{Y}_{u1} & \cdots & \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{M}_{n1} & \cdots & \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{11} \\ \mathbf{Y}_{u2} & \cdots & \mathbf{Y}_{12} & \mathbf{M}_{n2} & \cdots & \mathbf{M}_{22} & \mathbf{M}_{12} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{uk} & \cdots & \mathbf{Y}_{1k} & \mathbf{M}_{nk} & \cdots & \mathbf{M}_{2k} & \mathbf{M}_{1k} \\ \hline \mathbf{Z}_{u1} & \cdots & \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{X}_{n1} & \cdots & \mathbf{X}_{21} & \mathbf{X}_{11} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{uv} & \cdots & \mathbf{Z}_{1v} & \mathbf{X}_{nv} & \cdots & \mathbf{X}_{2v} & \mathbf{X}_{1v} \end{array} \right], \quad (4)$$

при двукратном вращении –

$$\Psi^{(2)} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \mathbf{Z}_{uv} & \cdots & \mathbf{Z}_{u1} & \mathbf{Y}_{uk} & \cdots & \mathbf{Y}_{u2} & \mathbf{Y}_{u1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{1v} & \cdots & \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Y}_{1k} & \cdots & \mathbf{Y}_{12} & \mathbf{Y}_{11} \\ \hline \mathbf{X}_{nv} & \cdots & \mathbf{X}_{n1} & \mathbf{M}_{nk} & \cdots & \mathbf{M}_{n2} & \mathbf{M}_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{X}_{2v} & \cdots & \mathbf{X}_{21} & \mathbf{M}_{2k} & \cdots & \mathbf{M}_{22} & \mathbf{M}_{21} \\ \mathbf{X}_{1v} & \cdots & \mathbf{X}_{11} & \mathbf{M}_{1k} & \cdots & \mathbf{M}_{12} & \mathbf{M}_{11} \end{array} \right], \quad (5)$$

при трехкратном вращении –

$$\Psi^{(3)} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \mathbf{X}_{1v} & \mathbf{X}_{2v} & \cdots & \mathbf{X}_{nv} & \mathbf{Z}_{1v} & \cdots & \mathbf{Z}_{uv} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{21} & \cdots & \mathbf{X}_{n1} & \mathbf{Z}_{11} & \cdots & \mathbf{Z}_{u1} \\ \hline \mathbf{M}_{1k} & \mathbf{M}_{2k} & \cdots & \mathbf{M}_{nk} & \mathbf{Y}_{1k} & \cdots & \mathbf{Y}_{uk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{M}_{12} & \mathbf{M}_{22} & \cdots & \mathbf{M}_{n2} & \mathbf{Y}_{12} & \cdots & \mathbf{Y}_{u2} \\ \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{21} & \cdots & \mathbf{M}_{n1} & \mathbf{Y}_{11} & \cdots & \mathbf{Y}_{u1} \end{array} \right]. \quad (6)$$

Элементы матрицы \mathbf{X}_{iv} , \mathbf{Y}_{gj} , обозначающие контрольные символы, вычисляются от одних и тех же блоков данных, представленных двоичными векторами \mathbf{M}_{ij} .

Пример 4. Контрольные символы: \mathbf{X}_{11} и \mathbf{Y}_{12} являются результатами преобразований над соответствующими элементами строк и столбцов как матрицы (3), так и матриц (4)–(6):

$$\mathbf{X}_{11} = f(\mathbf{M}_{11}, \mathbf{M}_{12}, \dots, \mathbf{M}_{1k});$$

$$\mathbf{Y}_{12} = f(\mathbf{M}_{12}, \mathbf{M}_{22}, \dots, \mathbf{M}_{n2}).$$

При поворотах (3) состав и значения контрольных и дополнительных контрольных символов X_{iv} , Y_{gj} , Z_{gv} , а следовательно, и свойства матрицы (в соответствии с основной целевой функцией) остаются неизменными. Матрицы (3) и (4)–(6) эквивалентны.

Транспонирование матрицы. Матрица

$$\Omega = \Psi^T = \left[\begin{array}{cccc|ccc} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{21} & \dots & \mathbf{M}_{n1} & \mathbf{Y}_{11} & \dots & \mathbf{Y}_{u1} \\ \mathbf{M}_{12} & \mathbf{M}_{22} & \dots & \mathbf{M}_{n2} & \mathbf{Y}_{12} & \dots & \mathbf{Y}_{u2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{M}_{1k} & \mathbf{M}_{2k} & \dots & \mathbf{M}_{nk} & \mathbf{Y}_{1k} & \dots & \mathbf{Y}_{uk} \\ \hline \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{21} & \dots & \mathbf{X}_{n1} & \mathbf{Z}_{11} & \dots & \mathbf{Z}_{u1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{X}_{1v} & \mathbf{X}_{2v} & \dots & \mathbf{X}_{nv} & \mathbf{Z}_{1v} & \dots & \mathbf{Z}_{uv} \end{array} \right], \quad (7)$$

получающаяся из матрицы (3) заменой строк столбцами, будет называться транспонированной по отношению к матрице Ψ .

Утверждение 2. Транспонирование матрицы (3) порождает эквивалентную (в смысле образуемых с ее помощью возможностей по контролю и восстановлению целостности данных) матрицу (7).

Доказательство. Элементы матрицы X_{iv} , Y_{gj} , обозначающие контрольные символы, вычисляются от одних и тех же блоков данных, представленных двоичными векторами M_{ij} .

Пример 5. Контрольные символы X_{11} и Y_{12} являются результатами преобразований над соответствующими элементами строк и столбцов как матрицы (3), так и матриц (7):

$$\begin{aligned} X_{21} &= f(\mathbf{M}_{21}, \mathbf{M}_{22}, \dots, \mathbf{M}_{2k}); \\ Y_{11} &= f(\mathbf{M}_{11}, \mathbf{M}_{21}, \dots, \mathbf{M}_{n1}); \\ Z_{11} &= f(\mathbf{X}_{11}, \mathbf{X}_{21}, \dots, \mathbf{X}_{n1}; \mathbf{Y}_{11}, \mathbf{Y}_{12}, \dots, \mathbf{Y}_{1k}). \end{aligned}$$

Таким образом, при транспонировании матрицы (3) состав и значения контрольных и дополнительных контрольных символов X_{iv} , Y_{gj} , Z_{gv} , а следовательно, и ее свойства не изменятся. Матрицы (3) и (7) эквивалентны.

Представление операции «вращения» матрицы через операции транспонирования и умножения матриц. Последовательное выполнение операций транспонирования матрицы и ее последующее умножение на матрицу

$$\Psi^{(1)} = \Psi^T \times \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

позволяют получить матрицу вида (4).

Для получения матрицы (5) необходимо выполнить следующее преобразование:

$$\Psi^{(2)} = (\Psi^{(1)})^T \times \mathbf{Z},$$

$$\text{где } \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для получения матрицы (6) – преобразование

$$\Psi^{(3)} = (\Psi^{(2)})^T \times \mathbf{Z}.$$

Таким образом, операция «вращения» матрицы может быть представлена через операции транспонирования и умножения матриц.

ОЦЕНИВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ

Как известно, качество любого рассматриваемого объекта полностью может проявиться только при использовании его по назначению [24]. Поэтому вопрос обеспечения устойчивости функционирования защищенных ИАС является актуальным в первую очередь в условиях разрушающих воздействий при существующих ограничениях на ресурсы СХД. В этом случае объем вводимой для контроля и восстановления целостности данных избыточности имеет существенное значение.

Многokратное резервирование данных после каждого восстановления их целостности в момент времени t ведет к деградации ресурсов СХД защищенных ИАС, при наступлении которой может потребоваться удаление части ценной информации. Это, в свою очередь, может привести к снижению вероятности выполнения задачи функционирования ИАС. Поэтому в качестве показателей качества определим объем вводимой избыточности $V_{\text{изб}}$ для заданного уровня защищенности данных.

Оценивание разработанной подсистемы защиты информации ИАС выполним в сравнении с известным решением, основанным на совместном использовании контроля целостности данных за счет криптографических преобразований и восстановления целостности на основе технологии резервного копирования.

С учетом того, что контроль целостности данных в предлагаемом и существующих решениях осуществляется посредством известных алгоритмов применения хэш-функции, где объемы вводимой избыточности контрольной информации равны, оценивание выполним только для этапа восстановления целостности данных.

При восстановлении целостности данных в известном решении, где применяется технология резервного копирования, объем вводимой избыточности при каждом восстановлении целостности равен 100% от общего объема данных, подлежащих защите. В разработанной подсистеме при применении, к примеру, многозначного кода для восстановления целостности данных потребуется ввод меньшей избыточности. Например, при возникновении ошибки в двух блоках данных достаточно применить расширенный многозначный код (например, модулярный код, код Рида – Соломона и др.), содержащий два избыточных символа. При этом объем вводимой избыточности уменьшится от 100% (дублирование) до 30–40%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен способ формализованного представления данных в СХД, который послужил основой для моделирования процесса контроля и восстановления целостности данных в защищенных ИАС на основе ранее предложенных авторами криптокодовых преобразований.

Представленная модель, базирующаяся на агрегировании методов криптографической защиты информации (область теоретических положений защиты информации) и теории кодов, контролируемых ошибки (область теории надежности), позволила получить *новое свойство* – обеспечение целостности данных с криптографической стойкостью в условиях разрушающих воздействий злоумышленника и среды для ИАС специального назначения.

Список используемых источников

1. Стратегия развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 1 ноября 2013 года № 2036-р. – URL: https://digital.gov.ru/common/upload/Strategiya_razvitiya_otrasli_IT_2014-2020_2025.pdf (дата обращения: 20.03.2020).
2. Черняк Л. Свежий взгляд на Большие Данные // Открытые системы. СУБД. – 2013. – № 7. – С. 48–51.
3. Dedić N., Stanier C. Towards Differentiating Business Intelligence, Big Data, Data Analytics and Knowledge Discovery // Innovations in Enterprise Information Systems Management and Engineering. Lecture Notes in Business Information Processing. 285. Berlin; Heidelberg: Springer International Publishing. – 2017. – P. 114–122.
4. Onay Ceylan, Öztürk Elif A review of credit scoring research in the age of Big Data // Journal of Financial Regulation and Compliance. – 2018. – № 26 (3). – P. 382–405.
5. Басыров А.Г., Широбоков В.В. Применение технологии «Облачных вычислений» для распределенной обработки информации в орбитальной группировке космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 644. – С. 130–133.
6. Калюжный А.В., Максимов В.А., Шушаков А.О. Модель функционирования гетерогенной бортовой системы хранения данных с учетом неоднородной информационной важности хранимых данных // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 33–40.
7. Модели и методы исследования информационных систем / А.Д. Хомоненко [и др.]. – СПб.: Лань, 2019. – 204 с.
8. Басыров А.Г., Захаров И.В. Оценивание живучести бортовых вычислительных систем космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 139–148.
9. Бучинский Д.И., Вознюк В.В., Фомин А.В. Исследование помехоустойчивости приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией к воздействию помех с различной структурой // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 120–127.
10. Флешман Б.С. Основы системологии. – М.: Радио и связь, 1982. – 368 с.
11. Dichenko S.A., Finko O.A. Two-dimensional control and assurance of data integrity in information systems based on residue number system codes and cryptographic hash functions // Integrating Research Agendas and Devising Joint Challenges «International Multidisciplinary Symposium ICT Research in Russian Federation and Europe». – 2018. – P. 139–146.
12. Диченко С.А., Финько О.А. Обобщенный способ применения хэш-функции для контроля целостности данных // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. – 2020. – Т. 12, № 6. – С. 48–59.
13. Диченко С.А., Финько О.А. Снижение вводимой избыточности при обеспечении устойчивости информационно-аналитических систем в условиях компенсации последствий деструктивных воздействий злоумышленника // Автоматизация процессов управления. – 2020. – №4(62). – С. 38–48.

14. *Тарасов С.В.* СУБД для программиста. Базы данных изнутри. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 320 с.
15. *Соколов Н.П.* Введение в теорию многомерных матриц. – М.: Просвещение, 2012. – 175 с.
16. *Schneier B.* Applied Cryptography Second Edition: protocols, algorithms and source code in C. – John Wiley & Sons, 2016. – 653 p.
17. *Menezes A.J., Oorschot P., Vanstone S.* Handbook of Applied Cryptography. – CRC Press, Inc, 2015. – 770 p.
18. *Hamming R.* Coding and Information Theory. – 3rd ed. – Prentice-Hall, 2008. – 259 p.
19. *Сапожников В.В.* Основы теории надежности и технической диагностики. – СПб.: Лань, 2019. – 588 с.
20. *Хетагуров Я.А.* Повышение надежности цифровых устройств методами избыточного кодирования. – 3-е изд. – М.: Энергия, 2015. – 376 с.
21. *Зубарев Ю.М.* Основы надежности машин и сложных систем. – СПб.: Лань, 2017. – 180 с.
22. *Диченко С.А., Финько О.А.* Гибридный крипто-кодовый метод контроля и восстановления целостности данных для защищенных информационно-аналитических систем // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 6(34). – С. 17–36.
23. *Диченко С.А.* Контроль и обеспечение целостности информации в системах хранения данных // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 49–57.
24. *Петухов Г.Б., Якунин В.И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.

Б.Д. Казахов,
доктор военных наук, профессор;
М.А. Кукушкин,
кандидат военных наук

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО- ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предлагается методический подход к выбору рациональных вариантов восстановления информационного обеспечения функционирования организационно-технических систем военного назначения, учитывающий как работоспособность средств связи, так и ее элементов, а также срочность передачи информации по сети связи для своевременного информационного обмена и использование резервных линий связи.

Ключевые слова: восстановление информационного обеспечения, организационно-технические системы военного назначения.

ВВЕДЕНИЕ

В современных военных конфликтах значительную роль играет информационное обеспечение функционирования организационно-технических систем военного назначения (ОТС ВН), поэтому вопросам повышения устойчивости информационного обмена в ОТС ВН уделяется особое внимание. Существующие научно-методические подходы [1–5] направлены на восстановление информационного обеспечения лишь с точки зрения повреждения средств связи и при этом не учитывают работоспособность других элементов ОТС ВН, в интересах которых данный информационный обмен и осуществляется. Известно, что при различных деструктивных воздействиях на ОТС ВН могут быть выведены из строя не только линии связи, но и другие элементы системы. В случае, если происходит нарушение линии связи и при этом оказываются неисправными элементы ОТС ВН на данном направлении, то работоспособность средств связи не будет оказывать влияния на информационный обмен в ОТС ВН. Тогда время, требующееся на восстановление информационного обмена, необходимо рассматривать исходя из расчетного времени восстановления работоспособности как линий связи, так и элементов ОТС ВН.

Кроме того, существующие методики не учитывают срочность передачи информации по сети связи для своевременного выполнения задач ОТС ВН. Известно, что информационный обмен в ОТС ВН приобретает особую важность именно в период выполнения данной системой задач по предназначению.

Также недооценены возможности использования радиосвязи в качестве резервной связи при восстановлении основной. Однако, рассчитав пропускную способность, требующуюся для обмена информацией в ОТС ВН, и оставшийся объем передаваемой информации, для своевременного выполнения задач системы по предназначению было бы вполне рационально временно использовать радиосвязь.

Восстановление информационного обеспечения функционирования ОТС ВН авторы предлагают рассмотреть на примере наземного комплекса управления (НКУ) орбитальными группировками космических аппаратов (ОГ КА), который представляет собой совокупность наземных средств, обеспечивающих управление ОГ КА определенного типа [6–11]. Для своевременного выполнения технологического цикла управления (ТЦУ) ОГ КА необходимо обеспечить информационный обмен между элементами НКУ, прежде всего центром управ-

ления полетами (ЦУП) и командно-измерительными системами (КИС), которые находятся на значительном удалении друг от друга.

В качестве среды распространения сигналов в сети связи НКУ могут использоваться спутниковые, радио-, радиорелейные и волоконно-оптические линии связи различной пропускной способности, но, безусловно, основными являются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Поэтому восстановление информационного обмена в НКУ ОГ КА будем рассматривать как восстановление ВОЛС и технических средств НКУ.

Если учесть высказанные выше соображения в отношении процесса восстановления информационного обеспечения функционирования ОТС ВН, то необходимо изменить весь алгоритм восстановления информационного обмена в НКУ ОГ КА. Для этого, по мнению авторов, следует осуществить следующие действия:

- пересмотреть выделение необходимого количества сил и средств связи с учетом состояния КИС и срочности передачи информации в НКУ;
- пересмотреть использование временных схем восстановления информационного обмена (временных оптических вставок и т. д.) в зависимости от срочности восстановления сети связи;
- рассмотреть возможность использования радиосвязи на время восстановления проводной связи;
- взглянуть по-новому на резервирование сил и средств связи для восстановления информационного обмена в сложных условиях обстановки [заблаговременно сформировать необходимое количества аварийно-восстановительных команд (АВК) для восстановления связи].

Чтобы решить данную задачу, необходимо разработать методику восстановления информационного обмена между элементами НКУ ОГ КА, в которой будут учтены все перечисленные выше обстоятельства.

Для начала сформулируем математическую постановку задачи и представим последовательность действий должностных лиц органов управления (ДЛОУ) по выбору рационального варианта восстановления информационного обмена в контуре управления ОГ КА.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Формализацию подхода к разработке методики выбора рационального варианта восстановления информационного обмена между элементами НКУ ОГ КА в различных условиях обстановки предлагаем выполнить следующим образом.

Дано:

1. Требования к функционированию сети связи между элементами НКУ ОГ КА:

- по оперативности выполнения мероприятий восстановления информационного обмена:

$$T^{\text{восст}} \leq T^{\text{тр}},$$

где $T^{\text{восст}}$ – время восстановления КИС и ВОЛС, $T^{\text{восст}} = \langle T^{\text{КИС}}, T^{\text{ВОЛС}} \rangle$;

- по ресурсоемкости (количеству сил и средств, задействованных для проведения мероприятий по восстановлению информационного обмена):

$$N^{\text{восст}} \leq N^{\text{тр}},$$

$$\text{где } N^{\text{восст}} = \left\{ \langle n_i^{\text{ЛС}}, n_j^{\text{СР}} \rangle \left| \begin{array}{l} n_i^{\text{ЛС}} \in N^{\text{ЛС}} = \{n_\beta^{\text{ЛС}}, \beta = \overline{1, B}\} \\ n_j^{\text{СР}} \in N^{\text{СР}} = \{n_\gamma^{\text{СР}}, \gamma = \overline{1, Z}\} \end{array} \right. \right\}.$$

Здесь $N^{\text{ЛС}}$ – количество личного состава, задействованного в восстановлении информационного обмена, $N^{\text{ЛС}} = \{n_\beta^{\text{ЛС}}, \beta = \overline{1, B}\}$;

N^{CP} – количество технических средств, задействованных в восстановлении информационного обмена, $N^{\text{CP}} = \{n_2^{\text{CP}}, \mathcal{Z} = \overline{1, \mathcal{Z}}\}$.

2. Граф сети связи G определяется соотношением

$$G = (E, H), \quad (1)$$

где E – командно-измерительные системы и центр управления полетом;
 H – линии связи, соединяющие КИС и ЦУП.

3. Интервалы времени между началом и окончанием проведения сеансов управления:

$$\Delta\tau_m = [t_m^{\text{H}}, t_m^{\text{K}}], m = \overline{1, M}. \quad (2)$$

4. Варианты резервирования линий связи НКУ:

$$W = \left\{ \widetilde{w} = \langle w_1, w_2, w_3 \rangle \left| \begin{array}{l} w_1 \in W_1 \\ w_2 \in W_2 \\ w_3 \in W_3 \end{array} \right. \right\}, \quad (3)$$

где W_1 – варианты резервирования радиолиниями связи;
 W_2 – варианты резервирования радиорелейными линиями связи;
 W_3 – варианты резервирования космическими линиями связи.

5. Варианты воздействия на ВОЛС и НКУ:

$$\Psi = \left\{ \widetilde{\psi} = \langle \psi_1, \psi_2, \psi_3 \rangle \left| \begin{array}{l} \psi_1 \in \Psi_1 \\ \psi_2 \in \Psi_2 \\ \psi_3 \in \Psi_3 \end{array} \right. \right\}, \quad (4)$$

где Ψ_1 – варианты вывода из строя КИС;
 Ψ_2 – варианты локального повреждения ВОЛС;
 Ψ_3 – варианты повреждения участков ВОЛС.

Требуется: построить множество допустимых вариантов выполнения мероприятий восстановления информационного обмена, исходя из возможных воздействий на КИС и ВОЛС:

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

где $\omega_k = \langle n_k^{\text{ЛС}}, n_k^{\text{СР}}, \widetilde{w}_k, \widetilde{\psi}_k \rangle$; $\widetilde{w}_k \in W$, $\widetilde{\psi}_k \in \Psi$.

Для обеспечения устойчивости информационного обмена в НКУ ОГ КА в различных условиях обстановки необходимо *найти рациональный вариант восстановления информационного обмена*, удовлетворяющий следующему критерию оперативности восстановления:

$$\omega^* = \arg \min_{\omega_k \in \Omega} T(\omega_k), \quad (6)$$

при ограничении:

$$\begin{aligned} n_*^{\text{ЛС}} &\leq n_{\text{ТР}}^{\text{ЛС}}, \\ n_*^{\text{СР}} &\leq n_{\text{ТР}}^{\text{СР}}. \end{aligned} \quad (7)$$

МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В НАЗЕМНОМ КОМПЛЕКСЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫМИ ГРУППИРОВКАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ОБСТАНОВКИ

При разработке методики необходимо принять следующие допущения:

- 1) в случае выхода из строя КИС расчетное время на ее восстановление $T^{\text{КИС}}$ получаем у специалистов, обслуживающих данные средства;
- 2) основной средой передачи информации в НКУ является ВОЛС;
- 3) в качестве резервных линий связи используются радиорелейные вставки, космическая связь, радиосвязь.

Методика выбора рационального варианта восстановления информационного обмена в НКУ ОГ КА в различных условиях обстановки представлена на рис. 1.

На первом этапе предъявляются требования к оперативности восстановления информационного обмена ($T^{\text{восст}} \leq T^{\text{ТР}}$) (блок 1 на рис. 1), при этом время на восстановление ВОЛС должно обеспечивать своевременную передачу командно-программной информации, траекторных измерений КА, телеметрической информации между ЦУП и КИС. Также задаются ограничения, связанные с ресурсоемкостью: $N^{\text{восст}} \leq N^{\text{ТР}}$.

При формировании исходных данных задается граф сети связи $G = (E, H)$, представляющий собой топологию типа «звезда», где одна вершина является ЦУП (e_1), эта вершина связана с другими вершинами графа – КИС ($e_2 \dots e_l$) дугами [линии связи между ЦУП и КИС ($\{h_f\}$)]. Задаются: интервал времени между началом и окончанием подготовки к проведению сеансов управления КА – $\Delta\tau_m = [t_m^H, t_m^K]$, $m = \overline{1, M}$; количество сил и средств, задействованных

в восстановлении функционирования ВОЛС – $N^{\text{восст}} = \left\{ \langle n_i^{\text{ЛС}}, n_j^{\text{СР}} \rangle \left| \begin{array}{l} n_i^{\text{ЛС}} \in N^{\text{ЛС}} = \{n_\beta^{\text{ЛС}}, \beta = \overline{1, B}\} \\ n_j^{\text{СР}} \in N^{\text{СР}} = \{n_\gamma^{\text{СР}}, \gamma = \overline{1, Z}\} \end{array} \right. \right\}$,

где $N^{\text{ЛС}} = \{n_\beta^{\text{ЛС}}, \beta = \overline{1, B}\}$ – количество личного состава, задействованного в восстановлении информационного обмена; $N^{\text{СР}} = \{n_\gamma^{\text{СР}}, \gamma = \overline{1, Z}\}$ – количество технических средств, задействованных в восстановлении информационного обмена, варианты резервирования линий

связи НКУ – $W = \left\{ \tilde{w} = \langle w_1, w_2, w_3 \rangle \left| \begin{array}{l} w_1 \in W_1 \\ w_2 \in W_2 \\ w_3 \in W_3 \end{array} \right. \right\}$, и варианты воздействия на информационный

обмен в НКУ – $\Psi = \left\{ \tilde{\psi} = \langle \psi_1, \psi_2, \psi_3 \rangle \left| \begin{array}{l} \psi_1 \in \Psi_1 \\ \psi_2 \in \Psi_2 \\ \psi_3 \in \Psi_3 \end{array} \right. \right\}$, (блок 2 на рис. 1).

Далее, согласно алгоритму (блок 3 на рис. 1), непрерывно проводится мониторинг функционирования как сети связи, так и всех КИС. При этом ВОЛС НКУ ОГ КА тестируется двумя известными способами [12]:

- с помощью автоматизированной системы контроля за состоянием линейного тракта;
- с помощью компьютерных программ, размещенных на серверном оборудовании.

В случае повреждения ВОЛС j_l (условие 4 на рис. 1), т. е. произошло воздействие по варианту 2 или 3: ψ_2 (ψ_3) = $\left\{ \langle \psi_2, \psi_3 \rangle \left| \begin{array}{l} \psi_2 \in \Psi_2 \\ \psi_3 \in \Psi_3 \end{array} \right. \right\}$, система мониторинга выдает сигнал о случившемся на автоматизированное рабочее место оператора и формирует информацию дистанционного контроля о характере и месте повреждения. Если воздействие не обнаружено, мониторинг продолжается.

При повреждении ВОЛС важно оперативно определить характер повреждения ВОЛС $\psi_2 \in \Psi_2$ или $\psi_3 \in \Psi_3$, чтобы выделить необходимое количество сил и средств для восстановления: $\{n_x^{\text{ЛС}}, x = \overline{1, X}\} \subseteq \{n_\beta^{\text{ЛС}}, \beta = \overline{1, B}\}$; $\{n_y^{\text{СР}}, y = \overline{1, Y}\} \subseteq \{n_\gamma^{\text{СР}}, \gamma = \overline{1, Z}\}$ (блок 5 на рис. 1).

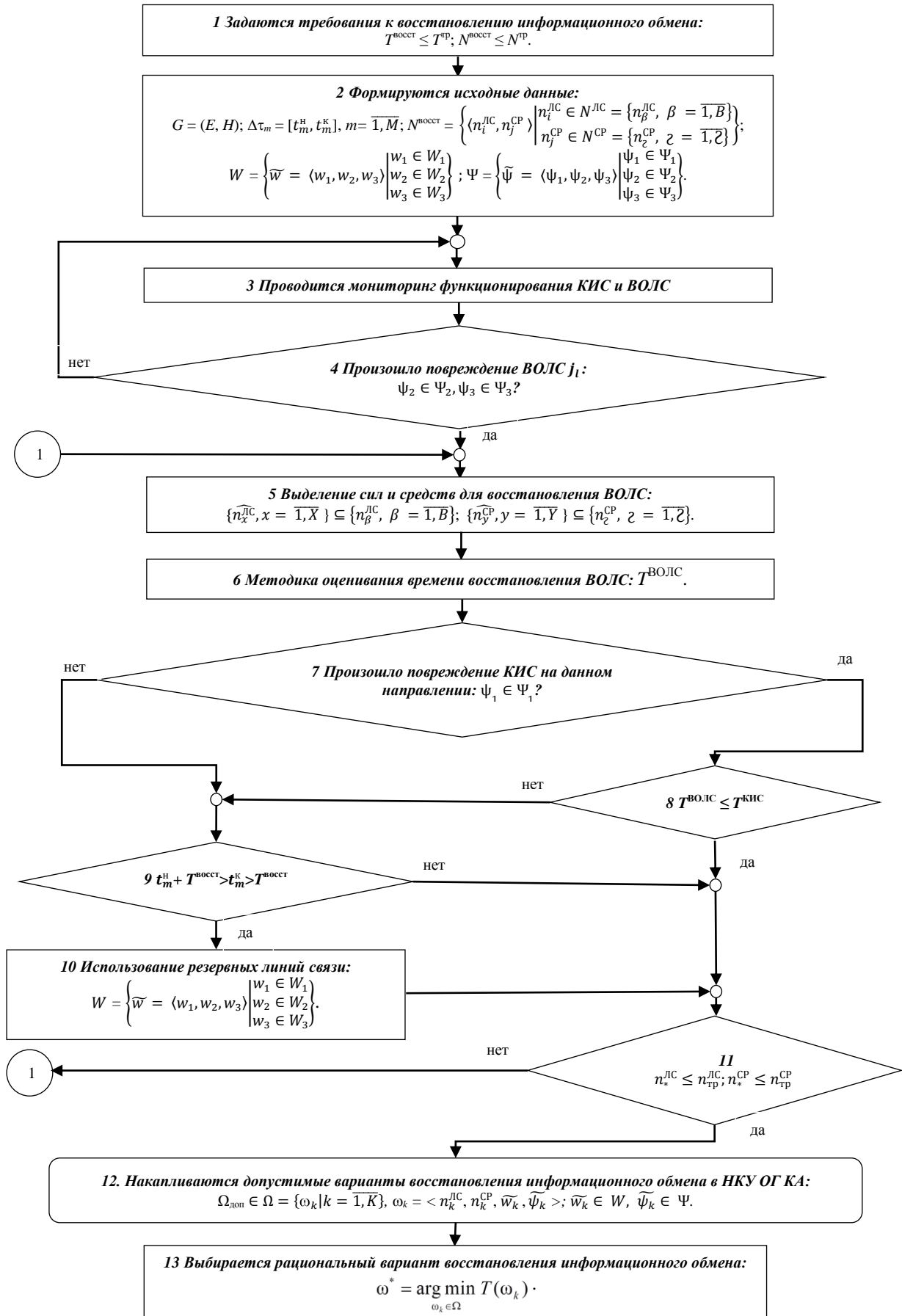


Рис. 1. Методика выбора рационального варианта восстановления информационного обмена в НКУ ОГ КА в различных условиях обстановки

Затем, согласно методике, рассчитывается время восстановления ВОЛС ($T^{\text{ВОЛС}}$) (см. блок 6 на рис. 1). Методика определения времени восстановления ВОЛС представлена на рис. 2.

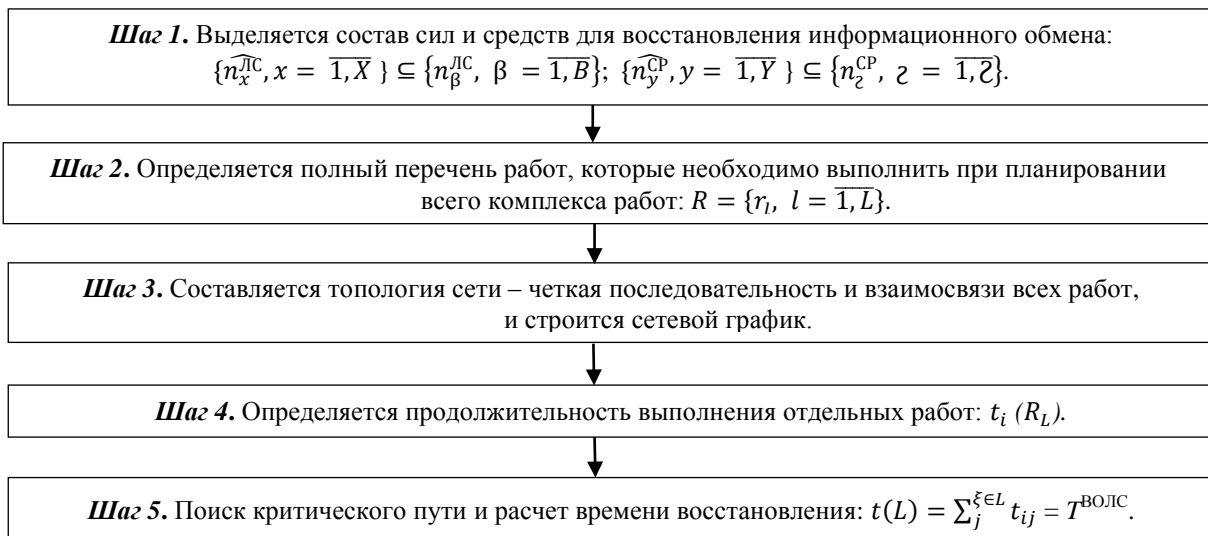


Рис. 2. Методика определения времени восстановления ВОЛС

Исходя из выделенного состава сил и средств (см. блок 5 на рис. 1), определяется полный перечень работ, которые необходимо выполнить при планировании всего комплекса работ: $R = \{r_l, l = \overline{1, L}\}$ (блок 2 на рис. 2), после чего составляется топология сети – четкая последовательность и взаимосвязи всех работ и строится сетевой график (блок 3 на рис. 2). Далее определяется продолжительность выполнения отдельных работ: $t_i (R_L)$ (блок 4 на рис. 2), находится критический путь и рассчитывается время восстановления ВОЛС: $t(L) = \sum_j^{\xi \in L} t_{ij} = T^{\text{ВОЛС}}$ (блок 5 на рис. 2).

Согласно методике (см. рис. 1), как ранее условились в допущениях, от специалистов получаем информацию о состоянии КИС на направлении, где произошло повреждение (см. условие 5 на рис. 1). Если это направление неисправно, то также получаем расчетное время восстановления поврежденного средства – $T_{\text{КИС}}$. Если условие (см. блок 8 на рис. 1) выполняется, то производим проверку условия (см. блок 11 на рис. 1), в противном случае определяем: попадает ли период восстановления ВОЛС в интервал подготовки к проведению СУ КА – $(t_m^{\text{H}} + T^{\text{восст}} > t_m^{\text{K}} > T^{\text{восст}})$, т. е. влияет ли отсутствие информационного обмена во время восстановления на функционирование НКУ (см. блок 9 на рис. 1). Если данное условие не выполняется, то переходим к блоку 11 (см. рис. 1). Если выполняется – используем резервные линии связи, а именно: радио-, радиорелейные и спутниковые, а также временные оптические вставки. Вначале рассчитываем восстановление ВОЛС с использованием временных оптических вставок, а затем оцениваем использование радиорелейных линий связи. В случае, если в результате переключения на резервные линии связи нарушится информационный обмен, но при этом объемы передаваемой информации на момент переключения небольшие, то следует в этот промежуток времени предусмотреть использование радиосвязи. В случае, если нет возможности использовать радиорелейные вставки, то рассматривается вариант применения космической связи.

Далее все перечисленные выше варианты восстановления и резервирования связи проверяются по критерию ресурсоемкости (см. блок 11 на рис. 1), и если он соблюдается, то происходит накопление всех допустимых вариантов восстановления ВОЛС НКУ ОГ КА – $\Omega_{\text{доп}} \in \Omega = \{\omega_k | k = \overline{1, K}\}$, где вариант включает: $\omega_k = \langle n_k^{\text{ЛС}}, n_k^{\text{СР}}, \widetilde{w}_k, \widetilde{\psi}_k \rangle$, $n_i^{\text{ЛС}} \in N^{\text{ЛС}} =$

$= \{n_{\beta}^{\text{ЛС}}, \beta = \overline{1, B}\}, n_j^{\text{СР}} \in N^{\text{СР}} = \{n_{\zeta}^{\text{СР}}, \zeta = \overline{1, Z}\}, \bar{w}_k \in W, \bar{\psi}_k \in \Psi$. Если условие не выполняется, то происходит перераспределение сил и средств (см. блок 5 на рис. 1).

Из сформированного набора допустимых вариантов восстановления ВОЛС (см. блок 13 на рис. 1) выбирается один, имеющий наименьшее время восстановления ВОЛС НКУ ОГ КА.

Зависимости времени восстановления информационного обмена в НКУ ОГ КА от количества задействованных аварийно-восстановительных команд (АВК), как с использованием методики, так и без нее, представлены на рис. 3.

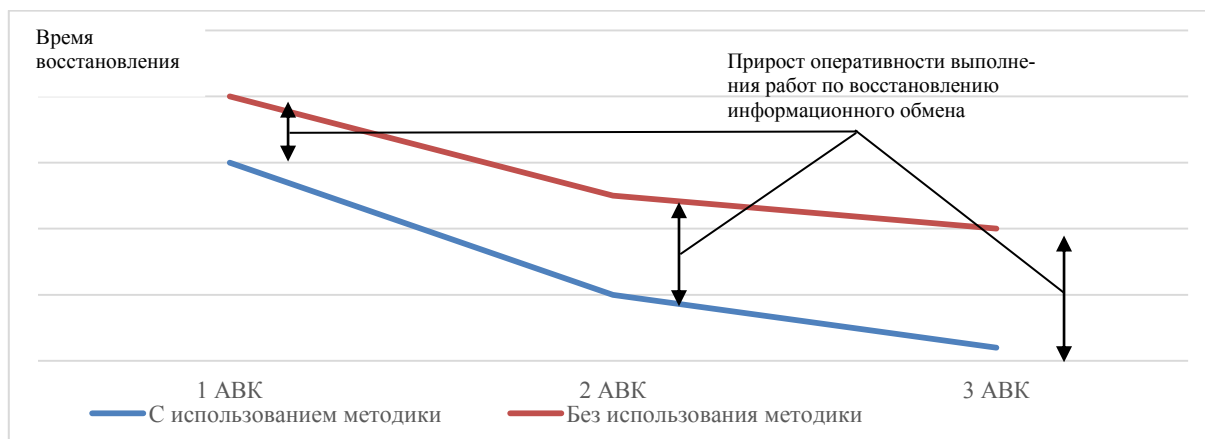


Рис. 3. График зависимости времени восстановления информационного обмена в НКУ ОГ КА от количества задействованных сил и средств с использованием методики и без использования ее

Данные зависимости показывают, как использование методики позволяет повысить оперативность восстановления информационного обмена в НКУ ОГ КА в зависимости от задействованного состава сил и средств (количества АВК) и резервных линий связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленная методика позволяет органам управления за счет грамотного распределения сил и средств связи, использования резервных линий связи, учета работоспособности всех остальных элементов НКУ ОГ КА, срочности передачи информации по сети связи для своевременного выполнения ТЦУ выбрать рациональный вариант восстановления информационного обмена в НКУ ОГ КА, что, в свою очередь, значительно повышает качество информационного обеспечения функционирования ОТС ВН в различных условиях обстановки, такой как НКУ ОГ КА. Данная методика является универсальной, и она применима ко всем организационно-техническим системам военного назначения.

Список используемых источников

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008.
2. Бестугин А.Р., Богданова А.Ф., Стогов Г.В. Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей. – СПб.: Политехника, 2003. – 174 с.
3. Костин С.В., Парамохина Т.М. Повышение надежности процессов информационного обмена в АСУП // Известия Орел-ГТУ. Сер. Информационные системы и технологии. – 2005. – № 2. – С. 93–96.

4. Крутолапов А.С., Поляков А.С. Методика построения правил выбора организационно-технических мероприятий при управлении работоспособностью сети передачи данных // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России: электрон. научно-аналитич. журн. – 2011. – № 3. – URL: vestnik.igps.ru (дата обращения: 20.03.2020).
5. Озаренко О.В. Способы повышения надежности процессов информационного обмена в среде АСУ радиоэлектронной промышленности за счет обнаружения и коррекции логических ошибок // Известия Орел ГТУ. II Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и производстве». – 2006. – № 1(4). – С. 154–157.
6. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения, ГОСТ Р от 29 июня 2010 года №53802-2010. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2> (дата обращения: 19.03.2020).
7. Молотов Е.П. Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 256 с.
8. 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.
9. Основы теории систем и управления: учебник / В.Н. Калинин [и др.]; под ред. К.Г. Колесникова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 495 с.
10. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник / Е.Н. Алешин [и др.]; под общ. ред. А.Н. Павлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 370 с.
11. Военная системотехника и системный анализ: учебник / А.Н. Павлов [и др.]; под ред. А.Н. Павлова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 251 с.
12. Бройдо В.Л., Ильина О.П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебник для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 560 с.

А.В. Демьянов,
кандидат техн. наук;
А.В. Панкратов,
доктор техн. наук

РЕИНЖИНИРИНГ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье представлены результаты практического применения средств инструментального контроля интегральных микросхем в процессе реинжиниринга цифровых электронных компонентов в современных системах управления сложных технических объектов, позволяющие повысить информативность методов диагностики.

Ключевые слова: инструментальный контроль, сложный технический объект, техническая диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие средств технической диагностики тесно связано с постоянно усложняющимися высокотехнологичными компонентами сложных технических систем. В соответствии с наблюдаемым повышением уровня сложности аппаратно-программного построения функциональной электронной аппаратуры современных систем управления сложных технических объектов совершенствуются методы и средства проведения диагностирования цифровых электронных компонентов в этих системах. Данная задача важна не только с точки зрения выяснения причин, приведших к возникновению неисправности или сбоя, но и для повышения эффективности методов контроля и диагностики технического состояния систем управления сложных технических объектов и максимально точной локализации неисправностей с возможностью их последующего устранения или изолирования, что является важнейшей составляющей обеспечения безотказного функционирования таких систем.

Для обеспечения безотказного функционирования необходимо выявить структуру, построение и верификацию модели цифровой интегральной микросхемы системы управления сложного технического объекта на основе анализа физических откликов инструментального контроля. Основопологающей цифровой системой сбора и обработки информации системы управления является программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), которая в течение последних двух десятилетий стала ключевым компонентом для многих современных цифровых систем. Использование физических откликов инструментального контроля расширяет возможности диагностики ПЛИС [1].

В статье рассматривается подход к использованию имеющихся средств инструментального контроля ПЛИС для диагностирования состояния цифровых систем управления сложных технических объектов. На примере ПЛИС рассмотрены особенности анализа физических откликов, полученных путем тестового контроля ПЛИС.

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПЛИС

В основе информативности физических откликов инструментального контроля лежит тот факт, что для современных цифровых компонентов, входящих в состав систем управления, мгновенная потребляемая мощность определяется текущей активностью переключений логических вентилей. Это свойство используется для получения первичных данных инстру-

ментального контроля при инженерном анализе систем управления сложных технических объектов. Потребляемая мощность измеряется во время функционирования устройства, и таким образом формируется побочный канал.

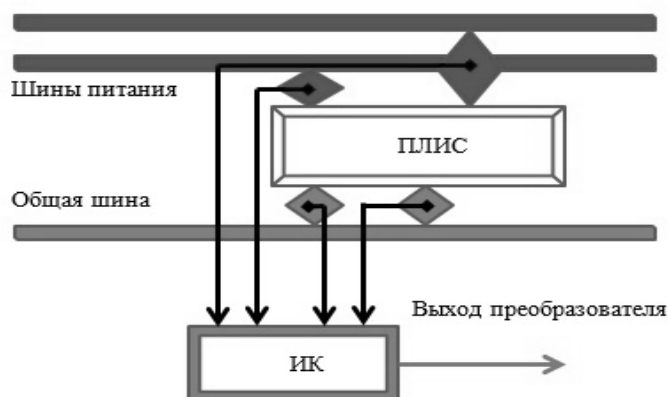


Рис. 1. Схема подключения датчиков инструментального контроля

На рис. 1 показана схема подключения датчиков потребляемой мощности цифрового устройства при сборе данных физических откликов инструментального контроля. В примере рассмотрен прогрессивный КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник), технологический процесс с топологическими нормами 0.13 мкм и 9-слойной металлизацией медью. В данной статье для анализа физических откликов инструментального контроля по сторонним (побочным) каналам контакты питания ПЛИС представляют особый интерес. Контакты разделены на три основные группы:

1. V CCINT для питания внутреннего логического ядра 1,5 вольт (В).
2. VCCAUX для питания вспомогательных цепей 3,3 В.
3. V CCO для питания входных и выходных буферов 3,3 В.

Для получения физических откликов инструментального контроля при инженерном анализе систем управления сложных технических объектов использовался дифференциальный анализ питания цифрового модуля управления на базе ПЛИС, который основан на построении модели мощности вычислительной схемы с использованием входных значений для схемы и набора возможных значений неизвестного ключа в качестве параметра. Чтобы проверить правильную ключевую гипотезу, сравниваются предсказанные значения с фактическими откликами. Модель динамического потребления учитывает потребление энергии в зависимости от интенсивности переключений. Высокая интенсивность переключений может быть вызвана, например, комбинационной логикой, вычисляющей результат булевой функции, или буферными триггерами, сохраняющими битовые значения [2]. Приближение первого порядка активности переключения многих схем обеспечивается по весу Хэммингу входного значения. Это приводит к появлению модели с большей точностью аппроксимации. В результате появляется преимущество, суть которого заключается в том, что не требуется точных знаний о конкретной схемотехнической реализации, поскольку необходимо предсказать только данные, обработанные в один момент времени. Активность переключения, вызванная буферными триггерами, часто лучше моделируется расстоянием по Хэммингу между текущим и предыдущим состояниями. Триггеры изменяют свое состояние, только если предыдущее значение отличается от нового, которое нужно запомнить, т. е. когда их расстояние по Хэммингу равно единице. Следовательно, модели требуется предсказать два промежуточных значения, т. е. данные, хранящиеся в регистре до и после целевой операции.

Показатели информативности для сигнала удобно представлять множеством распознаваемых подклассов состояний регистров. При этом необходимо учитывать, что для изменения состояния отдельных триггеров необходимо затратить энергию на их переключение.

В качестве физического отклика выступает сигнал, динамический диапазон которого ограничен естественными шумами и условиями проведения тестирования ПЛИС. Минимальным требованием для средств инструментального контроля является условие $\log_2 \left(\frac{P_s}{P_{\text{ш}}} \right) \geq n$. Здесь n – это максимально возможное число переключений триггеров в тестируемом регистре, для триггеров без избыточного кодирования равно разрядности регистра [3]. В процессе реинжиниринга необходимо добиваться различимости переключений триггеров для разных физических размещений на кристалле. Такая оценка всегда будет находиться в диапазоне $n \leq \log_2 \left(\frac{P_s}{P_{\text{ш}}} \right) < 2^n$.

Информативность физических откликов зависит от степени различимости импульсов, формируемых переключениями отдельных триггеров цифрового устройства. Для повышения информативности используются корреляционные методы фильтрации при статистической обработке физических откликов многократно повторяемого теста.

СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ФИЗИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ

После сбора большого количества физических откликов во время цикла функционирования системы управления сложного технического объекта используется статический инструмент для сравнения физических откликов инструментального контроля. Типичная методология для корреляции прогнозируемого и фактического энергопотребления схемы заключается в использовании коэффициента линейной корреляции Пирсона: если модель правильно прогнозирует потребление схемы, линейная корреляция между прогнозируемыми значениями и измеренными будет близка к единице. Проведение корреляционного анализа по времени, т. е. для каждого временного значения потребления, записанного из схемы, дает дополнительную информацию о точном моменте старта контролируемого модуля цифрового устройства. Временная диаграмма сбора откликов системы показана на рис. 2. Для одиночного измерения характерно усреднение откликов энергопотребления от различных блоков исследуемого устройства. Фактическое разделение откликов осуществляется при статистической обработке полного цикла записи.

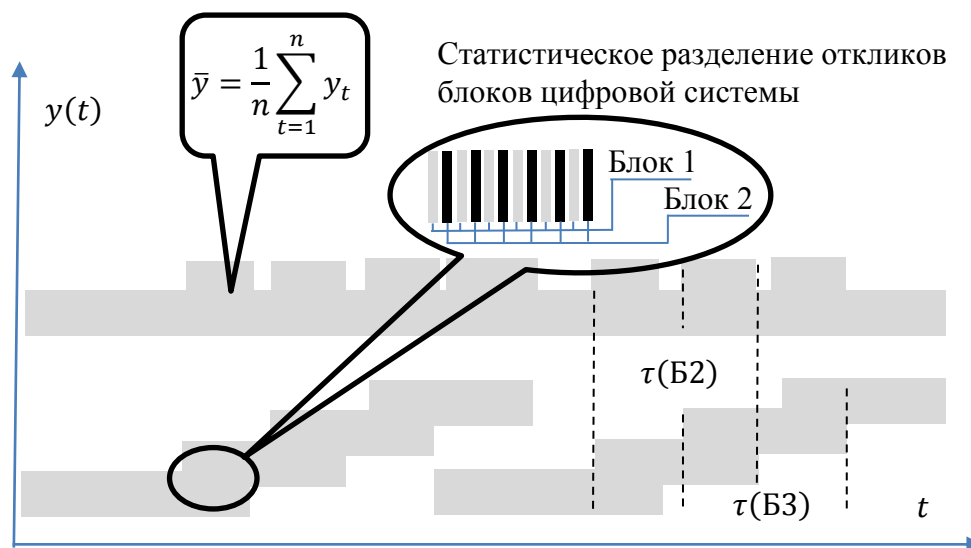


Рис. 2. Временная диаграмма сбора откликов инструментального контроля

Экстремум корреляционной функции имеет смысл искать только в интервале времени обработки конфигурирующей последовательности в модуле ПЛИС. Выбрав модель мгновен-

ной потребляемой мощности, прогнозируется промежуточное значение. Затем вычисляется набор гипотетических значений потребления энергии – по одному для каждого из возможных значений, принимаемых ключевой частью. Размер ключевой части, выдвигаемый гипотезой в течение одного шага, представляет собой решение между построениями точной модели потребления энергии, которая требует рассмотрения большего количества ключевых бит за один раз. Для простоты обработки необходимо разделить всю ключевую последовательность на небольшие части и произвести анализ по одному и тому же набору откликов.

Анализ следует начинать с линии VCCINT, которая, согласно спецификациям, предоставленных фирмой *Xilinx*, обеспечивает питание всей ПЛИС-матрицы и внутренних цепей [4]. ПЛИС также получает питание с линии VCCINT. Отклики потребления энергии можно получить путем измерения падения напряжения на резисторе между VCCINT и источником питания и тем самым исключить помехи от всех других линий питания.

С целью получения информации о процессе внутренней конфигурации, выполняются тесты со сгенерированными битовыми последовательностями. Во время испытаний потребление ПЛИС через некоторое время увеличивается, устройство нагревается. Эти выводы позволяют предположить, что информация о конфигурации, о структуре согласования записывается в память SRAM (статическая память с произвольным доступом) сразу после приема каждого блока конфигурации, даже до того, как будет дана фактическая команда загрузки, и до того, как контрольная сумма будет правильно проверена.

Первый шаг в определении периода времени, в котором происходит обработка данных, выполняется посредством анализа физических откликов инструментального контроля процесса загрузки 64 бит битового потока. Период первичной обработки данных ПЛИС выявляется при визуальном сравнении графических представлений откликов. В результате сравнения для исследуемого образца обнаружен заметный скачок потребления.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для проведения технической диагностики ПЛИС, как основополагающего элемента системы управления сложного технического объекта, необходимо протестировать схему первичной обработки данных (архитектуру целевого устройства). Схема первичной обработки данных распознается путем сравнения откликов инструментального контроля с шаблонами откликов для известных схемных решений. После нахождения продолжительности и момента начала выполнения алгоритма первичной обработки данных выявляются особенности схмотехнической реализации обработки сигнатур ПЛИС с использованием тестовой загрузочной последовательности. Соответственно, имеется возможность полностью вычислить промежуточный результат обработки данных на каждом этапе функционирования.

В последующем, для того чтобы выполнить энергетический анализ полученных откликов, их необходимо выровнять. Для этой цели используем кросскорреляционное выравнивание парных откликов x , y :

$$r_{xy} = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2)}}, \quad (1)$$

$$\vartheta(\tau) = r_{xy}(x(\tau + t), y(t)), \quad (2)$$

$$\vartheta(\tau) = \frac{\sum (x(\tau + t) - \bar{x})(y(t) - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x(\tau + t) - \bar{x})^2 \sum (y(t) - \bar{y})^2)}}, \quad (3)$$

где r_{xy} – выравнивающий коэффициент для пары откликов x, y ;

$\vartheta(\tau)$ – корреляционная функция;

\bar{x} – среднее значение отклика энергопотребления первого блока, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t$;

\bar{y} – среднее значение отклика энергопотребления второго блока, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t$.

Для временной синхронизации используется следующая формула:

$$\tau_0 = \operatorname{argmax} \left(\sum (x(\tau + t) - \bar{x})(y(t) - \bar{y}) \right), \quad (4)$$

где τ_0 – значение относительного смещения откликов.

Начало работы первичного блока обработки данных ПЛИС точно определяется квитированием второго бита 64-битного блока конфигурирующей последовательности. Полученный отклик сравнивается с одним из предыдущих. Для определения результата тестового контроля ПЛИС, для которого проводилась запись физических откликов инструментального контроля, вычисляются промежуточные значения каждого цикла обработки данных, предполагая, что известны первый блок и конфигурационная последовательность.

На основе модели ранее распознанной схемы первичного блока обработки данных проводится анализ расстояния Хэмминга двух последовательных тестовых циклов и вычисляется соответствующий коэффициент корреляции между физическими откликами инструментального контроля. Подход основан на наличии связи между тестовым контролем и физическими откликами инструментального контроля сразу после начала работы ПЛИС.

Для выявления соответствия тестовой последовательности физическими откликами, используется сравнение с откликом первого цикла для тестовой последовательности во время конфигурации. Корреляция, соответствующая каждому циклу обработки данных ПЛИС, показана на рис. 3. Расстояние Хэмминга между входом и выходом каждого цикла влияет на корреляционный пик во внутреннем буфере, а позиция пика смещается с каждым циклом.

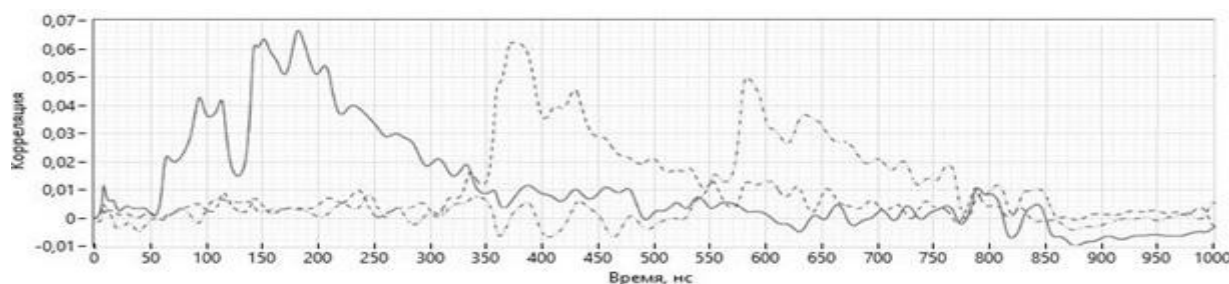


Рис. 3. Корреляция между выходными данными

Для практического применения корреляционных методов обработки физических откликов инструментального контроля необходимо применить предварительную цифровую фильтрацию. Целесообразно применить режекторную фильтрацию откликов тактового генератора ПЛИС и дополнительный фильтр низкой частоты с граничной частотой, выбираемой по корреляционной обработке тестовой последовательности. Режекторный фильтр реализован программно и подавляет компоненты сигнала на частоте работы тактового генератора ПЛИС, используя узкополосный фильтр Чебышева 2-го порядка, что позволяет избежать искажения других гармонических составляющих откликов. Результаты фильтрации изображены на рис. 4.

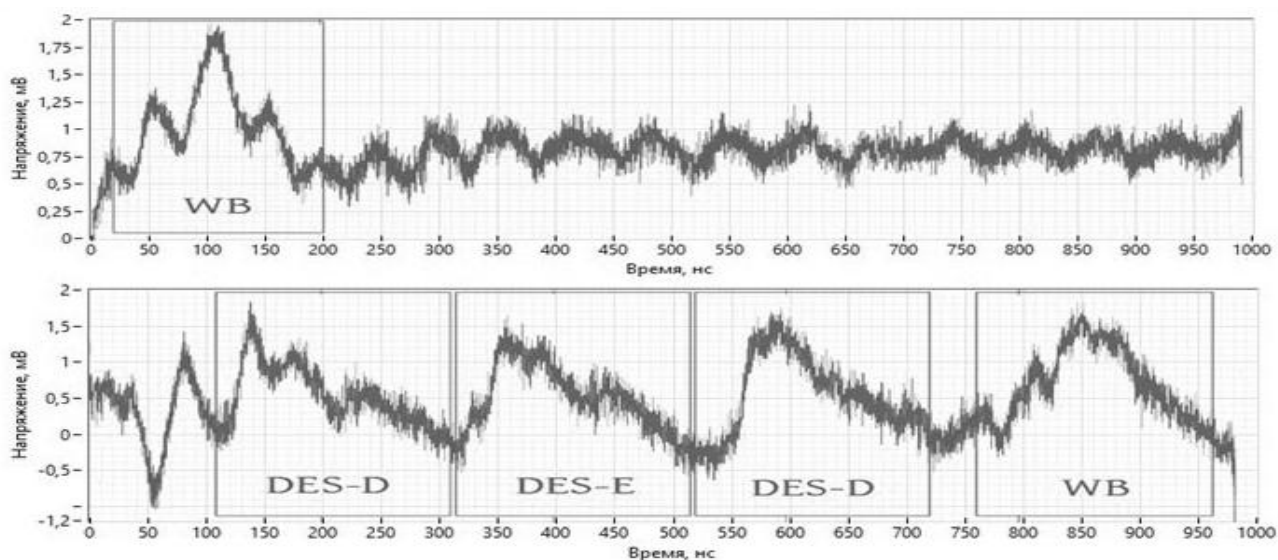


Рис. 4. Результаты фильтрации, измеренные на VCCINT во время периода времени первичной обработки

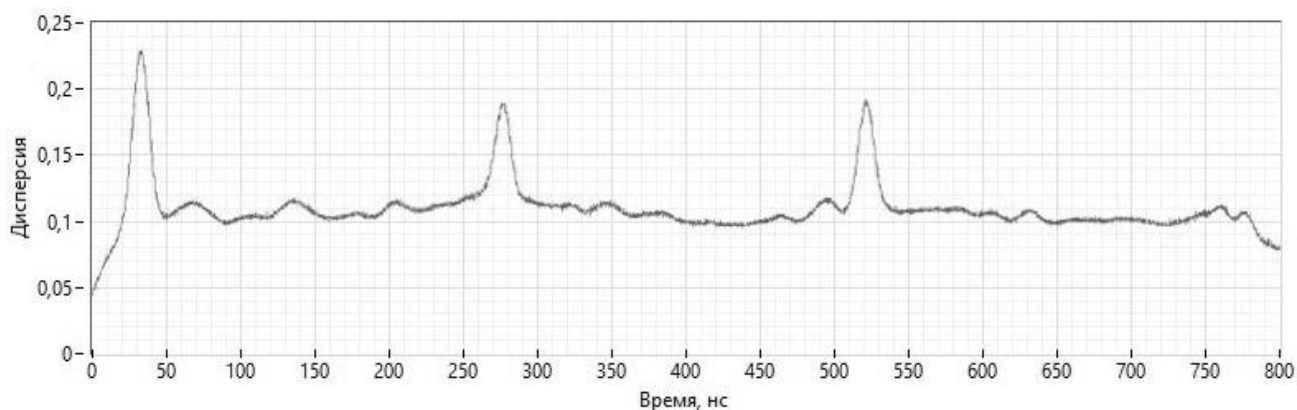


Рис. 5. Отклонение потребления энергии для отброшенной фильтром части сигнала

Как видно из анализа рис. 5, дисперсия части сигнала, содержащегося в фильтре, имеет три разных пика в начале каждого выполнения цикла обработки данных, а дисперсия отклоненного сигнала практически не изменяется, что доказывает: не утеряна информация, относящаяся к процессу обработки данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ физических откликов инструментального контроля позволяет повысить информативность методов диагностики цифровых электронных компонентов систем управления сложных технических объектов и тем самым обеспечить безотказное функционирование системы управления. Предложенный подход позволяет выявить структуру и провести реинжиниринг ПЛИС электронного блока системы управления сложным техническим объектом на основе анализа физических откликов инструментального контроля.

Список используемых источников

1. Мальцев Г.Н., Панкратов А.В., Макунин А.А. Анализ структуры исходных файлов проекта для программируемых логических интегральных схем // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 6. – С. 94–100.
2. Панкратов А.В., Макунин А.А. Проблемные вопросы выявления конфигурации программируемых логических интегральных схем при исследовании образцов специальной техники иностранного производства в процессе инженерного анализа // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 641. – С. 87–91.
3. Фороузан Бехроуз, Берлин А.Н. Криптография и безопасность сетей. – М., Саратов: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Вузовское образование, 2017.
4. Xilinx Virtex-7 FPGA Family. – URL: www.xilinx.com/support/documentation/data_sheet/virtex-7.pdf (дата обращения: 20.12.2020).

А.В. Демьянов,
кандидат техн. наук;
И.И. Долгов;
А.В. Панкратов,
доктор техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Предложено математическое описание задачи тестирования реконфигурируемой бортовой электронной аппаратуры в виде задачи анализа эволюции клеточного автомата. Даны основные формализации для автоматного теста. Показаны возможность и ограничения распознавания состояния системы по конфигурации клеточного автомата после конечного эксперимента.

Ключевые слова: диагностирование реконфигурируемых систем, клеточный автомат.

ВВЕДЕНИЕ

Основным компонентом реконфигурируемых бортовых систем является программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). Входная и выходная информация ПЛИС представляется в дискретной форме, а обработка информации в ПЛИС осуществляется с помощью дискретных преобразований. При этом и дискретное представление, и дискретная обработка информации осуществляются в двоичной форме. Поэтому можно говорить о том, что при тестировании ПЛИС выполняется диагностирование дискретных устройств с неизвестной логикой поведения (функционирования). Такая задача соответствует обратной задаче исследования дискретных устройств, которые могут находиться в различных дискретных состояниях и описываются различными моделями конечных автоматов. Задача автоматного тестирования реконфигурируемой бортовой электронной аппаратуры соответствует задаче распознавания конечного автомата (эксперимента над конечным автоматом).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНЕЧНОГО АВТОМАТА

Определим конечный автомат A как конечное множество переходов $\gamma \subset S \times X \times S \times Y$, где X, Y – множество входных и выходных символов, S – множество внутренних состояний. После поступления входного символа автомат меняет внутреннее состояние (символ внутреннего состояния) и формирует выходной символ. При этом переходные процессы не рассматриваются, а время, необходимое на реакцию автомата на входной символ, считается меньшим тактового интервала:

$$A = \langle X, Y, S, \gamma \rangle. \quad (1)$$

Конечный автомат вида (1) позволяет рассматривать множество переходов $\gamma \subset S \times X \times S \times Y$ как двойное отображение $\gamma_S: S \times X \rightarrow S$ и $\gamma_Y: S \times X \rightarrow Y$, причем первое отображение γ_S является функцией переходов автомата A , а γ_Y – функцией выходов.

Мощность множества γ ограничена сверху всеми комбинациями входных символов и символов внутреннего состояния автомата $|\gamma| \leq |S \times X|$, причем в случае строгого неравенства автомат будет недоопределенным. На практике для диагностирования состояния реконфигурируемых цифровых модулей задача сводится к нахождению некоторого внутреннего

состояния конечного автомата $s_d \in S$ и некоторого набора реакций клеточного автомата в этом состоянии на входные воздействия $\gamma_d \subset \gamma$, $\gamma_d \subset S \times X \times S \times Y | s_d$.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Задача диагностирования ПЛИС требует распознавания вычислительных кластеров ПЛИС, которые при рассматриваемом подходе к тестированию бортовой электронной аппаратуры представляются (моделируются) конечными автоматами. Под вычислительным кластером ПЛИС в данной статье понимается функционально обособленная совокупность цифровых узлов ПЛИС. В практических задачах автоматного тестирования вычислительных кластеров ПЛИС требуется ответить на следующие вопросы: сколько состояний имеет конечный автомат, какое значение имеет объем входного алфавита, объем выходного алфавита, число внутренних циклов.

Оценим мощность диагностируемого множества конечных автоматов. Примем, что множество состояний, множество входных символов и множество выходных символов описывающего вычислительный кластер конечного автомата соответственно составляют:

$$n = |S|; p = |X|; q = |Y|. \quad (2)$$

Величины n , p , q определяют множество возможных конфигураций конечного автомата. Мощность множества автоматов, удовлетворяющих конфигурации, в соответствии с теоремой о множестве возможных конфигураций конечного автомата, можно найти по следующей формуле:

$$|A| = (q^p)^n (n^p)^n = (qn)^{pn}. \quad (3)$$

Теперь определим минимальную длину описывающей конечный автомат конфигурирующей последовательности, которая будет учитываться при анализе конфигурационного файла [2]:

$$\min_{KP} L = \log_2 |A| = \log_2 (qn)^{pn} = pn \log_2 (qn). \quad (4)$$

Минимальная длина для данного вычислительного кластера напрямую связана с избыточностью конфигурирующего вектора для составляющих кластер узлов ПЛИС [1], а именно $|EK_{y3}| = k_{y3} \min_{KP} L$.

Таким образом, получено соотношение, определяющее взаимосвязь между длиной конфигурирующей последовательности и объемом идентификации вычислительного кластера. При этом избыточность конфигурирующей последовательности расширяет диагностируемое множество вычислительных кластеров.

Структура конечного автомата, описывающего вычислительный кластер ПЛИС, однозначно задается ее прошивкой. При тестировании необходимо получить описание реализуемого ПЛИС алгоритма по полученным в ходе эксперимента данным. Зная характеристики ПЛИС [3], можно свести задачу диагностирования вычислительного кластера к задаче эксперимента над конечным автоматом. Полученные в ходе эксперимента переходные характеристики автомата будут отражать реализуемый вычислительным кластером алгоритм на уровне описания аппаратуры.

Каждое состояние ПЛИС проявляется в признаках. По диагностическим признакам все множество состояний разбивается на NP классов: $E = \bigcup_{j=1}^{NP} EP_j$. Для разбиения $E = \bigcup_{i=1}^{NK} EK_i$ на классы конфигураций возможны случаи, когда эти классы пересекаются. Во втором слу-

чае каждому классу однозначно сопоставляется конфигурирующий вектор, который определяет возможности устройства, а вместе с ними и множество диагностических признаков. Для некоторых классов EK_i можно вполне определенно указать диагностические признаки и принадлежность к EP_j . Необходимым условием для однозначного определения состояния по конфигурирующему вектору является замкнутость подмножества γ_d для всех входных воздействий $x_i \in X$. Для диагностирования реконфигурируемых устройств удобным оказывается разбиение всех состояний на классы, следуя алгоритму синтеза устройства.

Основными этапами синтеза конечного автомата с памятью являются: формализация конечного автомата, выбор типа автомата, составление графа состояний автомата, кодирование состояний автомата, выбор типа элементов памяти автомата. На рис. 1 показана схема алгоритма, реализующего перечисленные этапы синтеза конечного автомата с памятью для описания вычислительного кластера ПЛИС при автоматном тестировании. Рассмотрим содержание и особенности отдельных этапов синтеза конечного автомата.

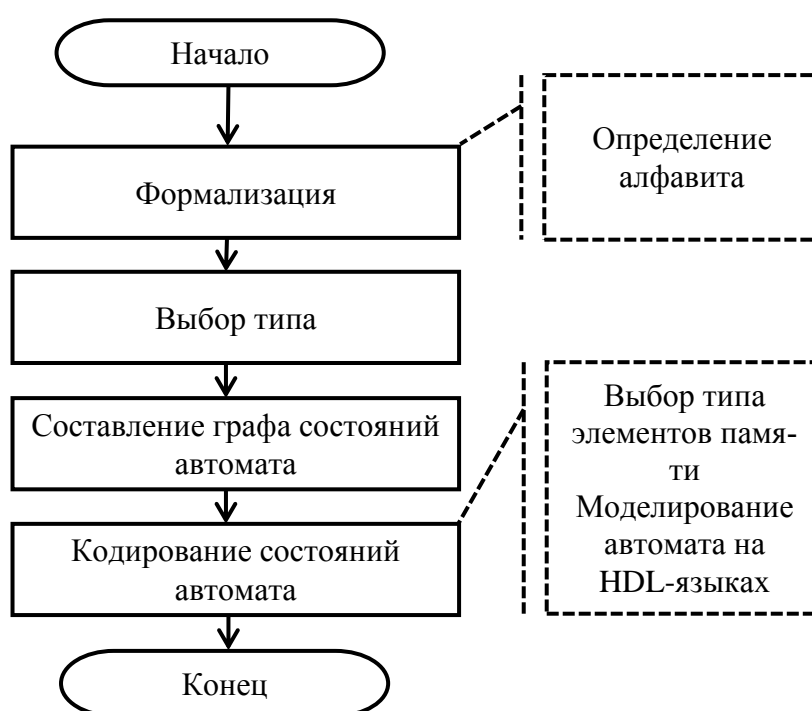


Рис. 1. Этапы синтеза конечного автомата

Классификация состояний при диагностике проводится путем группировки схожих реакций, отличающихся только обработкой некоторых ключевых символов. Даже когда фактическая реакция отличается, все же есть некоторая общность. Подход к стратификационной классификации состояний отражает общность за счет организации состояний в виде иерархии. Состояния на более высоком уровне иерархии отвечают за общую обработку сообщений, в то время как состояния более низкого уровня наследуют общность от состояний более высокого уровня и выполняют специфические для состояния функции.

Конечный автомат можно представить как двумерный массив, в котором одно измерение является состоянием, а другое измерение определяет сообщение, которое необходимо обработать. Конечный автомат определяет вызываемый обработчик сообщений путем индексации с текущим состоянием и полученным сообщением. Для реконфигурируемых систем характерно, что небольшое число состояний некоторого уровня допускает множество различных типов входных сообщений. Это приводит к взрывному росту подмножества γ_d обработчика сообщений. Кроме того, необходимо поддерживать огромный двумерный массив.

В результате проведения экспериментов над синтезированными конечными автоматами, по сути, ищутся ответы на вопросы о том, каковы характеристики и функции анализируемого конечного автомата (задача анализа) и может ли этот автомат реализовать определенный известный алгоритм (задача распознавания). Первая из указанных задач – задача анализа – в большей степени является исследовательской и трудно формализуема в условиях свойственной реконфигурируемым системам существенной априорной неопределенности. Вторая из указанных задач – задача распознавания – является лучше формализуемой и может быть непосредственно связана с практическими задачами автоматного тестирования как целенаправленного процесса. Так, при постановке задачи на проведение эксперимента с помощью математической модели клеточного автомата необходимо классифицировать имеющиеся в анализируемой ПЛИС вычислительные кластеры. Для этого задается множество классов вычислительных кластеров, и затем определяется принадлежность вычислительных кластеров ПЛИС к известным классам. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться задача распознавания конечных автоматов, которая хорошо поддерживается моделями и методами теории диагностирования технических систем.

ЗАДАЧА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА КАК ЭКСПЕРИМЕНТ НАД КОНЕЧНЫМ АВТОМАТОМ

Эксперименты над конечными автоматами относятся к обратным задачам исследования конечных автоматов. Их можно классифицировать по числу требуемых для их проведения экземпляров исследуемого автомата. Для реконфигурируемых систем большинство состояний при фиксированной конфигурации являются недостижимыми. Автомат, включающий только достижимые состояния при данной конфигурации, будем называть *минимальной формой* для вычислительного кластера.

Практический интерес при автоматном тестировании реконфигурируемой бортовой электронной аппаратуры и выявлении вычислительных кластеров ПЛИС, описываемых различными типами конечных автоматов, представляют кратные эксперименты, позволяющие подавать различные входные воздействия на различные экземпляры автомата, находящиеся в одном и том же состоянии. Если для эксперимента используется фиксированная последовательность входных символов, то такой эксперимент будем называть *безусловным экспериментом*.

Условный эксперимент проводится путем формирования входной последовательности в зависимости от выходной последовательности. Условный эксперимент возможно проводить с одним «расширенным» конечным автоматом, для которого в множество X добавлен символ возврата в исходное состояние $x_{\text{и}}$, позволяющий из любой вершины графа перейти к начальным условиям. В этом случае подмножество расширяется $\gamma_s^* = \gamma_s \cup \gamma_{\text{и}}$, а число переходов к начальным условиям соответствует числу достижимых состояний $|\gamma_{\text{и}}| = |S|$.

Длиной эксперимента E с автоматом A будем называть общее число входных символов, прикладываемых к автомату A в процессе проведения эксперимента. Кратностью эксперимента с автоматом A будем называть число копий автомата A , необходимых для проведения данного эксперимента. Порядком эксперимента с автоматом A будем называть число частей данного эксперимента, разделенных операциями принятия решений.

При диагностике реконфигурируемых устройств на основе ПЛИС, конфигурационное поле рассматривается как множество вычислительных кластеров, и автомат A вида (1) может описывать отдельный вычислительный кластер. Успешное решение задачи диагностики заключается в нахождении минимальной формы конечного автомата для диагностируемого устройства. При этом в ходе эксперимента учитываются только выходные последовательности символов. Будем называть автомат *распознаваемым*, если для него может быть построена минимальная форма по выходной последовательности для любого исходного состояния.

Задача распознавания автомата в ее общей форме для вычислительных кластеров ПЛИС является неразрешимой потому, что нет достаточной информации о входном алфавите и максимальном числе состояний минимальной формы произвольного кластера.

В процессе распознавания автоматов анализируются так называемые *вход-выходные последовательности* в алфавите $U=X \times Y$, образованном возможными сочетаниями входных и выходных символов. Функционирование конечного автомата, полное описание которого отсутствует, характеризуется множеством реализуемых в нем вход-выходных последовательностей.

Отметим, что для полностью известного детерминированного конечного автомата зависимость его выходных символов от входных однозначно определена функцией выходов, и в эксперименте над автоматом нет необходимости. Если же конечный автомат неизвестен, то по результатам эксперимента над автоматом может быть определена его функция выходов $\gamma_Y: S \times X \rightarrow Y$, а в некоторых случаях – и функция переходов $\gamma_S: S \times X \rightarrow S$. Кратностью (порядком) P эксперимента называется количество составляющих эксперимент вход-выходных последовательностей. Длиной эксперимента L называется минимальное число символов из алфавита $U=X \times Y$ во вход-выходных последовательностях, составляющих эксперимент.

Различают несколько типов экспериментов над конечными автоматами, отличающихся условиями и целью проведения. Эксперименты над конечными автоматами могут решать три типа задач: диагностические задачи, установочные задачи и задачи распознавания.

Первые два типа задач можно рассматривать как частные случаи общей задачи распознавания. Так, при решении диагностической задачи известно, что конечный автомат, таблица переходов которого известна, находится в одном из состояний, и требуется найти это состояние. При решении установочной задачи известно, что конечный автомат, таблица переходов которого известна, находится в одном из состояний, и требуется установить автомат в некоторое другое заданное состояние.

Общей задачей для описанных выше будет задача распознавания конечного автомата. При ее решении известна выходная последовательность символов (реакция) анализируемого конечного автомата для всего входного алфавита. Возможны различные способы постановки задачи распознавания. Основными считаются *задачи выбора* и *задачи расшифровки*.

В задачах выбора распознавание происходит из заданного класса при обязательном условии, что конечный автомат A неинициальный и принадлежит заданному конечному классу M неинициальных автоматов. Требуется выбрать этот автомат среди автоматов класса M , т. е. выделить тот, который совпадает с анализируемым автоматом A .

При решении задачи расшифровки необходимо определить инициальный автомат в виде его таблицы переходов с отмеченным начальным состоянием, в котором подмножество переходов γ_i то же, что и в анализируемом автомате A . Для остаточной расшифровки автомата с известными входным и выходным алфавитами конечного автомата с помощью подходящего простого эксперимента необходимо определить инициальный автомат, в котором реализован тот же оператор, что и в анализируемом автомате с начальным состоянием, в которое он перешел после эксперимента. Если A является сильно связным приведенным автоматом, то остаточная расшифровка для автомата A означает определение его таблицы переходов (с точностью до нумерации состояний) с помощью простого эксперимента. Общая задача остаточной (инициальной) расшифровки автоматов отличается от предыдущих задач тем, что заранее неизвестна верхняя оценка k числа состояний автомата A , а заданы только входной и выходной алфавиты.

Если для любой пары конечных автоматов в некотором классе K нельзя выделить совпадающие состояния, такой класс является исключительным. Для любого автомата из K длина эксперимента l будет удовлетворять следующему неравенству:

$$l \leq (2|S| - 1)(|K||S| - 1), \quad (5)$$

где $|K|$ – мощность исключительного класса;

$|S|$ – мощность множества состояний для автоматов класса K .

Для автоматов, принадлежащих классу $\mathfrak{M}A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$, с мощностью $|\mathfrak{M}A|$ задача распознавания может быть решена при условии, что все автоматы попарно различимы. Обозначим число состояний автомата A_i через m_i и перенумеруем автоматы в исключительном классе $\mathfrak{M}A$ так, что

$$\mathfrak{M}A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}, m_{i+1} \leq m_i. \quad (6)$$

Затем найдем:

– мощность множества состояний

$$\Delta(A_1, A_2, \dots, A_N) = \sum_{i=1}^N m_i; \quad (7)$$

– верхнюю границу длины эксперимента

$$L \leq (m_1 + m_2 - 1) \left(\left(\sum_{i=1}^N m_i \right) - 1 \right). \quad (8)$$

При условии выполнения неравенства $m_i \leq M_p$ длина эксперимента будет ограничена сверху согласно следующему неравенству:

$$l \leq (2M_p - 1)(|\mathfrak{M}A| M_p - 1), \quad (9)$$

где M_p – это максимальное количество состояний автомата в классе $\mathfrak{M}A$.

На практике для уменьшения длины эксперимента он разбивается на несколько условных последовательных экспериментов. Для этого диагностируемый автомат $A \in \mathfrak{M}A$ разбиваем на инициальные автоматы с различными начальными состояниями из S . Начиная с A_1 , проводим эксперимент для выделения некоторого множества конечных состояний, далее для каждого A_k с начальными состояниями, соответствующими предыдущему эксперименту, выделяется некоторое множество конечных состояний. При достижении конечного состояния для диагностируемого автомата A выделяем настоящее состояние A и принимаем $A = A_i$. Далее проводим над A регулярный установочный эксперимент, построенный для $\Delta(A_1, A_2, \dots, A_N)$ с множеством допустимых начальных состояний $\{\sigma^{(1)}, \sigma^{(2)}, \dots, \sigma^{(N)}\}$. Если конечное состояние автомата $\Delta(A_1, A_2, \dots, A_N)$ принадлежит подавтомату A_k , то $A = A_k$. Максимальная длина эксперимента в этом случае будет удовлетворять неравенству

$$L \leq \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} m_i (m_i - 1) \right), \quad (10)$$

где m_i – число состояний в A_i .

Если $m_{i+1} \leq m_i$, то по выражению (8) порядок эксперимента подчиняется неравенству

$$P \leq \sum_{i=1}^N (m_i - 1) + N + 1 = \sum_{i=1}^N m_i - 1. \quad (11)$$

Для исключительного класса автоматов $\mathfrak{M}A$ максимальная длина эксперимента по распознаванию автомата может быть выражена следующим неравенством:

$$L \leq \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N (m_i (m_i - 1)) \right) + (m_1 + m_2 - 1)(N - 1), \quad (12)$$

$$P \leq \left(\sum_{i=1}^N m_i \right) - 1,$$

где m_i – это мощность множества состояний автомата A_i ;

P – порядок эксперимента.

Для сокращения эксперимента на практике организуется экспертная оценка промежуточных решений A_k . Все автоматы, которые выходят за граничные условия задачи исключаются из дальнейших шагов эксперимента. Такие оценки всегда требуют априорных знаний о внутренней структуре диагностируемого реконфигурируемого устройства. Если известна избыточность узлов некоторого вычислительного кластера и количество элементов памяти, то может быть определена мощность множества внутренних состояний всего кластера и затем она может быть включена в граничные условия задачи.

Определим верхнюю границу для длины эксперимента в случае разбиения на минимальные конечные автоматы, для которых мощность множества входных символов обозначим $m = |X|$, мощность множества выходных символов обозначим $p = |Y|$, мощность множества внутренних состояний обозначим $q = |S|$. Соединение двух автоматов A_i и A_{i+1} с начальными состояниями – это теоретико-автоматный эквивалент оператора альтернативного выбора. Такой эквивалент обозначается знаком $+$ в большинстве исследований, связанных с экспериментами над конечными автоматами. При этом каждый автомат в цепочке A_k – это бисимуляция для соответствующего уровня конфигурации диагностируемого устройства. Инициальная бисимуляция является конгруэнцией относительно объединения автоматов с выделенными начальными состояниями. Мощность класса $K_{m,p,q}$, должна удовлетворять следующему неравенству:

$$|K_{m,p,q}| \leq \frac{1}{m!} \prod_{r=0}^{m-1} ((qm)^p - r). \quad (13)$$

Любой автомат, принадлежащий классу $K_{m,p,q}$, расшифровывается простым безусловным экспериментом длиной L , ограниченной следующим неравенством:

$$\begin{aligned} L &\leq (2m - 1)(|K_{m,p,q}|m - 1) \leq \frac{2m - 1}{(m - 1)!} \prod_{r=0}^{m-1} ((qm)^p - r) = \\ &= \frac{(2m - 1)(qm)^{pm}}{(m - 1)!} \prod_{r=0}^{m-1} \left(1 - \frac{r}{(qm)^p}\right) \leq \frac{(2m - 1)(qm)^{pm}}{(m - 1)!} e^{\left(-\frac{m(m-1)}{2(qm)^p}\right)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Использование для диагностирования реконфигурируемых управляющих систем автоматных тестов, построенных на основе связанных копий автоматов в однородной среде, имеет следующее преимущество: установление текущего состояния системы не требует сведений относительно состояния автомата в прошлом. Эксперимент можно проводить со всеми копиями автомата одновременно, при этом их связи образуют схемы для условного эксперимента, а последовательные изменения состояний соответствуют эволюции клеточного автомата. Для полной расшифровки достаточно знать состояние системы на каждом шаге эволюции. Расширение множества необходимых копий автомата может быть толчком для построения однородных структур связанных конечных автоматов. Для каждого автомата его состояние является результатом предыдущих смен состояний и может быть рассмотрено как точечная эволюция в условном эксперименте.

Для конечных автоматов не существует явной зависимости выходной последовательности для фиксированного момента времени в виде функции от входного воздействия в настоящий момент времени и выходных реакций в предшествующие моменты времени, что естественно, поскольку исследование конечных автоматов в ходе экспериментов над ними является обратной задачей.

На рис. 2 показаны границы эксперимента для клеточного автомата, составленного из копий конечных автоматов класса $K_{m,p,q}$. Оценка длины эксперимента $M_r = |K_{m,p,q}|L_r$ проводилась по эволюции клеточного автомата в соответствии с неравенством (14).

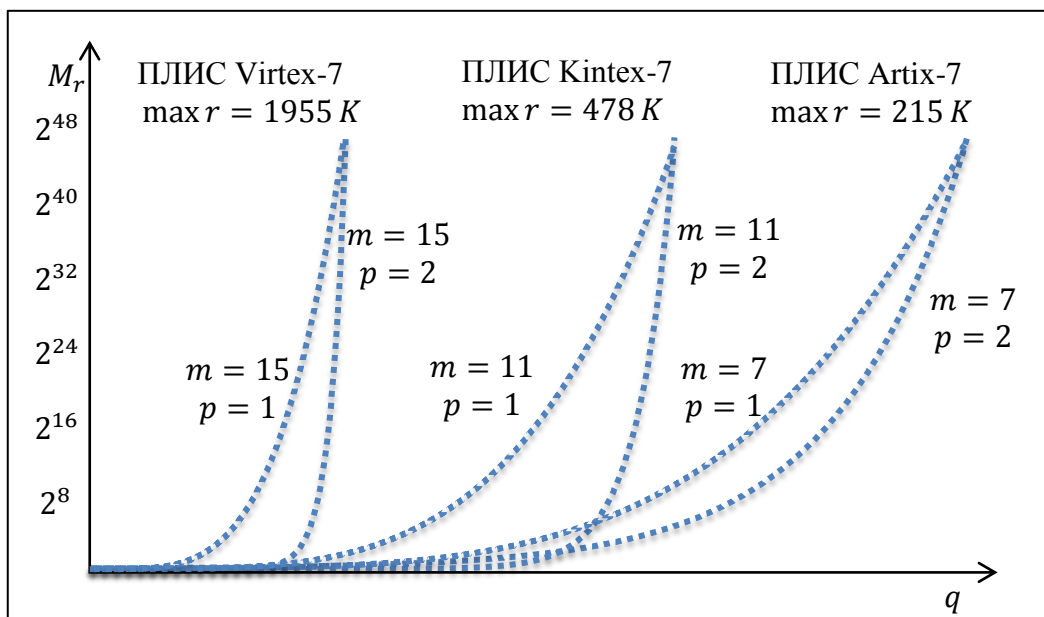


Рис. 2. Оценка длины автоматного теста для экспериментов различной кратности

Таким образом, диагностика реконфигурируемых систем в общем виде не всегда может быть выполнена простым экспериментом над конечным автоматом. В этих условиях наиболее подходящим инструментом для диагностирования реконфигурируемых систем является их описание с помощью математических моделей клеточных автоматов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматное тестирование предполагает использование математической модели клеточного автомата для решения задачи распознавания состояния системы дискретных элементов бортовой электронной аппаратуры. Реконфигурируемые элементы бортовых систем в типовой схеме применения меняют внутреннюю структуру, которую можно представить последовательностью дискретных преобразований.

Успешное диагностирование дискретных устройств с нефиксированной логикой поведения возможно за счет применения автоматного теста соответствующей размерности, что описывается различными моделями конечных клеточных автоматов. Использование клеточных автоматов для моделирования поведения реконфигурируемой системы позволяет сузить область диагностирования к конечному множеству наблюдаемых эволюций теста.

Список используемых источников

1. Панкратов А.В., Якимов В.Л., Маковский В.Н. Анализ избыточности битовой последовательности для проектов ПЛИС // Труды МАИ. – 2015. – № 82.
2. Мальцев Г.Н, Панкратов А.В., Макунин А.А. Анализ структуры исходных файлов проекта // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 6(73). – С. 94–101.
3. Ермолаев В.И., Езерский В.В., Полетаев Б.И. Бортовое оборудование космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 507 с.

М.В. Татарка,
кандидат техн. наук;
Ф.Л. Шуваев,
кандидат техн. наук

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ТОПОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ТРИАДНОГО ВЕКТОРА

В статье рассматривается метод распознавания топологий информационно-телекоммуникационных сетей на основе расчета триадного вектора, т. е. уникального набора комбинаций трехвершинных подграфов в анализируемой сети. Распознавание осуществляется на базе иерархической кластеризации, ее результаты оцениваются на основе оригинального подхода, заключающегося в использовании математического аппарата бутстреп выборок.

Данный метод может применяться во многих областях современной науки и техники, в том числе в военной сфере при анализе данных и в задачах информационной безопасности при классификации и кластеризации однотипных топологических структур, что, в свою очередь, позволяет типизировать наблюдаемые сети.

Ключевые слова: триада, кластеризация, бутстреп, дендограмма, модель графа.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ комплексных сетей, которыми являются сети цитирования, социальные или информационно-телекоммуникационные сети (ИТКС), включает в себя изучение топологических свойств, позволяющих оценивать взаимосвязи между узлами сети и выявлять различные характеристики, такие как плотность и диаметр сети, связанные подгруппы узлов и т. п. Для этого сеть представляется в виде графа – совокупности вершин и ребер между ними.

Происходящие в графах изменения, полученные в результате визуализации и структурного анализа, чаще всего, не видны человеку, но видны машинному зрению, и интерпретация полученных с его помощью результатов дает понимание об основных правилах и закономерностях в наблюдаемой системе. Особенно необходимо выявление таких закономерностей при анализе динамических графов, т. е. графов, изменяющихся в течение времени. При этом граф может изменяться двумя основными способами.

Во-первых, со временем сеть может увеличиться или уменьшиться, что приводит к изменениям в структуре сети. Во-вторых, связи между участниками сети могут изменяться. Наибольший интерес в прикладном смысле представляет второй способ. Он заключается в том, что рассматривается устоявшаяся система (устоявшаяся в смысле постоянного числа вершин – объектов системы), которая в дискретные моменты времени изменяет количество вершин и связей между ними, т. е. граф каждый раз строится заново.

При накоплении значительной выборки таких графов, построенных в дискретные моменты времени, становится актуальной задача – упорядочить в однородные группы в соответствии с их топологической структурой. Данную задачу возможно решить, используя алгоритмы кластерного анализа, но для этого необходимо выбрать метрику расстояния между графами, позволяющую измерить степень их топологического сходства.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИАДНОГО ВЕКТОРА

Минимальной единицей любой комплексной сети является диада: два члена этой группы, между которыми может быть связь изучаемого типа (например, коммуникативная связь), а может и не быть такой связи. На основе всех выявленных диад обычно изучается такая характеристика, как взаимность связей в группе. Однако анализ публикаций последнего времени показал, что большинство специалистов в области исследования комплексных сетей считают, что наиболее интересной минимальной единицей в социальной группе является триада [1, 2]. Триада – это группа, состоящая из трех членов (акторов). Связи между тремя акторами в триаде возможно определить 16 возможными комбинациями. Список таких комбинаций называется триадным вектором

$$\vec{T} = (t_{003}, t_{012}, t_{102}, t_{021D}, t_{021U}, t_{021C}, t_{111D}, t_{111U}, t_{030T}, t_{030C}, t_{201}, t_{120D}, t_{120U}, t_{120C}, t_{210}, t_{300}).$$

Рассчитав такой вектор для графов, что немаловажно, даже различного размера, становится возможным определить расстояние между графами, т. е. их меру сходства. Таким образом, триадный вектор может быть использован как метрика расстояния между графами. На рис. 1 представлены 16 возможных комбинаций триад и их условные обозначения.

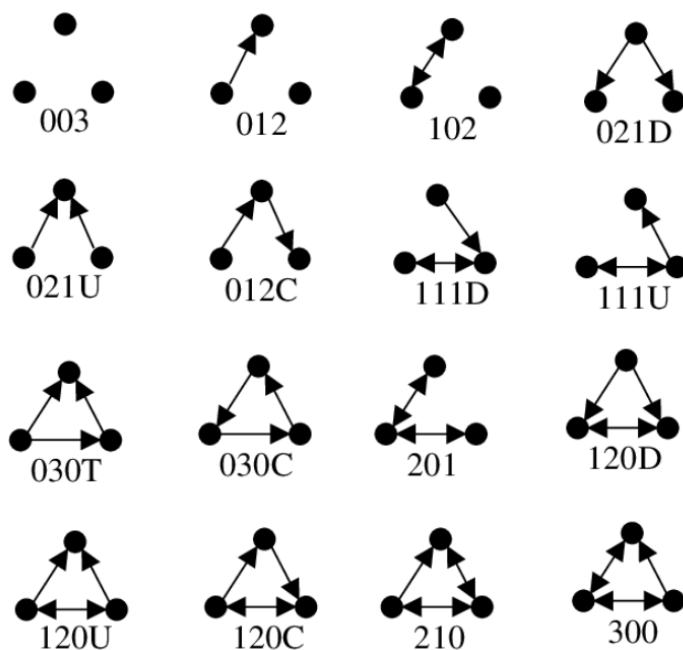


Рис. 1. Перечень 16 возможных комбинаций триад

В некоторых случаях для различения комбинаций необходимо употребление буквы: «D» – вниз (асимметричная связь или связи направлены вниз); «U» – вверх (асимметричная связь или связи направлены вверх); «C» – триада циклична; «T» – триада транзитивна [3, 4].

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МЕТОДА

На рис. 2 представлена структурная схема метода распознавания топологий ИТКС на основе расчета триадного вектора. Он состоит из трех основных этапов, каждый из которых разделяется на подэтапы. Рассмотрим их.

1. **Этап подготовки данных.** В настоящее время при решении задач машинного обучения, анализа данных около 30–40 % времени уходит на подготовку данных. Некорректно подготовленные данные могут существенно исказить результаты эксперимента.

Предобработка данных. При предобработке с поступающей для анализа сетью (графом) осуществляется ряд преобразований:

- извлекается гигантская компонента графа, т. е. извлекается максимальный подграф, что необходимо для устранения висячих вершин и преобразования графа к связному;
- графы группируются на группы по признаку количества вершин;
- удаляются петли графа, т. е. ребра, инцидентные одной и той же вершине;
- полученный граф преобразуется к неориентированному, т. е. такому, у которого ни одному ребру не присвоено направление.

Расчет триадного вектора. Осуществляется расчет триадного вектора для графов. Полученные вектора $Y_{(16)}$ помещаются в массив данных. При этом массив данных для каждой группы графов состоит из N рассчитанных векторов:

$$Y_{[N,16]} = \|y_{ij}\|_N^{16}.$$

Стандартизация значений. Результаты вычислений триадных векторов имеют различную размерность, поэтому их необходимо привести к нормированной или стандартной форме. Стандартизация осуществляется традиционным способом, т. е. вместо переменной y_{ij} используются переменные z_{ij} , полученные на основе выражения

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{\sigma_j} \quad [i = 1(1)N; j = 1(1)n].$$

Полученные стандартизированные массивы данных переходят на следующий этап метода.

2. **Этап кластеризации.** Кластеризация – это сложная многомерная статистическая процедура, выполнение которой связано со многими условиями. Одно из условий – тенденция данных к группированию. Если ее нет, кластеризация будет работать, но точность ее будет подвергнута сомнению. Следующее условие, от которого зависит адекватность данных кластеризации, состоит в поиске оптимального количества кластеров. Как известно, существуют алгоритмы кластеризации, для которых в качестве начальных установок необходимо указывать количество кластеров, а есть такие, которые сами определяют количество кластеров. Поиск наилучшего алгоритма кластеризации – задача нетривиальная и активно обсуждаемая в научном сообществе. В данной статье выбран один из часто применяемых методов, а именно иерархическая кластеризация.

Измерение статистики Хопкинса и расчет оптимального количества кластеров. Статистика Хопкинса (H) является одним из индикаторов тенденции данных к группированию. Для ее расчета создается n псевдонаборов данных, сгенерированных случайным образом на основе распределения с тем же стандартным отклонением, что и оригинальный набор данных. Для каждого наблюдения i из n рассчитывается среднее расстояние до k ближайших соседей: w_i – между реальными объектами и q_i – между искусственными объектами и их самыми близкими реальными соседями. Тогда статистика Хопкинса принимает вид

$$H = \frac{\sum_n w_i}{\sum_n q_i + \sum_n w_i}.$$



Рис. 2. Структурная схема метода распознавания топологий информационно-телекоммуникационных сетей на основе расчета триадного вектора

Значения статистики $H \geq 0,5$ говорят о том, что данные распределены случайно и равномерно. Значения статистики $H \leq 0,25$ на 90%-ном доверительном интервале указывает на имеющуюся тенденцию к группированию данных [5].

С резким увеличением вычислительных мощностей электронно-вычислительных машин получили развитие методы расчета оптимального количества кластеров на основе бутстрепа, т. е. многократного извлечения тестовых выборок из генеральной совокупности. Одним из таких методов является *метод статистики разрыва*.

Пусть имеется оценка средней дисперсий $\hat{M}[\log(\hat{W}_k)]$, полученная на основе бутстрепа, когда k кластеров образованы случайными наборами объектов из исходной выборки размером n . Тогда статистика разрыва рассчитывается как

$$Gap_n(k) = \hat{M}[\log(\hat{W}_k)] - \log(W_k).$$

И она определяет отклонение наблюдаемой дисперсии W_k от ее ожидаемой величины при справедливости нулевой гипотезы о том, что данные образуют один кластер. При сравнительном анализе $Gap_n(k)$, $k=2, \dots, k_{\max}$ наибольшее значение статистики соответствует наиболее оптимальной группировке, дисперсия которой максимально меньше внутригрупповой дисперсии кластеров, собранных из случайных объектов исходной выборки.

Еще одним распространенным методом поиска оптимального количества кластеров является *метод средней ширины силуэта* [5]. Суть его заключается в том, чтобы рассчитать для каждого кластера следующую статистику:

$$s_i = \frac{b(i) - a(i)}{\max[b(i), a(i)]},$$

где $a(i)$ – среднее расстояние между объектами i -го кластера;

$b(i)$ – среднее расстояние от объектов i -го кластера до другого кластера, самого близкого к i -му.

Оптимальным количеством кластеров считается такое, при котором значение статистики s_i максимально.

Выбор метода расчета расстояния между кластерами. Результатом иерархической кластеризации является дендограмма, или дерево, построенное по матрице сходства, которая определяет расстояние между парами кластеров. Самыми распространенными методами расчета расстояния являются: метод одиночной связи, метод полной связи, метод средней связи, центроидный метод и метод Уорда. Оптимальным из них является *метод Уорда*, но случаются ситуации, когда наилучшим образом кластеризация осуществляется и другими методами.

Для того чтобы выбрать оптимальный метод расчета расстояния между кластерами используется попарное измерение корреляции между матрицей сходства и кофенетического расстояния результатов кластеризации, выполненной на основе разных методов расчета расстояния [5].

3. **Этап оценивания результатов кластеризации.** На основе проведенных на этапе 2 вычислений, выбранных в результате их оптимального количества кластеров и метода расчета расстояния между кластерами осуществляются построение дендограммы и визуализация результатов.

Оценивание качества кластеризации. Оно реализовано на основе метода сравнения бутстреп-выборок с исходным набором данных [6]. Метод состоит из нескольких этапов:

1. Осуществляется кластеризация исходного набора данных x на C кластеров выбранным алгоритмом кластеризации $E_n(x)$.

2. Из исходного набора данных методом бутстрепа набирается выборка данных того же размера x_n^i .

3. Осуществляется кластеризация выборки x_n^i исходным методом $E_n(x_n^i)$ на столько же кластеров C .

4. Для кластеров исходной $E_n(x)$ и полученной $E_n(x_n^i)$ кластеризации рассчитывается коэффициент сходства Жаккарда γ [6].

5. Пункты 2–4 осуществляются B раз и $i = 1, \dots, B$.

6. Рассчитывается среднее значение коэффициента Жаккарда $\bar{\gamma}$ для всех кластеров.

7. Как показано в работе [6], кластеры с $\bar{\gamma} \geq 0,85$ являются высокостабильными, и можно судить о результатах кластеризации как о положительных.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ АПРОБАЦИИ МЕТОДА

Сформируем для апробации метода три типа моделей и рассмотрим их ниже. Гипотетически сформированные модели будут обладать различными свойствами, следовательно, в результате кластеризации они должны быть разнесены на разные кластеры.

1. Модель случайного графа Эрдеша – Реньи (ЭР).

Модель случайного графа Эрдеша – Реньи предложили венгерские математики П. Эрдеш и Э. Реньи. Будем поочередно выбирать натуральное целое число n из множества $\{n \in N | n \leq 1000\}$, таким образом, $V = \{1, \dots, n\}$ – множество вершин моделируемых случайных графов. Пусть $E \in \{e_1, \dots, e_n\}$ – все возможные ребра, которые можно провести на парах элементов из V . Зададимся некоторой вероятностью $p \in [0, 1]$ и станем выбирать ребра из множества $\{e_1, \dots, e_n\}$ по схеме Бернулли с вероятностью успеха p , т. е. в случае успеха вносим очередное ребро в строящееся множество ребер E , а в случае неудачи – не вносим. В результате этих преобразований получаем случайный граф $G = \{V, E\}$ Эрдеша – Реньи [7].

2. Модель малого мира Уоттса – Строгатца (УС).

Модель малого мира предложена в 1998 году американскими учеными Д. Уоттсом и С. Строгатцем [7]. Она представляет собой одномерную регулярную решетку, состоящую из V вершин. Причем каждая из вершин соединена только с k ближайшими соседями, и наложены периодические граничные условия (вероятность соединения с любыми другими вершинами, кроме соседних, равна нулю), т. е. решетка свернута в кольцо при $p = 0$. После этого каждая связь с заданной вероятностью p перебрасывается на другую случайно выбранную вершину. При $p = 0$ получаем граф с исходной решеткой, при $p = 1$ – случайный граф Эрдеша – Реньи.

3. Модель предпочтительного присоединения Барабаши – Альберта (БА).

Анализ предыдущих математических моделей показал, что они позволяют строить графы с характеристиками, несвойственными многим реальным сетям. В реальных сетях в процессе роста новые вершины с большей вероятностью образуют ребра с вершинами, уже имеющими много связей, в силу их выдающегося положения в сети.

Для изучения реальных сетей разработан класс моделей, получивших название свободно масштабируемых моделей. Самой распространенной среди них считается модель предпочтительного присоединения Барабаши – Альберта [7]. Формируется она по следующему принципу:

- 1) в начальный момент времени $t = 0$ есть V_t несвязных вершин;
- 2) на каждом шаге ($t = 1, 2, 3, \dots$) будем присоединять вершину с E_t ребрами;
- 3) количество ребер, с которыми приходит в граф новая вершина, остается постоянным, и соединяется она с уже существующей вершиной сети с вероятностью, пропорциональной степени этой вершины.

Наиболее полно отражает природу реальных сетей модель Барабаши – Альберта с введенным параметром распределения вероятностей соединения вершин [7]. При таком варианте построения модели вводится вектор распределения вероятностей образования вершин. На рис. 2,а представлен граф, построенный по модели Барабаши – Альберта без параметра распределения вероятностей, т. е. количество вершин в ней фиксировано и равно 500, а вновь появляющиеся вершины соединяются с вершинами с большей степенью. На рис. 2,б представлен граф, построенный по модели Барабаши – Альберта, но со следующим введенным вектором распределения вероятностей образования вершин: $p_1 = 0, 25$ – вершина изолирова-

на; $p_2 = 0,5$ – вершина соединяется с одной вершиной; $p_3 = 0,25$ – вершина соединяется с двумя вершинами [7].

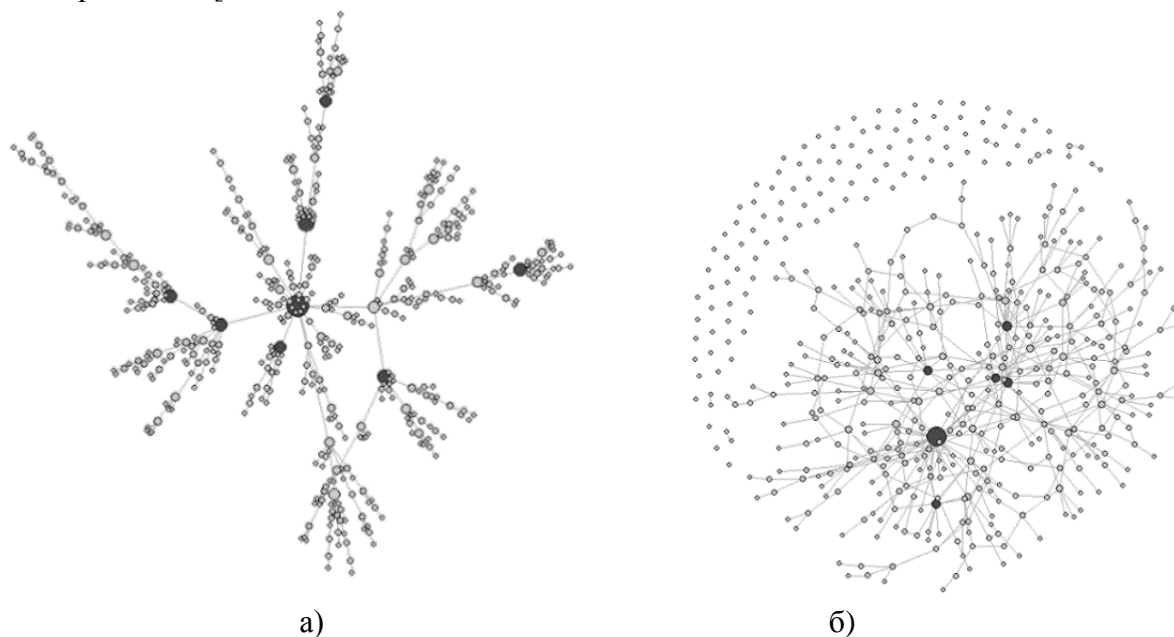


Рис. 2. Граф, построенный на базе модели Барабаши – Альберта:
а – без дополнительных параметров; б – с дополнительными параметрами

Исходя из анализа рис. 2,б, понятно, что построенный граф содержит изолированные вершины и вершины, обладающие высокой степенью (увеличены в размерах).

В табл. 1 приведены по классам типы моделей, сформированных для апробации метода.

Таблица 1

Исходные данные для имитационного моделирования

Наименование графа	Характеристики графов				
	Тип модели	Класс	Количество вершин	Количество ребер	Дополнительные параметры
G_1	УС	1	100	200	$p = 0,01; k = 2$
G_2	УС	1	100	200	$p = 0,01; k = 2$
G_3	УС	2	100	400	$p = 0,1; k = 4$
G_4	УС	2	100	400	$p = 0,1; k = 4$
G_5	БА	3	100	46	$p = \{0,5; 0,5\}$
G_6	БА	3	100	48	$p = \{0,5; 0,5\}$
G_7	БА	4	100	28	$p = \{0,8; 0,15; 0,5\}$
G_8	БА	4	100	27	$p = \{0,8; 0,15; 0,5\}$
G_9	БА	5	100	99	Без дополнительных параметров
G_10	БА	5	100	99	То же
G_11	ЭР	6	100	350	То же
G_12	ЭР	6	100	350	То же
G_13	ЭР	7	100	150	То же
G_14	ЭР	7	100	150	То же

Для имитационного моделирования сформировано семь классов графов на основе трех типов моделей, каждый из графов обладает уникальными топологическими свойствами. Таким образом, при кластерном анализе должно быть выделено семь классов графов.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

Реализуем метод на модельных данных, представленных в табл. 1. После преобработки данных рассчитаем триадный вектор для 14 графов.

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения триадного вектора для модельных данных

Тип графа	Вид триады															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
G_1	142605	0	18687	0	0	0	0	0	0	0	311	0	0	0	0	97
G_2	142612	0	18669	0	0	0	0	0	0	0	326	0	0	0	0	93
G_3	125034	0	34459	0	0	0	0	0	0	0	1880	0	0	0	0	327
G_4	125052	0	34433	0	0	0	0	0	0	0	1878	0	0	0	0	337
G_5	157275	0	4342	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0
G_6	157065	0	4566	0	0	0	0	0	0	0	69	0	0	0	0	0
G_7	159180	0	2493	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	1
G_8	159102	0	2551	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	1
G_9	152238	0	9222	0	0	0	0	0	0	0	240	0	0	0	0	0
G_10	152312	0	9074	0	0	0	0	0	0	0	314	0	0	0	0	0
G_11	129681	0	29796	0	0	0	0	0	0	0	2165	0	0	0	0	58
G_12	129726	0	29707	0	0	0	0	0	0	0	2208	0	0	0	0	59
G_13	147426	0	13850	0	0	0	0	0	0	0	422	0	0	0	0	2
G_14	147448	0	13811	0	0	0	0	0	0	0	434	0	0	0	0	7

Наличие только строго определенных типов триад в табл. 2 обусловлено ненатуральностью данных, искусственностью их модельного происхождения. В то же время видны примерные различия между соотношениями типов триад в различных моделях графов.

После стандартизации полученных значений триадного вектора рассчитаем статистику Хопкинса. Она составляет $H=0.02$, что показывает значительную тенденцию данных к кластеризации.

Произведем кластеризацию полученных данных на основании пяти различных расстояний, рассчитаем кофенетическое расстояние для результатов кластеризации и определим коэффициент корреляции Пирсона ($Corr$) между ним и расстоянием Евклида между стандартизированными значениями триадных векторов.

Результаты расчета приведены в табл. 3.

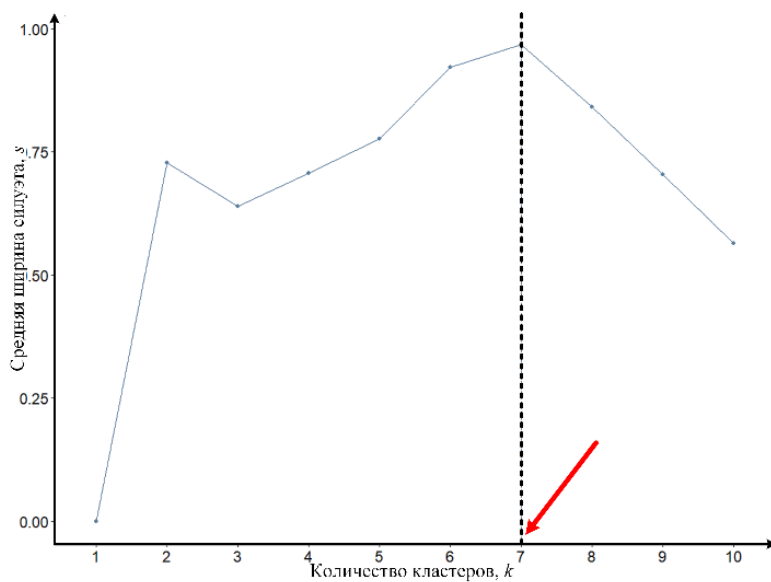
Исходя из анализа табл. 3, становится понятным, что оптимальным является расстояние Уорда, его и будем применять при построении дендограммы.

Рассчитаем оптимальное количество кластеров на основе методов средней ширины силуэта и статистики разрыва. Результаты расчета представлены на рис. 3,а и б.

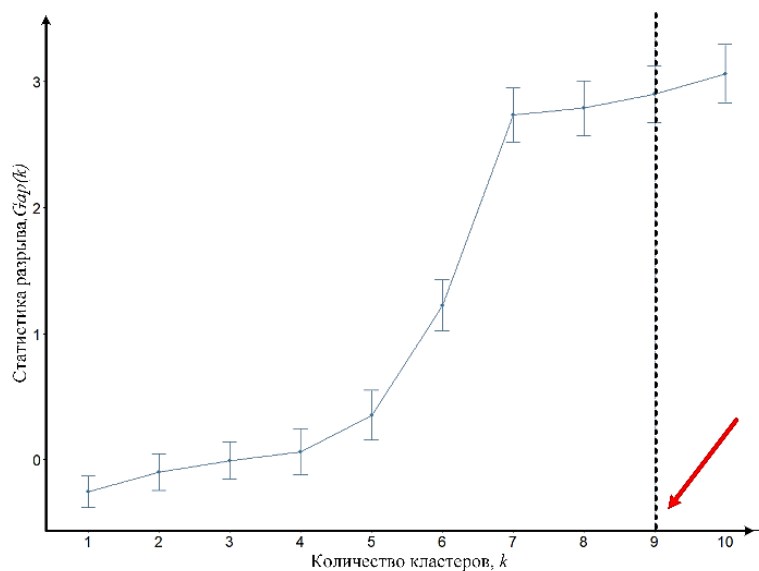
Таблица 3

Значения коэффициента корреляции для пяти методов расчета расстояния

Вид расстояния	Уорда	Одиночной связи	Полной связи	Средней связи	Центроидный
<i>Corr</i>	0,901	0,884	0,888	0,891	0,894



а)



б)

Рис. 3. Результаты определения оптимального количества кластеров: а – методом ширины силуэта; б – методом статистики разрыва

Как видно из рис. 3, методом ширины силуэта получено оптимальное значение семи кластеров, методом статистики разрыва – девять кластеров. В кластерном анализе нередко возникают такие ситуации, когда велик разброс оценок оптимального количества кластеров. Поэтому применим метод сравнения бутстреп-выборок для оценки результатов кластеризации на семи и девяти кластерах и выберем наилучший из них. Расчеты производились для $B=10000$. Результаты вычислений приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения $\bar{\gamma}$ для группирования по семь и девять кластеров

Номер C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\bar{\bar{\gamma}}$
$\bar{\gamma}_s$	0,81	0,87	0,79	0,82	0,75	0,77	0,87	–	–	0,81
$\bar{\gamma}_{Gap}$	0,76	0,81	0,75	0,67	0,77	0,76	0,72	0,8	0,65	0,74

Значения, представленные в табл. 4, говорят о высокой стабильности кластеров, среднее значение коэффициента Жаккарда $\bar{\gamma}$ для большинства из них превышает 0,85. Усредненное по строкам массива значение $\bar{\gamma}$ (обозначено $\bar{\bar{\gamma}}$) для кластеризации на семь кластеров выше на 0,07, чем у результатов кластеризации на девять, следовательно, оптимальным является количество кластеров, равное семи. Результаты кластеризации на семь кластеров по методу Уорда представлены на рис. 4 в виде дендограммы.

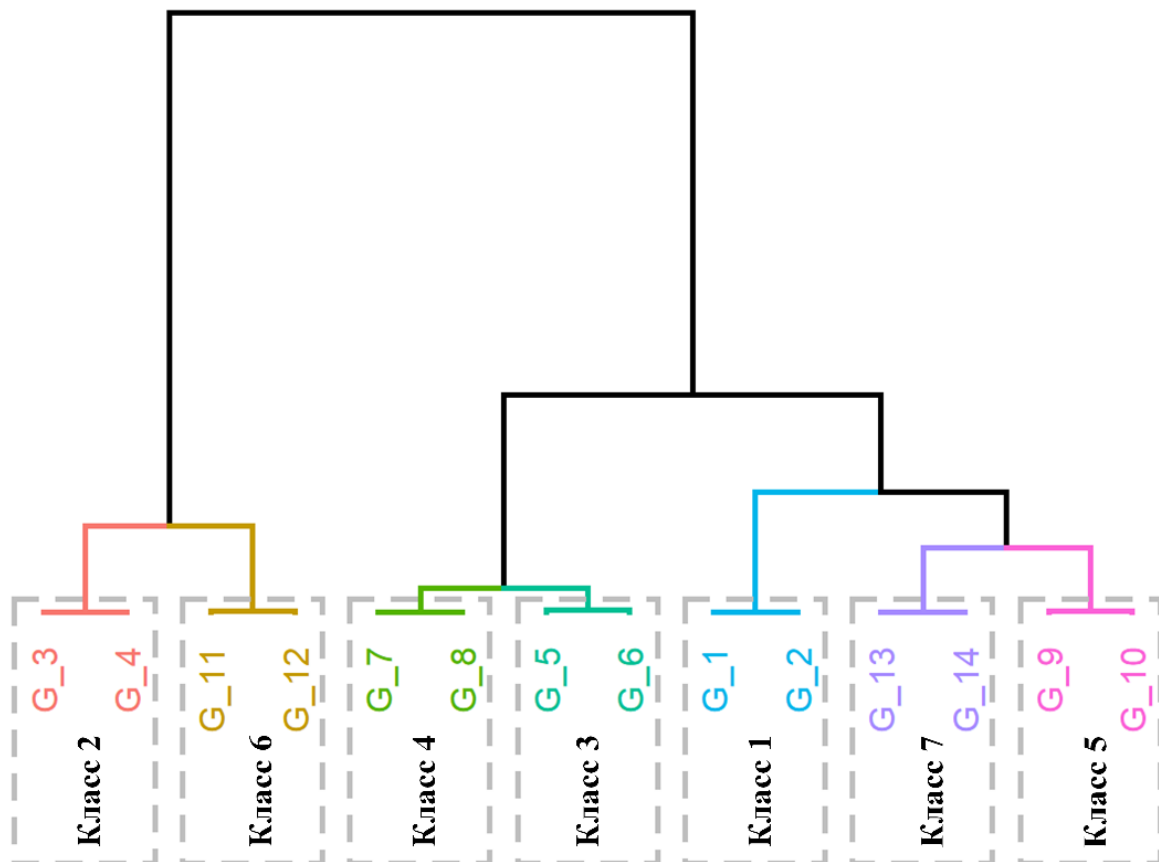


Рис. 4. Дендограмма результатов кластеризации

В дендограмме, представленной на рис. 4 видно четкое разделение на семь кластеров в соответствии с исходным делением данных на классы, что доказывает работоспособность метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен метод распознавания топологий ИТКС, позволяющий осуществлять группирование идентичных по топологии сетей в однородные классы. Метод основан на положениях теории графов и кластерного анализа. Основные этапы метода расчетно обоснованы использованием классических статистик кластерного анализа, таких как статистика Хопкинса и кофенетическое расстояние. Для проверки работоспособности метода был проведен натурный эксперимент, сформированы основные математические модели графов заданных классов. После апробации метода данные были распознаны в соответствии с исходной классификацией.

В дальнейших исследованиях будет проведен сравнительный анализ существующих информативных признаков, позволяющих выступить как метрика расстояния между сетями (графами) и алгоритмами кластеризации для выбора оптимального метода распознавания.

Список используемых источников

1. *Zvereva O.* Triad Census Usage for Communication Network Analysis // Communications in Computer and Information Science. 5 International Conference. – AIST, 2016.
2. *Brunson J.C.* Triadic analysis of affiliation networks // Network Science. – 2015. – №3(4). – P. 480–508.
3. *Faust K.* A puzzle concerning triads in social networks: Graph constraints and the triad census // Social Networks. – Vol. 32. – 2010. – P. 221–233.
4. *Faust K.* Comparing Social Networks: Size, Density, and Local Structure // Metodološki zvezki. – Vol. 2. – 2006. – P. 185–216.
5. *Kassambara A.* Practical guide to cluster analysis in R // STDHA. – 2017.
6. *Henning C.* Cluster-wise assessment of cluster stability // Computational Statistics & Data analysis. – 2007. – Vol. 52. – P. 258–271.
7. *Шуваев Ф.Л., Татарка М.В.* Анализ динамики мер центральности математических моделей случайных графов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 249–256.

В.Ф. Алексеев,
доктор техн. наук, профессор;
В.Ю. Андриевская,
кандидат физико-математических наук, доцент;
К.К. Жбанов

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДНЕГО КВАДРАТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ПРИ СОЗДАНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

В статье рассматривается применение метода среднего квадратического прогноза для интерполяции хаотично заданных нормальных высот в узлы регулярной сетки на плоскости при создании точных цифровых моделей рельефа в локальных районах, а также при определении значений нормальных высот в заданных точках с использованием цифровых моделей рельефа. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающих целесообразность применения предлагаемого подхода.

Ключевые слова: дисперсия, ковариационная функция, нормальная высота, радиус корреляции, средний квадратический прогноз, цифровая модель рельефа.

ВВЕДЕНИЕ

Под *цифровой моделью рельефа* (ЦМР) обычно понимается упорядоченная совокупность дискретных значений нормальных высот (высот точек земной поверхности над поверхностью квазигеоида) в узлах равномерной сетки меридианов и параллелей (в локальном районе – в узлах регулярной сетки на плоскости) в единой системе геодезических координат (как правило, такие координаты записаны на машинный носитель информации в установленном формате), сопровождаемая алгоритмом интерполяции, который обеспечивает получение промежуточных значений указанных характеристик с необходимой точностью [1].

При создании точных ЦМР на локальный район исходная информация будет определяться по результатам геометрического или тригонометрического нивелирования и, следовательно, будет представлять собой массив хаотично расположенных точек с известными значениями геодезических координат и нормальных высот. Для приведения такой информации в узлы регулярной сетки на плоскости необходимо применять интерполяцию. Кроме того, как следует из определения ЦМР, интерполяция будет использоваться при вычислениях значений нормальных высот в произвольно заданных точках цифровой модели вне узлов регулярной сетки. Методы решения такой задачи (средневзвешенной интерполяции, кусочно-полиномиального сглаживания и др.) достаточно подробно рассмотрены в работе [2]. Здесь же выполнен анализ достоинств и недостатков каждого из рассматриваемых подходов. В настоящей статье рассмотрен еще один метод решения задачи интерполяции, который заключается в применении формулы среднего квадратического прогноза [3].

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДНЕГО КВАДРАТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Вычисление значений нормальных высот в заданных точках земной поверхности с использованием метода среднего квадратического может быть выполнено по формуле

$$H_{pc}(x_j, y_j) = K_{HH_{ji}} \cdot K_{HH_{ii}}^{-1} \cdot H(x_i, y_i), \quad (1)$$

где

$$H(x_i, y_i) = H_{\text{исх}}(x_i, y_i) - H_{\text{средн}}.$$

Здесь $H_{\text{исх}}(x_i, y_i)$ – исходные значения нормальных высот в точках, плоские прямоугольные координаты которых равны x_i, y_i , при этом

$$H_{\text{средн}} = \frac{\sum_{i=1}^N H_{\text{исх}}(x_i, y_i)}{N}.$$

В формуле (1) введены следующие обозначения:

$K_{HH_{ii}}$ – автоковариационная функция исходных нормальных высот;

$K_{HH_{ji}}$ – ковариационная функция между исходными и вычисляемыми в заданных точках значениями нормальных высот; кроме того,

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, N, \\ j &= I, II, \dots, M, \end{aligned}$$

где N – число исходных значений нормальных высот, используемых для решения задачи интерполяции;

M – число узлов регулярной сетки, в которые приводятся значения высот.

В матричной форме уравнение (1) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} H_{pcI} \\ H_{pcII} \\ \dots \\ H_{pcM} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{I,1} & K_{I,2} & \dots & K_{I,N} \\ K_{II,1} & K_{II,2} & \dots & K_{II,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{M,1} & K_{M,2} & \dots & K_{M,N} \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \dots & K_{1,N} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \dots & K_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{N,1} & K_{N,2} & \dots & K_{N,N} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \dots \\ H_N \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для оценки значений функций $K_{HH_{ii}}$ и $K_{HH_{ji}}$ в формулах (1) или (2) могут быть использованы модели марковского типа [4]. Исследования, представленные в работе [5], позволяют заключить, что эмпирические автоковариационные функции нормальных высот с относительной погрешностью порядка 3-4 % аппроксимируют моделями [4] третьего порядка

$$K_{HH}(r) = D_H \left(1 + \frac{r}{\mu} - \frac{1}{2} \frac{r^2}{\mu^2} \right) \exp\left(-\frac{r}{\mu}\right) \quad (3)$$

или четвертого порядка

$$K_{HH}(r) = D_H \left(1 + \frac{r}{\mu} + \frac{1}{6} \frac{r^2}{\mu^2} - \frac{1}{6} \frac{r^3}{\mu^3} \right) \exp\left(-\frac{r}{\mu}\right). \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) r – расстояния, для которых вычисляются коэффициенты ковариационной функции, а $\exp = 2.71828$ – основание натурального логарифма.

Для применения уравнений (3) и (4) необходимо в районе создания ЦМР определить эмпирические значения дисперсии поля рельефа D_H и параметра μ , который связан с радиусом корреляции нормальных высот R_H соотношениями [4]:

– для модели третьего порядка соотношением

$$\mu = \frac{R_H}{1.361}; \quad (5)$$

– для модели четвертого порядка –

$$\mu = \frac{R_H}{1.860}. \quad (6)$$

Оба неизвестных параметра могут быть установлены по результатам статистического анализа рельефа в исследуемом районе. Для этого с использованием имеющейся на данный район информации о рельефе (например, крупномасштабной топографической карты) определяется эмпирическая ковариационная функция нормальных высот. Наиболее просто данная задача решается по формуле

$$K_{HH}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} H_{\psi_i} H_{\psi_{i+m}}, \quad (7)$$

где H_{ψ_i} – центрированные значения нормальных высот;

N – число равноудаленных исходных нормальных высот, выбранных для построения ковариационной функции;

$m = 0, 1, 2, \dots, N - 2$.

Расстояния, для которых вычисляются коэффициенты ковариации, будут находиться из уравнения

$$r = \Delta r \cdot m,$$

где Δr – расстояние между смежными точками массива исходных нормальных высот.

Из анализа выражения (7) следует, что для нахождения эмпирической автоковариационной функции K_{HH} надо вычислять средние из произведений значений нормальных высот, находящихся на расстоянии r друг от друга. Далее рассчитываются необходимые характеристики эмпирической автоковариационной функции:

– дисперсия $D_H = K_{HH}(r=0)$;

– радиус корреляции R_H – расстояние r , при котором автоковариационная функция достигла значения $\frac{D_H}{\exp}$.

Таким образом, реализация метода среднего квадратического прогноза для интерполяции хаотично заданных значений нормальных высот в узлы регулярной сетки на плоскости включает:

– оценку статистических характеристик рельефа в исследуемом локальном районе;

– вычисление значений ковариационных функций (3) или (4), соответствующих моделям марковского типа третьего или четвертого порядка;

– определение значений нормальных высот заданных точек по формуле (2).

Для экспериментальных исследований метода среднего квадратического прогноза была создана эталонная модель рельефа, включающая 49 опорных точек, расположенных в узлах регулярной сетки с шагом 7 км. Пространственное положение опорных точек определялось с использованием цифровой модели рельефа на площади, соответствующей листу топогра-

фической карты масштаба 1:100000. В качестве исходных данных использовались 250 хаотично заданных значений нормальных высот, квазиравномерно распределенных по району исследований. Пространственное положение исходных точек было получено с применением этой же цифровой модели рельефа. Статистические характеристики исходных нормальных высот составили:

- минимальное значение – 71 м;
- максимальное значение – 197 м;
- среднее квадратическое значение – 152,9 м.

В ходе экспериментальных исследований определялись средние квадратические расхождения эталонных высот и высот в этих же точках, вычисленных с использованием метода среднего квадратического прогноза. При реализации данного метода ковариационная функция задавалась аналитическими моделями как (3), так и (4). Дополнительно для решения задачи приведения исходных нормальных высот в узлы регулярной сетки применялись методы средневзвешенной интерполяции и аналитических сплайнов, уравнения которых приведены в статье [2]. При вычислениях с применением метода средневзвешенной интерполяции показатель степени в формуле весовой функции принимался равным 2 или 3. Результаты вычислений систематизированы в табл. 1.

Таблица 1

Средние квадратические расхождения (в м) эталонных значений нормальных высот и высот, вычисленных исследуемыми методами интерполяции

Характеристика	Метод интерполяции				
	средневзвешенной интерполяции		аналитических сплайнов	среднего квадратического прогноза	
	$k = 2$	$k = 3$		Модель 3-го порядка	Модель 4-го порядка
Минимальное абсолютное расхождение, м	0,98	0,06	0,24	0,52	0,84
Максимальное абсолютное расхождение, м	51,49	37,15	31,53	30,51	39,94
Среднее квадратическое расхождение	23,64	17,94	14,81	14,94	17,43

Анализ полученных данных позволяет заключить, что решение задачи интерполяции нормальных высот методом среднего квадратического прогноза обеспечивает определение нормальных высот с относительной средней квадратической погрешностью на уровне 9%. При реализации данного метода необходимо использовать ковариационную функцию, задаваемую аналитической моделью третьего порядка (3). Полученные при таком подходе результаты будут вполне сопоставимы с оценками при использовании метода аналитических сплайнов, который обеспечивает наиболее точное решение целевой задачи. В то же время в районах со сложной структурой рельефа не целесообразно применять метод среднего квадратического прогноза с ковариационной функцией, задаваемой аналитической моделью (4). В этом случае относительная средняя квадратическая погрешность определения нормальных высот может увеличиться до 11%.

Точность решения целевой задачи методом средневзвешенной интерполяции значительно зависит от правильности выбора показателя степени k . В выполненном эксперименте изменение этой величины с $k = 2$ до $k = 3$ привело к уменьшению относительной погрешности

восстановления нормальных высот с 15 до 12%. Следовательно, применение данного подхода потребует отдельных исследований по правильному подбору параметра k в каждом районе, что усложнит методики создания цифровых моделей рельефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований показывают, что применение методов интерполяции при создании ЦМР обеспечивает восстановление значений нормальных высот в заданных точках с относительной погрешностью на уровне 9-10%.

Для решения задачи наиболее целесообразно применять методы аналитических сплайнов и среднего квадратического прогноза, обеспечивающие лучшую точность. При применении метода среднего квадратического прогноза необходимо использовать ковариационную функцию нормальных высот, соответствующую модели марковского типа третьего порядка.

Список используемых источников

1. Курошев Г.Д. Роль картографо-геодезического мониторинга в исследовании географического пространства // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7. Геология. География. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. – № 4. – С. 112–123.
2. Сербенюк С.Н., Кошель С.М., Мусин О.Р. Методы моделирования геополей по данным в нерегулярно расположенных точках // Геодезия и картография. – 1990. – № 11. – С. 31–35.
3. Мориц Г. Современная физическая геодезия. – М.: Недра, 1983. – 391 с.
4. Левицкая З.Н. Статистические модели аномальных характеристик гравитационного поля Земли. Гравиметрические исследования на море. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – С. 26–46.
5. Алексеев А.В. К выбору статистической модели рельефа при создании электронных специальных карт // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – С. 317–321.

В.Ф. Алексеев,
доктор техн. наук, профессор;
Т.Н. Данилова;
Д.О. Медяников,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАДИЕНТОВ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫМИ ГРАВИМЕТРАМИ

В статье предлагается методика определения вторых производных геопотенциала по исходным значениям ускорений силы тяжести. Изложен порядок проложения гравиметрических рейсов, обработки полевых материалов и контроля полученных результатов.

Ключевые слова: методика, градиент силы тяжести, измерения, гравиметр, геопотенциал

Для определения значений вторых производных геопотенциала в точках земной поверхности используются гравитационные вариометры или градиентометры [1]. Решить данную задачу можно и иным способом, обработав результаты детальной съемки, оперативно выполненной современными высокоточными гравиметрами. При таком подходе целесообразно отказаться от осуществления площадных гравиметрических измерений, а выполнить лишь измерения по профилям только в районе определяемых пунктов. Методика решения данной задачи и рассматривается в настоящей статье.

Теоретической основой предлагаемой методики является уравнение, описывающее градиент ускорения силы тяжести в произвольном направлении, имеющем азимут A , т. е.

$$\frac{\partial g}{\partial s_A} = \frac{\partial^2 W}{\partial s_A^2} = \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \cos A + \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \sin A. \quad (1)$$

Тогда, согласно работе [3], полным горизонтальным градиентом, т. е. вектором, указывающим направление, в котором сила тяжести возрастает (убывает) быстрее всего, будет

$$\frac{\partial^2 W}{\partial s_{nl}^2} = \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \right)^2. \quad (2)$$

Последовательность специальных работ, реализующих уравнение (1), может быть такой:

1. На выбранном участке местности закрепляется центр определяемого пункта. На удалении 150 м от него в обе стороны отмечаются точки 11 и 16 (рис. 1). Определяемый пункт должен располагаться посередине и в створе линии 11–16. Данный отрезок назовем линией I.

2. В створе линии I через каждые 50 м от точки 11 отмечаются вспомогательные точки 12–15 (рис. 1).

3. Аналогично строится на местности линия II, которой будут принадлежать находящиеся в створе точки 21–26. Центром линии II также будет определяемый пункт.

При построении на местности линий I и II необходимо стремиться, чтобы угол между ними был близким к 90° .

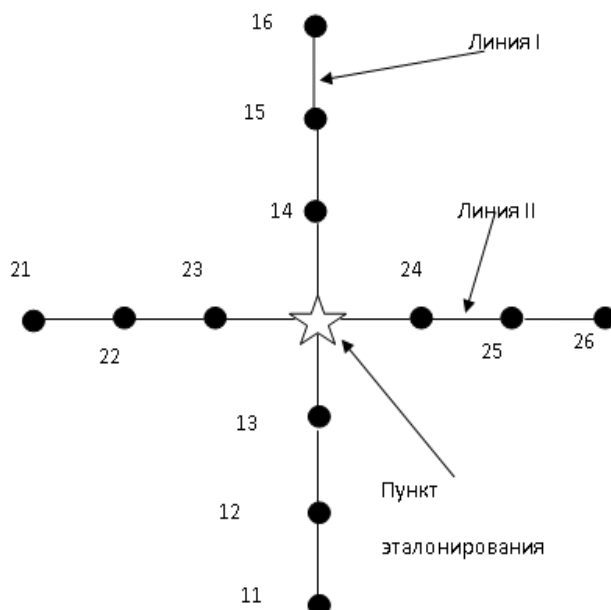


Рис. 1. Схема гравиметрической съемки на пункте эталонирования гравитационного градиентометра

4. На максимально возможном удалении от выбранного пункта, в пределах прямой видимости с него, устанавливается приемник геодезического класса точности, работающий по сигналам спутниковых навигационных систем. Другой приемник должен устанавливаться над центром пункта. Исходя из обработки спутниковых наблюдений, определяется азимут вспомогательного направления, и далее путем измерения горизонтальных углов (теодолитом или тахеометром) этот азимут передается на линии I и II (рис. 2).

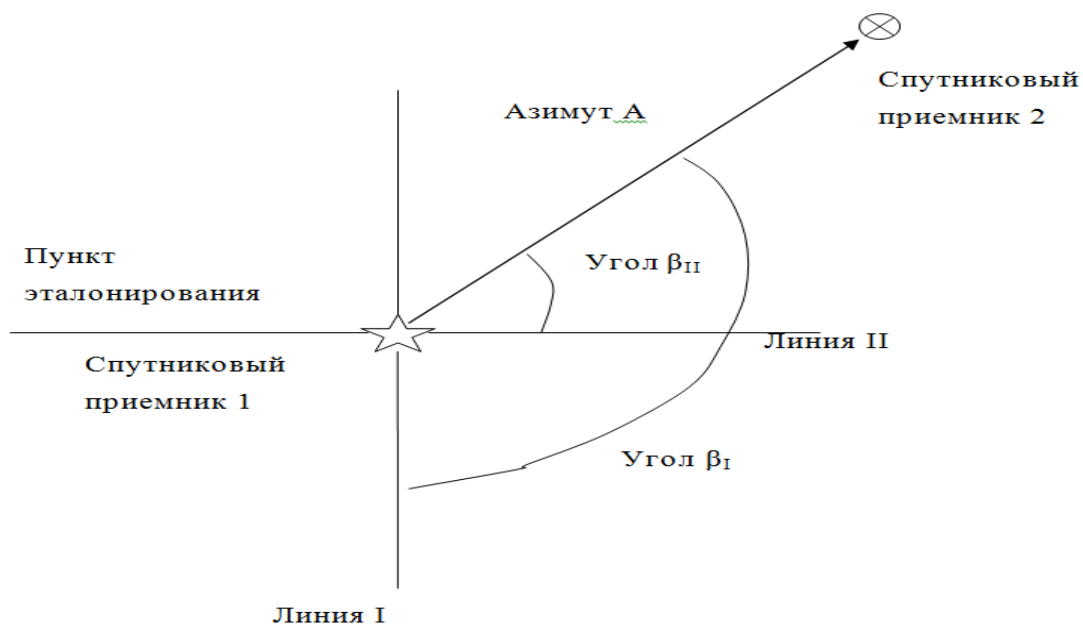


Рис. 2. Схема определения азимутов направлений на пункте эталонирования гравитационного градиентометра

5. Комплектом относительных гравиметров выполняются гравиметрические рейсы по схемам:

Рейс 1. Опорный гравиметрический пункт №1.....точка 11.....точка 12..... точка 13.....Эталонный гравиметрический пункт.....точка 14.....точка 15.....точка 16..... Опорный гравиметрический пункт №1.

Рейс 2. Опорный гравиметрический пункт №1.....точка 21.....точка 22..... точка 23.....Эталонный гравиметрический пункт.....точка 24.....точка 25.....точка 26..... Опорный гравиметрический пункт №1.

Рейс 3. Опорный гравиметрический пункт №2.....точка 11.....точка 12..... точка 13.....Эталонный гравиметрический пункт.....точка 14.....точка 15.....точка 16..... Опорный гравиметрический пункт №2;

Рейс 4. Опорный гравиметрический пункт №2.....точка 21.....точка 22..... точка 23.....Эталонный гравиметрический пункт.....точка 24.....точка 25.....точка 26..... Опорный гравиметрический пункт №2.

Для выполнения гравиметрических рейсов возможно применять комплекты из трех гравиметров типа ГНУ-КВ. При этом продолжительность каждого рейса не должна превышать 4 ч, что гарантирует линейность смещения нуль-пунктов приборов в ходе полевых измерений.

6. Для определения в исследуемом пункте горизонтальных градиентов силы тяжести $\frac{\partial^2 W}{\partial s_1^2} = \frac{\partial g}{\partial s_1}$ и $\frac{\partial^2 W}{\partial s_2^2} = \frac{\partial g}{\partial s_2}$ в направлениях, заданных соответственно азимутами A_1 и A_2 , необходимо выполнить аппроксимацию алгебраическими полиномами значений ускорений силы тяжести, полученных в результате обработки измерений по линиям I и II. Для этого наиболее целесообразно использовать алгебраический полином второй степени вида

$$g_i^{an} = b_0 + b_1 s_i + b_2 s_i^2. \quad (3)$$

Здесь b_0, b_1, b_2 – неизвестные коэффициенты полинома;

s_i – расстояние до точки, в которой выполнялись гравиметрические измерения, от эталонного пункта;

$i = 1, 2, \dots, n$ (где n – это число точек измерения по исследуемой линии, которое в рассматриваемой задаче принято равным семи).

Аппроксимацию измеренных значений ускорений силы тяжести легко выполнить, используя метод наименьших квадратов. Условием его реализации будет минимальное значение суммы квадратов отклонений значений g_i^{an} , вычисленных с использованием аппроксимирующего полинома, от исходных значений g_i , т. е.

$$\Phi = \sum_{i=1}^n [g_i - (b_0 + b_1 s_i + b_2 s_i^2)]^2 = \min. \quad (4)$$

Необходимым условием минимума функции (4) является выполнение равенства

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b_0} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b_1} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b_2} = 0. \quad (5)$$

Тогда система нормальных уравнений примет вид

$$A \cdot X = L, \quad (6)$$

где A – матрица коэффициентов нормальных уравнений

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n s_i & \sum_{i=1}^n s_i^2 \\ \sum_{i=1}^n s_i & \sum_{i=1}^n s_i^2 & \sum_{i=1}^n s_i^3 \\ \sum_{i=1}^n s_i^2 & \sum_{i=1}^n s_i^3 & \sum_{i=1}^n s_i^4 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

L – матрица свободных членов

$$L = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n g_i \\ \sum_{i=1}^n g_i s_i \\ \sum_{i=1}^n g_i s_i^2 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

X – матрица неизвестных

$$X = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Решение системы нормальных уравнений

$$X = A^{-1}L \quad (10)$$

позволит определить неизвестные коэффициенты полиномов b_0, b_1, b_2 и, следовательно, вычислить сглаженные значения ускорения силы тяжести g_i^{an} для точек исследуемых линий.

Для вычисления горизонтальных градиентов силы тяжести на определяемом пункте в направлениях, азимуты которых равны A_1 ($\frac{\partial^2 W}{\partial s_1^2}$ для линии I) и A_2 ($\frac{\partial^2 W}{\partial s_2^2}$ для линии II), необходимо найти первую производную функции

$$g^{an} = b_0 + b_1 s + b_2 s^2 \quad (\text{так как } \frac{\partial^2 W}{\partial s^2} = \frac{\partial g}{\partial s})$$

для каждого из этих направлений.

Несложно показать, что такое значение будет следующим:

$$\frac{\partial g^{an}}{\partial s} = b_1 + 2b_2 s. \quad (11)$$

7. Для вычисления искомых горизонтальных градиентов силы тяжести в направлении меридиана $\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z}$ и первого вертикала $\frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z}$ следует воспользоваться уравнением (1). В дан-

ном случае определяется система двух уравнений с двумя неизвестными, в которой матрицы имеют вид:

– матрица коэффициентов нормальных уравнений

$$A = \begin{bmatrix} \cos A_1 & \sin A_1 \\ \cos A_2 & \sin A_2 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

– матрица свободных членов

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 W}{\partial s_1^2} \\ \frac{\partial^2 W}{\partial s_2^2} \end{bmatrix}; \quad (13)$$

– матрица неизвестных

$$X = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Решение данной системы уравнений можно выполнить по выражению (10) или по формулам Крамера [2]. При втором подходе определители матрицы будут такими:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \cos A_1 & \sin A_1 \\ \cos A_2 & \sin A_2 \end{vmatrix} = \cos A_1 \sin A_2 - \cos A_2 \sin A_1; \quad (15)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 W}{\partial s_1^2} & \sin A_1 \\ \frac{\partial^2 W}{\partial s_2^2} & \sin A_2 \end{vmatrix} = \frac{\partial^2 W}{\partial s_1^2} \sin A_2 - \frac{\partial^2 W}{\partial s_2^2} \sin A_1; \quad (16)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \cos A_1 & \frac{\partial^2 W}{\partial s_1^2} \\ \cos A_2 & \frac{\partial^2 W}{\partial s_2^2} \end{vmatrix} = \frac{\partial^2 W}{\partial s_2^2} \cos A_1 - \frac{\partial^2 W}{\partial s_1^2} \cos A_2. \quad (17)$$

Искомые значения горизонтальных градиентов $\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z}$ и $\frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z}$ вычисляются по формулам:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} = \frac{\Delta_2}{\Delta}. \quad (18)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика позволяет определять горизонтальные градиенты силы тяжести в заданных пунктах по результатам обработки наземных гравиметрических измерений. Методика обеспечивает быстрый набор измерительной информации в полевых условиях и ее корректную математическую обработку средствами математического пакета MathCad. Данная методика может быть полезна при создании эталонных полигонов в частях Топографической службы Вооруженных сил Российской Федерации.

Список используемых источников

1. *Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П.* Гравиметрия. – М.: Недра, 1978. – 325 с.
2. *Липовцев Ю.В., Третьякова О.Н.* Основы высшей математики для инженеров: учеб. пособие для высших технических учебных заведений. – М.: Вузовская книга, 2009. – 482 с.
3. *Шимбирев Б.П.* Теория фигуры Земли. – М.: Недра, 1975. – 432 с.

А.В. Алферов;
А.И. Карин;
С.А. Карин,
кандидат военных наук, доцент;
В.В. Октябрьский,
кандидат техн. наук

МЕТОД АДАПТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИОРИТЕТОВ ИНФОРМАЦИОННО-РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ПОТЕНЦИАЛЬНО-ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА В УСЛОВИЯХ РЕСУРСНОЙ ОГРАНИЧЕННОСТИ

Описан метод адаптивного определения приоритетов информационно-расчетных задач в системах мониторинга потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера, который учитывает текущие условия обстановки и причинно-следственные связи между отдельными событиями рассматриваемых процессов. Предложенный метод позволит существенно повысить результативность функционирования автоматизированных информационных систем мониторинга и прогнозирования потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера в условиях дефицита их ресурсов, поскольку сможет обеспечить заблаговременную подготовку исходных данных, требуемых для решения последующих задач с более высоким значением приоритета.

Ключевые слова: геопространственные данные, адаптивное определение приоритетов, комплексная обработка, причинно-следственные связи, потенциально-опасные процессы природного и техногенного характера.

ВВЕДЕНИЕ

Средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) как космического, так и воздушного базирования в настоящее время являются основным источником информации для решения расчетных и аналитических задач, связанных с мониторингом и прогнозированием потенциально-опасных процессов (ПОПр) природного или техногенного характера. Эти средства обеспечивают не менее 70% всех исходных данных, при этом их возможности и значимость продолжают возрастать [1, 2].

Примерами ПОПр природного или техногенного характера могут являться лесные пожары, ледовые явления на реках, наводнения, аварии с выбросом химических, радиоактивных или биологических веществ при их производстве, переработке или хранении и т. п.

Среди ключевых особенностей рассмотренных ПОПр можно выделить:

- 1) возрастание числа и типов событий, приводящих к возникновению и развитию ПОПр;
- 2) наличие прогнозируемых причинно-следственных связей (ПСС) между отдельными событиями в рамках ПОПр;
- 3) наличие пространственно-временной привязки каждого события (они происходят в заданном месте и в заданное время);
- 4) возможность ранжирования по степени значимости как в целом потенциально-опасных процессов, так и их отдельных событий путем присвоения каждому из них некоторого значения коэффициента относительной значимости (КОЗ).

Решение задач мониторинга и прогнозирования событий в рамках ПОПр на данный момент осуществляется органами государственного и муниципального управления. При этом полагается, что каждое такое событие отрабатывается в ходе решения отдельной информационно-расчетной задачи (ИРЗ). Для решения указанных задач создаются специальные автоматизированные информационные системы мониторинга и прогнозирования (АИС МП).

Обработка данных ДЗЗ в них осуществляется в рамках единого технологического цикла (ЕТЦ). Каждая подзадача в рамках ЕТЦ выполняется отдельным ресурсом, а ее результаты являются исходными данными для других подзадач, выполняемых другими ресурсами. В качестве последних могут выступать специализированные комплексы обработки, тематические базы данных, в которых накапливаются «сырые» данные и промежуточные результаты их обработки, подразделения и организации, осуществляющие отдельные сложные этапы специальной обработки в рамках единого технологического цикла.

Особенности возникновения и протекания ПОПр, а именно: увеличение их числа и типов, а также высокая динамичность обуславливают повышение требований к результативности функционирования АИС МП, накладывают жесткие временные рамки на процесс комплексной обработки данных и входят в противоречие с потенциальными возможностями АИС МП, тем самым определяя их ресурсную ограниченность [3].

В условиях высокой динамичности ПОПр особую актуальность приобретают технологии, благодаря использованию которых можно создавать системы управления функционированием АИС МП, позволяющие адаптироваться к текущим условиям обстановки, в частности, переназначать внутренний приоритет поступающим задачам исходя из того, для обработки каких зарегистрированных событий ПОПр (с учетом их текущих взаимосвязей) они сформированы. Иными словами, результирующее значение внутреннего приоритета задач, используемое для их ранжирования в очереди, должно определяться значимостью и взаимосвязями соответствующего события и может отличаться от значения КОЗ, заданного потребителем их результатов.

Современные технологии прогнозирования потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера основаны на применении формальных моделей, описывающих типовые сценарии их развития. Эти технологии позволяют выразительно описать взаимосвязи между наблюдаемыми событиями в рамках ПОПр.

Однако данные технологии никогда не применялись в интересах управления функционированием АИС МП. Кроме того, проведенный анализ существующих моделей и методов функционирования АИС МП в рамках реализации единого технологического цикла комплексной обработки данных показал, что основными проблемами в условиях ресурсной ограниченности являются [4]:

- во-первых, отсутствие возможности учета изменений в развитии ПОПр, а также причинно-следственных связей между регистрируемыми событиями и, как следствие, возможности первоочередного перераспределения ограниченных ресурсов АИС МП на решение задач, имеющих более высокий приоритет в зависимости от текущих условий обстановки;
- во-вторых, отсутствие возможности учета текущей загруженности ресурсов АИС МП, а значит, и возможности их перераспределения с учетом этого обстоятельства.

В результате разработка новых способов и технологий управления такими системами, позволяющих обоснованно адаптироваться к текущим условиям их функционирования, становится крайне актуальной задачей.

В данной статье предложен разработанный авторами метод адаптивного определения значений внутренних приоритетов информационно-расчетных задач, решаемых в системах мониторинга и прогнозирования потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера, в основе которого лежит анализ информации о текущих условиях обстановки и причинно-следственных связях между регистрируемыми событиями.

Предлагаемый метод составляет основу для реализации в контуре оперативного и текущего управления такими системами механизма систематического уточнения внутренних приоритетов ИРЗ для оптимизации процессов распределения имеющихся ресурсов по решаемым задачам путем адаптации к текущим условиям обстановки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ПРИОРИТЕТОВ РЕШАЕМЫХ ИНФОРМАЦИОННО-РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ

Модель функционирования АИС МП представлена в работе [3] и относится к классу многоканальных многостадийных систем массового обслуживания (СМО) с очередями, реализующими обслуживание с приоритетом.

Исходными данными для решения задачи определения внутренних приоритетов ИРЗ являются:

1. Характеристики поступающих на вход АИС МП задач, каждая из которых может быть отнесена к одному из M типов. Тип задачи определяет потребности в ресурсах комплексной обработки на ее решение в виде совокупности подзадач и процедур функциональной обработки исходных данных.

Пусть на рассматриваемом временном интервале $t=[t_0, t_1]$ поступило I задач. Тогда каждая задача характеризуется следующими параметрами:

- номером задачи в общем потоке задач – $i, i \in \{1, 2, \dots, I\}$;
- временем поступления задачи – $t_i \in [t_0, t_1]$;
- типом задачи – $m_i, m_i \in \{1, 2, \dots, M\}$;
- КОЗ задачи, $\xi_i \in [0, 1]$, при этом его исходное значение задается заранее потребителем результатов решения задачи и может определяться как ее типом, так и иными факторами.

С целью упрощения дальнейших выражений введем обозначение i -й поступившей задачи в виде $z_i = (t_i, m_i, \xi_i)$.

Кроме того, каждая решенная задача z_i^p имеет дополнительный параметр K^p , обозначающий степень ее «решенности» (или полноты решения) к моменту времени t , т. е. $K^p \in [0, 1]$. Однако в рамках данной статьи полагается, что все поступившие задачи решаются в полном объеме, таким образом, данный параметр принимает значение 0 или 1.

2. Характеристики событий, которые возникают в рамках потенциально-опасных процессов природного или техногенного характера. При этом каждая поступившая на вход АИС МП информационно-расчетная задача связана с одним и только с одним событием.

Каждому событию e в рамках потенциально-опасного процесса природного или техногенного характера ставится в соответствие значение коэффициента относительной значимости $\xi(e)$, которое зависит как от вида ПОПр, так и от текущих условий обстановки. Ведение и уточнение коэффициентов относительной значимости событий в АИС МП позволяют определить: анализ каких событий необходимо осуществлять в первую очередь. Начальное назначение соответствующих коэффициентов событиям (не задачам!), а также, при необходимости, их уточнение осуществляются на основе накопленного опыта экспертным путем.

Неотъемлемое свойство ПОПр – это наличие причинно-следственных связей между событиями, которое выражается в том, что факт проявления одного события (события-причины) может обуславливать проявление других событий (событий-следствий). Иными словами, существует количественная характеристика, которая есть функция от времени. Она интерпретируется как степень причинно-следственной связанности событий и показывает, какова условная вероятность того, что событие-следствие может быть зарегистрировано средствами добывания на заданном временном интервале при условии, что событие-причина в начале этого интервала произошло.

Требуется определить значение внутреннего приоритета p_i каждой поступившей задачи z_i , которое будет удовлетворять следующим условиям:

- внутренний приоритет задачи z_i может быть определен значением коэффициента относительной значимости соответствующего события e_i , для анализа которого эта задача сформирована; в этом случае в качестве исходного значения внутреннего приоритета задачи предлагается использовать значение коэффициента относительной значимости события, т. е. $p(z_i) = \xi(e_i)$;

– если за выявленным событием ПОПр (в соответствии с существующими моделями протекания ПОПр) могут последовать через некоторое время другие, более значимые, события-следствия, т. е. имеющие большее значение коэффициента относительной значимости, то задаче по анализу события-причины необходимо повысить приоритет, присвоив ей максимальное значение коэффициента относительной значимости событий-следствий, т. е. $p(z_i) = \xi(e_i) = \max\{\xi(E_i^*)\}$, где E_i^* – множество событий-следствий события e_i .

Как показано в работах [3 и 4], потенциальные возможности АИС МП по выполнению возлагаемых на нее функций оцениваются на заданном временном интервале $[0, t]$ показателем результативности, который определяется как отношение числа решенных задач к числу поступивших с учетом коэффициентов их относительных значимостей и полноты решения и формально вычисляется в соответствии с формулой

$$R(t) = \frac{\sum_{i=1}^{I(t)} \xi_i K^p}{\sum_{i=1}^{I(t)} \xi_i}, \quad (1)$$

где $I(t)$ – количество поступивших задач к моменту времени t .

Иными словами, в соответствии с формулой (1) значение показателя результативности $R(t)$ будет выше, если обоснованно увеличить число вовремя решенных задач с большим значением приоритета.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА АДАПТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ПРИОРИТЕТОВ РЕШАЕМЫХ ИНФОРМАЦИОННО-РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ

Принцип адаптивности определения внутренних приоритетов ИРЗ заключается в том, что параметры функционирования рассматриваемого метода модифицируются на основе текущих изменений показателя результативности функционирования АИС МП.

При реализации ЕТЦ в системах мониторинга и прогнозирования потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера учитываются следующие обстоятельства:

1) каждой ИРЗ z_i назначается внутренний приоритет $p(z_i)$, при этом его начальное значение определяется потребителем на основе значения коэффициента относительной значимости события, для анализа которого была сформирована данная ИРЗ;

2) учитывая тот факт, что на момент решения ИРЗ текущая обстановка может измениться и относительная значимость соответствующего события (с учетом причинно-следственной связности событий) может стать иной, итоговое значение приоритета задачи z_i может отличаться от значения, присвоенного потребителем;

3) ИРЗ с большим значением внутреннего приоритета должны обрабатываться первыми.

Результатами обработки информационно-расчетных задач являются типовые отчетные информационные документы [7], которые содержат данные по уточненным характеристикам ПОПр, выявленным зависимостям между событиями текущей обстановки, вариантам дальнейшего развития обстановки и т. д.

Важно отметить, что на различных этапах обработки ИРЗ могут возникнуть связанные с ней задачи (подзадачи), результаты обработки которых должны быть включены в итоговые результаты исходной ИРЗ [7]. Эти задачи могут быть связаны с анализом событий других ПОПр, которые могут произойти через некоторое время и будут являться следствиями исходного события. При этом события-следствия могут иметь большее значение коэффициента относительной значимости по сравнению с его значением у события-причины.

На сегодняшний день определение событий-следствий (т. е. оценка текущей обстановки и анализ вариантов ее дальнейшего развития) осуществляется уже в процессе обработки информационно-расчетной задачи, и, таким образом, отсутствует возможность управлять ее внутренним приоритетом в АИС МП в зависимости от текущих условий обстановки. Тем не менее существующие модели протекания ПОПр позволяют автоматически рассчитывать ва-

рианты дальнейшего развития обстановки. Такие модели могут быть положены в основу информационных экспертных систем [5–7], которые позволят накапливать имеющиеся знания о ПОПр и автоматически предлагать сценарии дальнейшего развития обстановки.

Исходными данными в рамках предлагаемого метода являются:

- 1) $\xi(e_i)$ – начальное значение КОЗ очередного события;
- 2) параметры, определяющие условия изменения текущего значения внутреннего приоритета задачи, а именно:

– $\Delta T = (t^H, t^K)$ – глубина анализа причинно-следственной связи (ПСС) между событиями (а именно временной диапазон, где t^H – момент времени, в который зафиксировано событие, т. е. левая граница анализа; t^K – момент времени, являющийся правой границей анализа);

– $\Psi \in [0, 1]$ – порог величины причинно-следственной связи для изменения значения внутреннего приоритета задачи.

Здесь под величиной ПСС понимается условная вероятность возникновения события-следствия на рассматриваемом временном интервале при условии, что событие-причина в начале этого интервала произошло. При этом рассматриваемый порог этой величины трактуется следующим образом: если условная вероятность возникновения события-следствия на временном интервале ΔT превышает данное значение и если значение КОЗ события-следствия больше значения КОЗ события-причины, то первое будет использоваться в качестве значения внутреннего приоритета ИРЗ.

Метод производит поиск в информационной экспертной системе (в соответствии с заданными параметрами) возможных событий ПОПр, связанных с текущим зарегистрированным событием причинно-следственными связями, и таким образом формирует упорядоченное множество вариантов дальнейшего развития обстановки, в котором события-причины находятся ближе к началу этого множества.

Если с текущим событием связаны события-следствия, значения коэффициентов относительных значимостей которых выше, чем у текущего события, то в качестве значения внутреннего приоритета соответствующей ИРЗ должно использоваться максимальное значение КОЗ среди событий-следствий. Общая схема метода представлена на рис. 1.

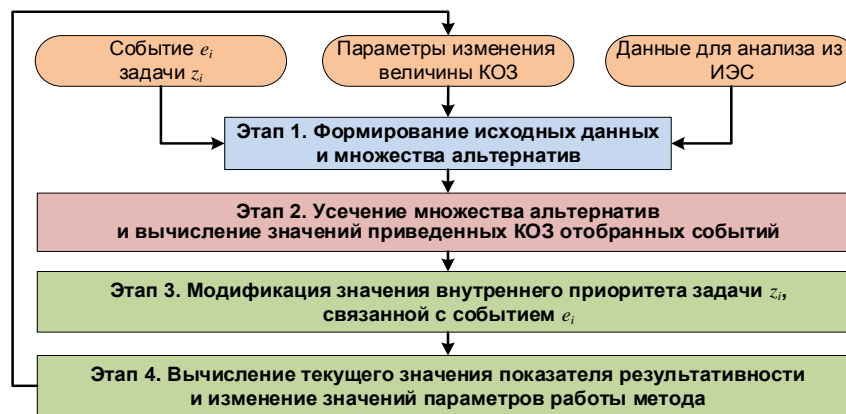


Рис. 1. Общая схема метода

На **первом этапе** работы метода осуществляется получение исходных данных в виде очередного события e и параметров изменения текущего значения коэффициента его относительной значимости, а именно: ΔT и Ψ .

Также осуществляется формирование упорядоченного множества $\Phi_i = \{\varphi_{ij}\}$, каждый элемент которого представляет собой тройку параметров вида $\langle e_i, e_j, \psi_{ij}(\tau) \rangle$, где e_i – событие-причина; e_j – событие-следствие; $\psi_{ij}(\tau)$ – функция причинно-следственной связи между событиями e_i и e_j от времени τ на интервале $[t^H, t^K]$, пример графика которой приведен на рис. 2.

Физический смысл данной функции заключается в том, что она представляет собой плотность условной вероятности возникновения события-следствия на рассматриваемом временном интервале при условии, что событие-причина произошло.

Таким образом, условная вероятность P_{ij} наступления события-следствия на рассматриваемом временном интервале равна площади под графиком функции $\psi_{ij}(\tau)$.

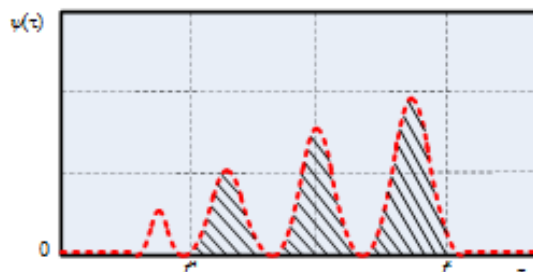


Рис. 2. Зависимость ПСС между двумя событиями от времени

Множество Φ_i формируется в результате выполнения запроса к информационной экспертной системе, подходы к построению и ведению которой представлены в работе [5, 6]. Данная экспертная система хранит и обрабатывает следующие данные:

- 1) множество типовых сценариев развития ПОПр;
- 2) множество информационных признаков различных типов, которые могут проявляться при возникновении событий в рамках ПОПр;
- 3) матрицу соответствия событий и выявляемых информационных признаков;
- 4) данные существующих моделей протекания ПОПр, в виде причинно-следственных связей между их событиями;
- 5) исходные значения коэффициентов относительных значимостей событий.

В итоге результатом выполнения первого этапа метода является множество характеристик событий-следствий $\Phi_i = \{\varphi_{ij}\}$, элементы которого – это тройки параметров «событие-причина, событие-следствие, функция ПСС между ними». При этом каждый элемент φ_{ij} формально определяется в соответствии со следующей формулой:

$$\varphi_{ij} = \langle e_i, e_j, \psi_{ij}(\tau) \rangle. \quad (2)$$

Схема первого этапа метода представлена на рис. 3.

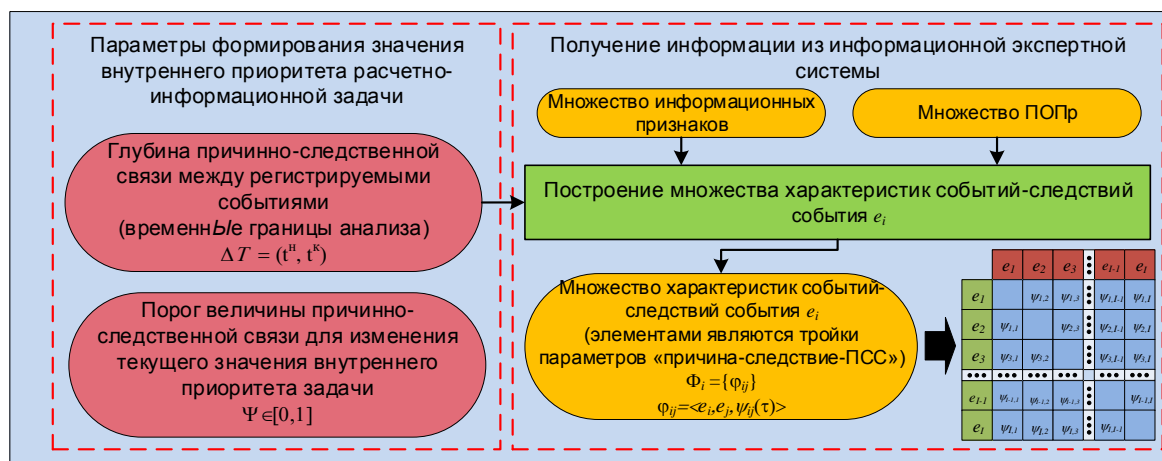


Рис. 3. Схема первого этапа метода

На *втором этапе* метода осуществляется усечение множества Φ_i путем отбраковки тех его элементов, для которых ограничения выходят за рамки установленных лимитов.

На данном этапе реализуется алгоритм, в процессе которого для каждого элемента φ_{ij} в упорядоченном множестве Φ_i осуществляется вычисление значения условной вероятности наступления события-следствия на временном интервале ΔT в соответствии со следующей формулой:

$$P_{ij} = \int_{t^u}^{t^k} \Psi_{ij}(\tau), \tag{3}$$

и его сравнение со значением параметра Ψ .

Если вычисленное значение не превышает Ψ , то осуществляется переход к выбору очередного элемента множества Φ_i . В противном случае выполняется включение текущего элемента множества Φ_i , в множество Φ_i^* (отобранных для последующего анализа, осуществляемого на третьем этапе метода).

Далее на основе элементов, включенных в множество Φ_i^* , формируются соответствующие им скорректированные значения КОЗ событий-следствий π_{ij}^* , которые образуют множество Π_i^* .

Элементы π_{ij}^* рассчитываются в соответствии со следующей формулой:

$$\begin{aligned} \forall \varphi_{ij}^* = \langle e_i, e_j, \Psi_{ij}(\tau) \rangle \in \Phi_i^* \Rightarrow \\ \pi_{ij}^* = \xi(e_j) \cdot P_{ij}, \pi_{ij}^* \in \Pi_i^*. \end{aligned} \tag{4}$$

Результатом выполнения второго этапа метода является множество Π_i^* значений скорректированных коэффициентов относительных значимостей событий, которые имеют с рассматриваемым событием причинно-следственные связи, удовлетворяющие заданным параметрам отбора.

Схема второго этапа метода представлена на рис. 4.

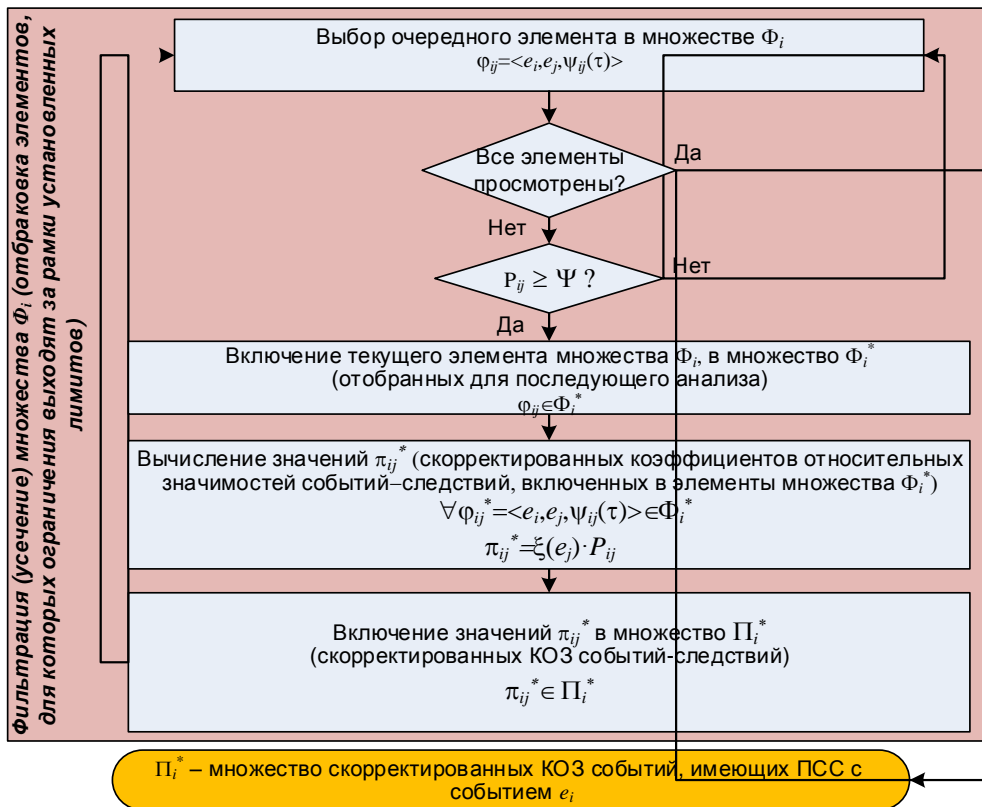


Рис. 4. Схема второго этапа метода

На *третьем этапе* метода осуществляется вычисление значения внутреннего приоритета задачи z_i .

На первом шаге этапа вычисляется максимальное значение среди скорректированных КОЗ отобранных событий-следствий в соответствии со следующей формулой:

$$\pi_{i,\max} = \max(\Pi_i^*). \quad (5)$$

Далее осуществляется выбор итогового значения внутреннего приоритета ИРЗ в соответствии со следующей формулой:

$$p(z_i) = \begin{cases} \xi(e_i), & \xi(e_i) \geq \pi_{i,\max} \\ \pi_{i,\max}, & \xi(e_i) < \pi_{i,\max} \end{cases}. \quad (6)$$

Схема третьего этапа представлена на рис. 5.

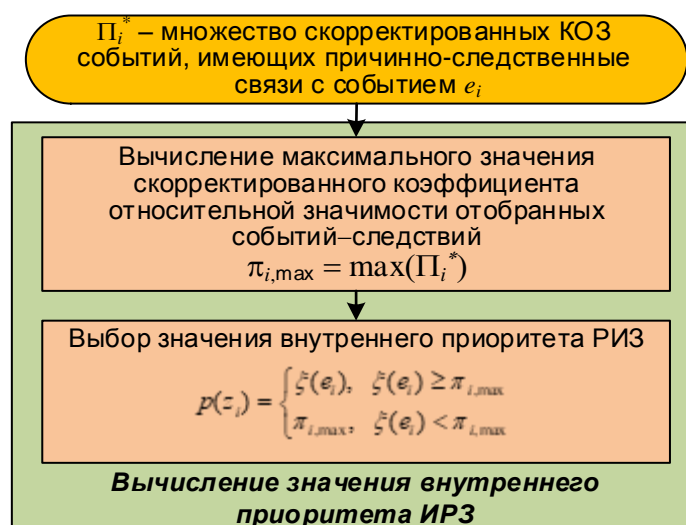


Рис. 5. Схема третьего этапа работы метода

На *четвертом этапе* работы метода осуществляется расчет текущего значения показателя результативности функционирования АИС МП и его сравнение с целевым. В случае, если вычисленное значение меньше целевого и выходит за рамки допустимого отклонения, то производится увеличение значений параметров Ψ и ΔT . В противном случае – уменьшение их значений.

В результате работы метода формируется итоговое значение внутреннего приоритета, которое будет присвоено информационно-расчетной задаче z_i , т. е. при ее формировании будут учтены текущие условия обстановки. В итоге это приведет к тому, что при поступлении очередной высокоприоритетной задачи, связанной с анализом события-следствия e_j , для нее будут сформированы все требуемые исходные данные, что позволит сразу приступить к ее отработке и затратить при этом минимальное время. Этим обеспечивается первоочередное решение задач с наивысшим приоритетом, т. е. адаптация к текущим условиям обстановки и возможным вариантам ее дальнейшего развития.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ МЕТОДА

Для оценки влияния различных параметров метода на значения показателя результативности функционирования АИС МП был разработан программный комплекс имитационного моделирования [8, 9], обеспечивающий:

- генерацию потоков задач разных типов (в соответствии с заданным законом распределения);
- постановку сгенерированных задач в очереди к ресурсам;

- расчет времени ожидания задачи в очереди;
- расчет значений показателя результативности в соответствии с формулой (1).

Условия ресурсной ограниченности задавались таким образом, что при генерации потоков задач формировались очереди к ресурсам. То есть каждая задача ожидала начала своего решения некоторое время.

В ходе серий экспериментов с использованием данного программного комплекса были получены данные, анализ которых позволил построить зависимости показателя результативности функционирования АИС МП от интенсивности потока поступающих задач для случаев их выполнения без изменения значений приоритетов и с изменением на основе изложенного в данной статье метода.

Также в рамках подготовки к экспериментам на базе разработанного перечня потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера была сформирована информационная экспертная система, которая обеспечила учет взаимосвязей (причинно-следственных связей) между регистрируемыми событиями текущей обстановки.

Результаты отработки сценариев организации процесса выполнения ИРЗ как с использованием разработанного метода, так и без его привлечения представлены на рис. 6.

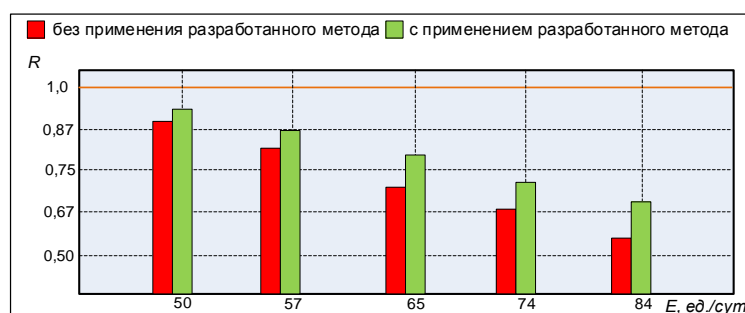


Рис. 6. Зависимость значения показателя результативности функционирования АИС МП от интенсивности входного потока задач с использованием разработанного метода и без его привлечения

Всего было проведено пять экспериментов, отвечающих различным условиям функционирования АИС МП. В частности, при проведении первого эксперимента поток задач составлял порядка 50 в сутки, в последующих экспериментах он увеличивался на 14%. Это, соответственно, приводило к увеличению времени ожидания задач в очереди.

В ходе экспериментов значение параметра ΔT равнялось 5 суткам, значение параметра Ψ было установлено в 0,5. То есть, если вероятность возникновения соответствующего события-следствия с большим значением КОЗ на временном интервале ΔT превышала 50%, то происходило (при необходимости) изменение значения приоритета поступившей задачи.

Вычисление анализируемого значения показателя результативности решения задач, задаваемого формулой (1), производилось с учетом исходных значений КОЗ поступивших задач, заданных потребителем (т. е. модификация значений КОЗ, проводимая в ходе работы метода, не оказывала прямого влияния на итоговое значение показателя результативности).

Как видно из диаграммы на рис. 6, применение разработанного метода позволяет увеличить результативность функционирования АИС МП. При этом выигрыш заключался в том, что модификация внутренних приоритетов поступивших задач позволяла раньше осуществить их отработку и тем самым заблаговременно подготовить исходные данные, требуемые для решения последующих задач с более высоким значением исходного КОЗ, заданным потребителем. Это, в свою очередь, приводило к тому, что для их решения требовалось затратить время, значительно меньшее, чем нормативное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет реализовать в системе управления функционированием автоматизированных систем мониторинга и прогнозирования потенциально-опасных процессов природного или техногенного характера механизм систематического уточнения приоритетов поступающих информационно-расчетных задач в зависимости от складывающихся условий обстановки, т. е. механизм адаптации к текущему состоянию объектов мониторинга.

Реализация данного метода позволит:

– заранее осуществлять подготовку исходных данных для решения более важных ИРЗ, важность которых определяется с учетом причинно-следственных связей между регистрируемыми событиями текущей обстановки;

– уменьшить время, затрачиваемое на их решение (включая сбор требуемых исходных данных), и тем самым повысить результативность функционирования АИС МП, что особенно важно, в частности, в условиях ее ресурсной ограниченности.

Список используемых источников

1. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / Н.Н. Севастьянов [и др.] // Труды МФТИ. – 2009. – Т. 1, № 3. – С. 14–22.

2. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходненко В.П. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. – 2010. – Т. 114. – С. 15–26.

3. Карин А.И., Карин С.А., Октябрьский В.В. Модели адаптивного управления функционированием систем комплексной обработки геопространственных данных при решении задач мониторинга территориально-распределенных объектов // Труды Военно-космической академии. – 2019. – Вып. 671. – С. 314–325.

4. Карин С.А. Операционно-временная модель функционирования систем комплексной обработки геопространственных данных в условиях дефицита их ресурсов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2. – С. 51–57.

5. Карин С.А. Интеграция в едином информационном пространстве разнородных геопространственных данных // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 2. – С. 89–94.

6. Карин С.А. Построение предметно-ориентированной онтологии в системах обработки пространственных данных // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 4. – С. 78–84.

7. Карин С.А., Дудин Е.А. Подходы к созданию распределенной системы сбора, хранения и обработки геопространственных данных // Информация и космос. – 2014. – № 3. – С. 46–51.

8. Программный комплекс обработки геопространственных данных в типовых территориально-распределенных защищенных автоматизированных системах сбора и обработки разнородной информации (DynamicGIS): а. с. RU 2014618310 / [С.А. Карин (RU)]. – № 2014615830; заявл. 18.06.2014; опубл. 20.09.2014.

9. Программная библиотека формирования динамических очередей обработки разнородных данных в типовых территориально-распределенных защищенных автоматизированных системах сбора и обработки разнородной информации (DynamicQueue): а. с. RU 2014618196 / [С.А. Карин (RU)]. – № 2014616224; заявл. 18.06.2014; опубл. 20.09.2014.

А.В. Астапович,
кандидат техн. наук, доцент;
Д.Д. Колесников,
кандидат техн. наук;
Д.О. Медяников,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРЕВЫШЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫМИ ТАХЕОМЕТРАМИ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

Представлены результаты исследования влияния основных источников ошибок на точность тригонометрического нивелирования. Показаны пути по нейтрализации влияния вертикальной рефракции на результаты измерений превышений. Предложена принципиальная схема геодезических построений для передачи превышений через препятствия при производстве геодезических изысканий линейных объектов. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: нивелирование через препятствие, тригонометрическое нивелирование, коэффициент рефракции, вертикальный угол, превышение, высота.

ВВЕДЕНИЕ

Инженерно-геодезические изыскания, строительство и эксплуатация комплексов сложных инженерных сооружений, таких как космодром, аэродром, скоростные магистрали железных и автомобильных дорог, мостовые переходы и туннели, не обходятся без геометрического нивелирования.

Геометрическое нивелирование на равнинной местности с небольшими перепадами высот является наиболее эффективным по точности методом измерений превышений между пунктами опорной геодезической сети, создаваемой на объекте изысканий. При изысканиях линейных объектов большой протяженности линии нивелирования могут проходить по крутым склонам, пересекать овраги, болота и водные преграды. Эффективность геометрического нивелирования в этих особых условиях резко снижается. При выполнении нивелирования на крутых склонах существенно увеличивается число станций в секции хода, что вызывает накопление ошибок измерений. При прохождении линии нивелирования через овраги и болота приходится применять специальные методики нивелирования, которые требуют дополнительных приспособлений для производства измерений, а при пересечении водного препятствия – применять только оптические нивелиры, так как диапазон измерений цифровых нивелиров по штрих-кодовым рейкам ограничен.

Повысить эффективность нивелирования в особых условиях возможно путем применения тригонометрического метода измерения превышений. Однако в нормативной документации отсутствует научно обоснованная методика нивелирования в особых условиях с использованием современных электронных тахеометров. Целью опубликования статьи является теоретическое обоснование методики высокоточного тригонометрического нивелирования в особых условиях.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫСОКОТОЧНОГО ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

В тригонометрическом нивелировании превышение определяется по измеренным вертикальным углам и горизонтальному проложению между точками. При одностороннем тригонометрическом нивелировании превышение между точками *A* и *B* определяется по формуле

$$h_{AB} = d_{AB} \operatorname{tg} \alpha_{AB} + \frac{1 - k_{AB}}{2R} d_{AB}^2 + i_A - l_B, \quad (1)$$

где d_{AB} – горизонтальное проложение между точками A и B ;
 α_{AB} – вертикальный угол в точке A на точку B ;
 k_{AB} – коэффициент вертикальной рефракции в точке A по направлению AB ;
 R – средний радиус Земли;
 i_A – высота инструмента над точкой A ;
 l_B – высота визирной цели над точкой B .

Точность превышения при одностороннем тригонометрическом нивелировании в основном зависит от следующих погрешностей:

- коэффициента вертикальной рефракции, принятого для вычислений;
- измерения вертикального угла;
- измерения высоты прибора;
- измерения высоты визирной цели.

Влияние перечисленных погрешностей можно частично исключить, если для определения превышения создать геодезическое построение (рис. 1), в котором превышение между точками A и B определяется дважды:

$$\begin{aligned} h_{AB}^{(1)} &= d_{CB} \operatorname{tg} \alpha_{CB} + \frac{1 - k_{CB}}{2R} d_{CB}^2 - d_{CA} \operatorname{tg} \alpha_{CA} - \frac{1 - k_{CA}}{2R} d_{CA}^2 + l_A - l_B, \\ h_{AB}^{(2)} &= d_{DB} \operatorname{tg} \alpha_{DB} + \frac{1 - k_{DB}}{2R} d_{DB}^2 - d_{DA} \operatorname{tg} \alpha_{DA} - \frac{1 - k_{DA}}{2R} d_{DA}^2 + l_A - l_B. \end{aligned} \quad (2)$$

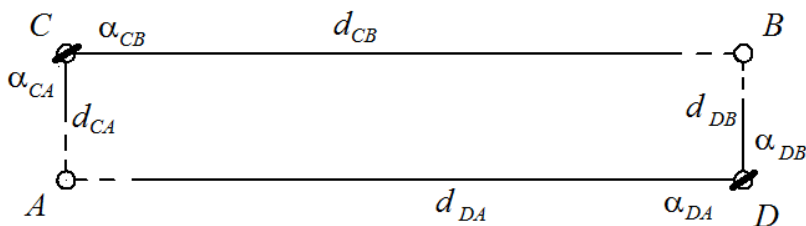


Рис. 1. Принципиальная схема тригонометрического нивелирования в особых условиях

Среднее превышение составит

$$\begin{aligned} \bar{h}_{AB} &= \frac{1}{2} (d_{CB} \operatorname{tg} \alpha_{CB} - d_{DA} \operatorname{tg} \alpha_{DA} + d_{DB} \operatorname{tg} \alpha_{DB} - d_{CA} \operatorname{tg} \alpha_{CA}) + \\ &+ \frac{1 - k_{CB}}{4R} d_{CB}^2 - \frac{1 - k_{DA}}{4R} d_{DA}^2 + \frac{1 - k_{DB}}{4R} d_{DB}^2 - \frac{1 - k_{CA}}{4R} d_{CA}^2 + l_A - l_B. \end{aligned} \quad (3)$$

Из анализа этой формулы становится понятным, что высота инструмента в данной схеме измерений не влияет на точность превышения между точками A и B .

Точные значения коэффициентов вертикальной рефракции неизвестны. Они зависят от многочисленных факторов, которые учесть невозможно. Поэтому коэффициенты рефракции остаются неопределенными. Такие коэффициенты могут изменяться в приземном слое атмосферы в течение суток от +4,28 до -4,40 [1, 2].

Определим, при каких условиях вертикальная рефракция не будет оказывать существенного влияния на точность \bar{h}_{AB} . Для этого примем:

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{d_{CB} + d_{DA}}{2}, & d_{CB} &= d_1 + \Delta_{d_1}, & d_{DA} &= d_1 - \Delta_{d_1}, \\ d_2 &= \frac{d_{DB} + d_{CA}}{2}, & d_{DB} &= d_2 + \Delta_{d_2}, & d_{CA} &= d_2 - \Delta_{d_2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где Δ_{d_1} – отклонение d_{CB} и d_{DA} от среднего значения d_1 ;

Δ_{d_2} – отклонение d_{CA} и d_{DB} от среднего значения d_2 .

Тогда, пренебрегая величинами второго порядка малости, формулу (3) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \bar{h}_{AB} = & \frac{1}{2}(d_{CB}\text{tg}\alpha_{CB} - d_{DA}\text{tg}\alpha_{DA} + d_{DB}\text{tg}\alpha_{DB} - d_{CA}\text{tg}\alpha_{CA}) + \\ & + \frac{k_{DB} - k_{CB}}{4R}d_1^2 + \frac{2 - k_{CB} - k_{DA}}{4R}2d_1\Delta_{d_1} + \frac{k_{CA} - k_{DB}}{4R}d_2^2 + \frac{2 - k_{DB} - k_{CA}}{4R}2d_2\Delta_{d_2} + \\ & + l_A - l_B. \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая справедливость гипотезы о равенстве на момент наблюдения коэффициентов рефракции на пункте по любым направлениям, для условия $\Delta_{d_1} = \Delta_{d_2} = \Delta_d$, и пренебрегая изменением коэффициентов рефракции в течение наблюдений, с точностью до величин второго порядка малости можно получить

$$\begin{aligned} \bar{h}_{AB} = & \frac{1}{2}(d_{CB}\text{tg}\alpha_{CB} - d_{DA}\text{tg}\alpha_{DA} + d_{DB}\text{tg}\alpha_{DB} - d_{CA}\text{tg}\alpha_{CA}) + l_A - l_B + \\ & + \frac{k_D - k_C}{4R}(d_1^2 - d_2^2) + \frac{1 - k}{R}(d_1 + d_2)\Delta_d. \end{aligned} \quad (6)$$

Предпоследнее слагаемое в формуле (6) обозначим через $\Delta_{\bar{h}_{AB}}^{\text{реф}}$. Оно отражает влияние рефракции на среднее превышение

$$\Delta_{\bar{h}_{AB}}^{\text{реф}} = \frac{k_D - k_C}{4R}(d_1^2 - d_2^2). \quad (7)$$

Анализ формулы (7) показывает, что если схема геодезического построения для определения превышения близка к ромбу ($d_1 \approx d_2$), то вертикальная рефракция не влияет на точность превышения и измерения на пунктах D и C могут выполняться в разное время.

Если $d_1 \gg d_2$, то необходимо организовать измерения на пунктах C и D таким образом, чтобы $k_D - k_C = 0$.

При выполнении двухсторонних синхронных наблюдений визирные лучи в прямом и обратном направлениях совпадают. Поэтому в благоприятных условиях, когда коэффициент рефракции наиболее устойчив, следует ожидать равенства значений коэффициентов k_D и k_C . Благоприятным временем измерений в течение дня считаются периоды с отчетливыми изображениями – в пасмурную погоду с легким ветром, исключая утренние и вечерние часы.

Последнее слагаемое в формуле (6) отражает влияние геометрического фактора – отклонения формы геодезического построения от параллелограмма:

$$\Delta_{\bar{h}_{AB}}^{\Gamma} = \frac{1 - k}{R}(d_1 + d_2)\Delta_d. \quad (8)$$

Влияние геометрического фактора исключается, если инструментально выполнять вынос на местности точек стояния приборов. Для $d_1 + d_2 = 1$ км, $\Delta_d = 0,1$ м при граничных значениях коэффициента рефракции $-4,4 < k < +4,8$ будем иметь $-0,08 < \Delta_{\bar{h}_{AB}}^{\Gamma} < +0,06$ мм.

Таким образом, при выполнении в благоприятных условиях синхронных наблюдений на пунктах геодезического построения с правильной геометрией сети вертикальная рефракция не влияет на превышение между точками A и B :

$$\bar{h}_{AB} = \frac{1}{2}(d_{CB}\text{tg}\alpha_{CB} - d_{DA}\text{tg}\alpha_{DA} + d_{DB}\text{tg}\alpha_{DB} - d_{CA}\text{tg}\alpha_{CA}) + l_A - l_B. \quad (9)$$

Выясним для различных классов нивелирования, с какой точностью необходимо измерять высоты визирных целей и вертикальные углы.

Критерием точности превышения \bar{h}_{AB} является средняя квадратическая ошибка, которая отражает совместное воздействие на оцениваемую величину случайных и остаточных систематических ошибок измерений:

$$m_{\bar{h}_{AB}} = \sqrt{m_{\Delta_{\bar{h}_{AB}}}^2 + m_{\delta_{\bar{h}_{AB}}}^2}, \quad (10)$$

где $m_{\Delta_{\bar{h}_{AB}}}$ – средняя квадратическая случайная ошибка превышения;

$m_{\delta_{\bar{h}_{AB}}}$ – средняя квадратическая остаточная систематическая ошибка превышения.

Величина $m_{\delta_{\bar{h}_{AB}}}^2$ обусловлена погрешностями измерений высот визирных целей, остаточным влиянием рефракции и геометрией сети.

При выполнении нескольких серий синхронных наблюдений в геодезическом построении с правильной геометрией сети остаточные систематические ошибки, вызванные вертикальной рефракцией, являются малыми величинами и в среднем превышении из k -серий измерений будут дополнительно компенсироваться, так как в разных сериях разности $k_D - k_C$ могут незначительно отличаться от нуля, варьироваться и приобретать свойства централированных случайных величин.

Основным источником остаточных систематических ошибок выступают погрешности измерений высот визирных целей.

Высоты визирных целей должны быть получены с такой точностью, чтобы их ошибки не оказывали существенного влияния на точность превышения \bar{h}_{AB} . Если $m_l < 0,25m_{\bar{h}_{AB}}$, то при оценке точности влиянием ошибок высот визирных целей можно пренебречь.

Высота визирной цели определяется тригонометрическим методом по результатам измерений горизонтального проложения d и вертикальных углов α_P, α_V на центр пункта и визирную цель. Установим точность измерений вертикальных углов и горизонтальных проложений для определения высот визирных целей с пренебрегаемой погрешностью.

Высота визирной цели вычисляется по формуле

$$l = d(\operatorname{tg}\alpha_V - \operatorname{tg}\alpha_P). \quad (11)$$

Средняя квадратическая ошибка высоты визирной цели при $\alpha_V \cong 0$

$$m_l^2 = \frac{d^2(1 + \operatorname{tg}^2\alpha_P)^2}{\rho^2} m_\alpha^2 + \operatorname{tg}^2\alpha_P m_d^2. \quad (12)$$

На основании принципа равного влияния получим:

$$m_\alpha = \frac{m_l \rho}{d\sqrt{2}\sqrt{2 + \operatorname{tg}^2\alpha_P}} \cong \frac{m_l \rho}{\sqrt{2}d}, \quad (13)$$

$$m_d = \frac{m_l}{\sqrt{2}\operatorname{tg}\alpha_P} = \frac{m_l d}{\sqrt{2}l}.$$

Для расчета числа приемов измерений с целью определения высоты визирной цели можно воспользоваться формулами:

$$n_\alpha \geq \frac{m_{\Delta_\alpha}^2}{2\varepsilon m_\alpha^2},$$

$$n_d \geq \frac{m_{\Delta_d}^2}{2\varepsilon m_d^2}. \quad (14)$$

Значения m_{Δ_α} и m_{Δ_d} указываются в паспорте прибора на основании метрологических исследований, а ε – малая величина, отражающая степень риска. Обычно $\varepsilon = 0,05 - 0,1$.

Для надежности высоты визирных целей должны определяться дважды с разных установок прибора до и после основных измерений числом приемов, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Требования к точности измерений и числу приемов

Класс нивелирования	Ср. кв. ошибка нивелирования, мм/км	m_l , мм	m_α^* , (")	m_d^* , мм	Точность измерения вертикального угла одним приемом (") m_{Δ_α}	Точность измерения горизонтального проложения одним приемом (мм) m_{Δ_d}	Минимальное число приемов измерений α n_α ($\varepsilon = 0,05$)	Минимальное число приемов измерений d n_d ($\varepsilon = 0,05$)
I	0,8	0,2	3	0,8	1	1	3	16
II	2,0	0,4	6	1,7	1	1	1	4
III	5,0	1,0	15	4,2	1, 2, 5	1, 2, 3	1, 1, 3	1, 3, 5
IV	10	2,0	30	8,4	1, 2, 5	1, 2, 3	1, 1, 1	1, 1, 2

*В табл. 1 средние квадратические ошибки m_α и m_d вычислены для значений $l = 1,7$ м, $d = 10$ м.

С вероятностью 0,95 расхождение измеренных значений в приемах и разность высот визирных целей, определяемых в начале и конце тригонометрического нивелирования, должны быть в пределах:

$$\begin{aligned}(\Delta_\alpha)_{\text{доп}} &= 2,0\sqrt{2}m_{\Delta_\alpha}, \\(\Delta_d)_{\text{доп}} &= 2,0\sqrt{2}m_{\Delta_d}, \\(\Delta_l)_{\text{доп}} &= 2,0\sqrt{2}m_l\end{aligned}\quad (15)$$

В табл. 1 приведены требования к точности измерений и числу приемов при определении высот визирных целей для разных классов нивелирования.

При соблюдении требований табл. 1 и допусков на размах варьирования результатов измерений, вычисленных по формулам (15), ошибки высот визирных целей будут малыми величинами и не окажут влияния на точность превышения между пунктами A и B .

Величина $m_{\Delta_{\bar{h}_{AB}}}$ в основном зависит от случайных погрешностей измерений вертикальных углов и, при наблюдении визирных целей вблизи плоскости горизонта, практически не зависит от ошибок измерений расстояний:

$$m_{\Delta_{\bar{h}_{AB}}} = \frac{d_{AB}}{\rho\sqrt{2}} m_{\Delta_\alpha}. \quad (16)$$

При определении превышения \bar{h}_{AB} сериями средняя квадратическая случайная погрешность измерения вертикальных углов определяется по формуле

$$m_{\Delta_\alpha} = \frac{\rho\sqrt{2k}}{d_{AB}} m_{\Delta_{\bar{h}_{AB}}}, \quad (17)$$

где k – число серий.

В табл. 2 приведены требования к точности измерений вертикальных углов при передаче превышений тригонометрическим методом через препятствие шириной 1 км в нивелирных ходах I–IV классов.

Таблица 2

Требования к измерениям вертикальных углов

Класс нивелирования	Ср. кв. ошибка нивелирования, мм/км $m_{\Delta\bar{h}_{AB}}$	Число серий наблюдений k	m_{α} (")	Расхождение превышений в сериях, мм $(\Delta\bar{h}_{AB})_{\text{доп}}^*$	Точность измерения вертикального угла одним приемом (") $m_{\Delta\alpha}$	Минимальное число приемов измерений α n_{α} ($\varepsilon = 0,1$)
I	0,8	12	0,8	7,8	1	8
II	2,0	6	1,4	13,9	1	3
III	5,0	2	2,0	20,0	1, 2	1, 4
IV	10	2	4,0	40,0	1, 2	1, 2

*Расхождения превышений в сериях вычислены по формуле $(\Delta\bar{h}_{AB})_{\text{доп}} = 2,0\sqrt{2km_{\Delta\bar{h}_{AB}}}$.

Расхождение измеренных значений вертикальных углов в приемах с вероятностью 0,95 должно быть в пределах

$$(\Delta\alpha)_{\text{доп}} = 2,0\sqrt{2}m_{\Delta\alpha}. \quad (18)$$

Аналогично можно определить требования к измерениям при выполнении с требуемой точностью тригонометрического нивелирования через препятствие любой ширины.

Тригонометрическое нивелирование через препятствие по предлагаемой методике выполняется в определенной последовательности.

1. Расчет необходимой точности измерений, числа приемов и допусков.
2. Выбор линии нивелирования и ее закрепление на местности.
3. Инструментальное определение на местности точек стояния приборов.
4. Измерение высот визирных целей.
5. Выполнение серий синхронных измерений вертикальных углов и расстояний по симметричным сторонам сети с изменением высот приборов между сериями.
6. Повторное измерение высот визирных целей.
7. Математическая обработка измерений и оценка точности.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Основные положения рассмотренной методики были разработаны авторами и апробированы сотрудниками ООО «НПП "БЕНТА"» совместно с сотрудниками кафедры высшей геодезии Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского при выполнении в 2008 году гидротехнического нивелирования I разряда между фундаментальными реперами, расположенными на о. Котлин и на промплощадке п. Бронка. Линия нивелирования пролегла по дамбе КЗС Санкт-Петербурга от наводнений и пересекала проран шириной 780 м. Превышение через проран измерялось по приведенной выше методике. Всего было выполнено 9 серий измерений. Результаты измерений и оценка точности приведены в табл. 3.

Средняя квадратическая ошибка превышения в серии наблюдений, вычисленная по разностям двойных измерений, составила 1,93 мм, по отклонениям от общего среднего – 2,25 мм.

Средняя квадратическая ошибка определения превышения по результатам всех серий наблюдений составила 0,75 мм.

Выводы. В результате нивелирования отметки фундаментальных реперов были получены в едином высотном пространстве. Повторное нивелирование I разряда по телу дамб, после засыпки прорана, подтвердило в пределах допуска ранее полученные отметки фундамен-

тальных реперов и, как следствие, правильность предложенной методики нивелирования через водное препятствие.

Таблица 3

Результаты измерений превышения через проран

№ серии измерений	Измерение с точек	Превышение между пунктами D198→S101, мм	Разность превышений в серии, мм	Среднее значение превышения в серии, мм	Отклонение от общего среднего, мм
1	C	2963,33	2,19	2964,425	-1,48
	D	2965,52			
2	C	2965,50	3,01	2967,005	1,10
	D	2968,51			
3	C	2965,03	-4,93	2962,565	-3,34
	D	2960,10			
4	C	2966,90	3,95	2968,875	2,97
	D	2970,85			
5	C	2966,80	1,00	2967,3	1,39
	D	2967,80			
6	C	2963,84	-1,46	2963,11	-2,80
	D	2962,38			
7	C	2966,09	-2,56	2964,81	-1,10
	D	2963,53			
8	C	2968,09	0,22	2968,2	2,29
	D	2968,31			
9	C	2965,91	1,95	2966,885	0,98
	D	2967,86			
Среднее			0,38	2965,91	0,00

В настоящее время ООО «НПП "БЕНТА"» с успехом использует данную методику при выполнении инженерных изысканий линейных объектов и наблюдений за деформациями сооружений КЗС Санкт-Петербурга от наводнений и других объектов мониторинга.

Список используемых источников

1. Дрок М.К. К вопросу о поправке в превышения за совместное влияние кривизны Земли и вертикальной рефракции при геодезическом нивелировании на малые расстояния // Научные записки ЛПИ. – 1962. – № 7. – С. 3–30.

2. Дрок М.К. Исследование точности определения превышений в ходах геодезического нивелирования на короткие расстояния в равнинной местности // Научные записки ЛПИ. – 1961. – № 6. – С.183–199.

А.В. Астапович,
кандидат техн. наук, доцент;
А.В. Суворов;
И.В. Чернов,
кандидат техн. наук

МОДЕЛЬ КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НАЗЕМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ, ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлены результаты построения моделей коррекции данных инерциальных навигационных систем наземных подвижных объектов на основе использования гироскопических, линейных и угловых измерений. Обоснованы с позиции принципа наименьших квадратов алгоритмы рекуррентного метода и фильтра Калмана для совместной обработки данных ИНС и результатов дополнительных измерений с целью исключения систематического влияния на положение НПО. Приведены результаты моделирования и обработки данных по предлагаемому алгоритмам.

Ключевые слова: навигация наземных подвижных объектов, инерциальная навигационная система, коррекция данных ИНС, гироскопические, линейные и угловые измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Инерциальные навигационные системы (ИНС) предназначены для автономного определения местоположения подвижных объектов при необходимости соблюдения абсолютной помехозащищенности.

Для повышения точности навигации наземных подвижных объектов (НПО) в точках поворота маршрута выполняется корректировка начальных установок навигационной системы, которая осуществляется по геодезическим данным, полученным в результате заблаговременной подготовки маршрута.

Необходимость заблаговременной подготовки маршрута перемещения НПО является существенным недостатком использования ИНС, так как ограничивается свобода маневра НПО.

Для повышения эффективности использования ИНС при условии неограниченного маневра на неподготовленных в геодезическом отношении территориях предлагается корректировку начальных установок выполнять с использованием результатов гироскопических, линейных и угловых измерений в точках коррекции.

Целью данной статьи является теоретическое обоснование модели коррекции данных ИНС НПО на основе использования гироскопических определений, линейных и угловых измерений.

ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ ИНС НПО

Идея определения данных ИНС НПО заключается в интегрировании основного уравнения инерциальной навигации

$$\vec{a} = \vec{w} - \vec{g}, \quad (1)$$

где \vec{a} – ускорение, измеряемое акселерометром;

\vec{w} – абсолютное ускорение;

\vec{g} – гравитационное ускорение.

Для интегрирования векторного уравнения (1) переходят к трем скалярным уравнениям, которые получают проецированием векторного уравнения на оси измерительной системы координат, в которой ориентировка осей в каждой точке маршрута обеспечивается гиристабилизированной платформой (ГСП) или БИНС – бесплатформенными инерциальными навигационными системами. Оси координат в измерительной системе ИНС располагаются в плоскости геодезического горизонта. При этом одна из осей направлена на север, вторая – дополняет правую декартовую систему координат. Дважды интегрируя по времени измеренные ускорения движения вдоль осей измерительной системы, вычисляются приращения координат НПО, которые ортогональными преобразованиями трансформируются в топоцентрическую горизонтную систему координат начала интервала интегрирования. По топоцентрическим координатам X'_i , Y'_i и Z'_i вычисляются ΔB_i , ΔL_i и ΔH_i перемещения НПО по участку маршрута движения

$$\Delta B_i = \frac{X'_i}{(M + H)_i}, \Delta L_i = \frac{Y'_i}{(M + H)_i \cos B_i}, \Delta H_i = Z'_i, \quad (2)$$

где ΔB_i , ΔL_i и ΔH_i – приращения геодезических координат;

M и N – радиусы кривизны меридиана и первого вертикалов;

H – геодезическая высота.

Положение ИНС НПО в геодезической системе координат определяют суммированием:

$$B = B_0 + \sum_{i=1}^n \Delta B_i, L = L_0 + \sum_{i=1}^n \Delta L_i, H = H_0 + \sum_{i=1}^n \Delta H_i, \quad (3)$$

где B_0, L_0, H_0 – геодезические координаты начального пункта маршрута.

Геодезические координаты B и L по формулам картографических проекций могут быть трансформированы в требуемую потребителем систему координат на плоскости.

Основные источники ошибок инерциальных навигационных систем рассмотрены в работах [1, 2]. Общая особенность ошибок ИНС состоит в том, что погрешности определения положения НПО имеют тенденцию к возрастанию в зависимости от времени непрерывной работы ИНС при перемещении по маршруту. При этом между небольшими промежутками времени прослеживается линейная зависимость, которую используют для коррекции данных ИНС. Для коррекции данных ИНС применяется метод кратковременных остановок НПО в произвольных точках маршрута. На остановках скорость, воспроизводимая в вычислителе по показаниям акселерометров, по осям координат измерительной системы фактически отличается от нуля, т. е. фиксируются истинные погрешности составляющих скорости движения.

В точках кратковременных остановок по данным акселерометров определяются необходимые данные для расчета корректирующих поправок к текущим координатам и высотам точек.

Метод кратковременных остановок для коррекции данных ИНС позволяет ослабить влияние ошибок проекций путевой скорости на положение НПО. Однако полностью исключить данные ошибки невозможно. Следует ожидать, что остаточные ошибки в приращениях координат вследствие свободного функционирования акселерометров будут независимыми друг от друга величинами, но коррелированными с числом остановок в маршруте. Кроме того, в данных ИНС будут присутствовать погрешности начальной выставки – погрешности углового положения бортовой измерительной системы координат по отношению к топоцентрической горизонтной системе координат в период подготовки ИНС к запуску.

Таким образом, приращения координат НПО получают в результате двойного интегрирования данных акселерометров, оси чувствительности которых образуют бортовую измерительную прямоугольную систему координат. Погрешности приращений геодезических координат, обусловленные остаточными ошибками акселерометров и погрешностями ориентирования бортовой измерительной системы координат, представляют собой следующие величины:

$$\begin{aligned}\delta_{\Delta B} &= \sum_{i=1}^n \frac{(\delta_{x'})_i}{(M+H)_i} \cos(\delta_{\beta_0})_i \cos(\delta_{A_0})_i; \\ \delta_{\Delta L} &= \sum_{i=1}^n \frac{(\delta_{y'})_i}{(M+H)_i \cos B_i} \cos(\delta_{\beta_0})_i \cos(\delta_{A_0})_i; \\ \delta_{\Delta H} &= \sum_{i=1}^n (\delta_{z'})_i \cos(\delta_{\beta_0})_i,\end{aligned}\quad (4)$$

где $(\delta_{x'})_i, (\delta_{y'})_i, (\delta_{z'})_i$ – остаточные погрешности в топоцентрической горизонтной системе координат результатов интегрирования данных акселерометров после коррекции методом кратковременных остановок;

$(\delta_{\beta_0})_i$ – погрешность удержания горизонта ИНС в плоскости геодезического горизонта;

$(\delta_{A_0})_i$ – погрешность ориентирования осей измерительной системы в топоцентрической горизонтной системе координат.

Пренебрегая погрешностями второго порядка малости, можно принять:

$$\begin{aligned}\delta_{\Delta B} &= \frac{1}{(M+H)_{\text{ср.}}} \sum_{i=1}^n (\delta_{x'})_i; \\ \delta_{\Delta L} &= \frac{1}{(M+H)_{\text{ср.}} \cos B_{\text{ср.}}} \sum_{i=1}^n (\delta_{y'})_i; \\ \delta_{\Delta H} &= \sum_{i=1}^n (\delta_{z'})_i.\end{aligned}\quad (5)$$

Если предположить, что погрешностиотягощены систематическим влиянием, то при наличии на отдельных участках маршрута НПО независимых определений $\delta_{\Delta B}, \delta_{\Delta L}, \delta_{\Delta H}$ (например, по гироскопическим, линейным и угловым измерениям) представляется возможным оценить параметры принятой модели систематического влияния на погрешности определения положения НПО.

Принципиальная схема определения положения НПО с коррекцией данных ИНС на основе использования гироскопических, линейных и угловых измерений представлена на рис. 1.

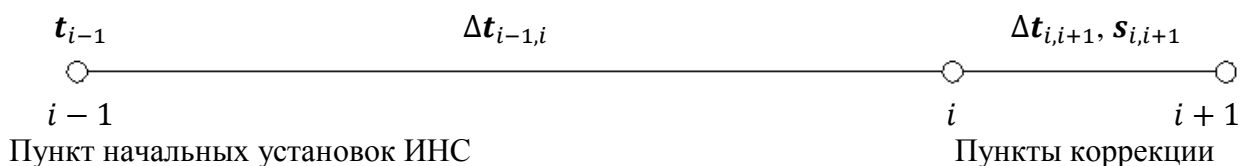


Рис. 1. Принципиальная схема определения положения НПО

На рис. 1 представлена динамическая система, в которой вектор t_{i-1} определяет положение НПО в той или иной системе координат, а $\Delta t_{i-1,i}, \Delta t_{i,i+1}$, – приращения координат в выбранной системе отсчета, полученные в результате интегрирования данных ИНС; $s_{i,i+1}$ – вектор дополнительно измеренных величин.

Для простоты изложения метода коррекции данных ИНС будем использовать прямоугольную систему координат на плоскости, в которой

$$t_{i-1} = (x, y, H)_{i-1}; \Delta t_{i-1,i} = (\Delta x, \Delta y, h)_{i-1,i}; \Delta t_{i,i+1} = (\Delta x, \Delta y, h)_{i,i+1}; s_{i,i+1} = (a, d, z)_{i,i+1}.$$

Если на маршруте перемещения НПО на отдельных участках последовательно выполнять гироскопические, линейные и угловые измерения, то схема определения положения НПО по всему маршруту образует цепочку звеньев, представленных на рис. 1. При этом последний пункт звена будет являться пунктом начальных установок ИНС для следующего шага коррекции. Можно полагать, что совокупность остаточных систематических ошибок измерений в текущем звене цепи не зависит от остаточных систематических ошибок измерений в предыдущих звеньях.

В схеме геодезического построения (рис. 1) три величины измеряются избыточно. Следовательно, можно определить не более трех параметров модели систематических ошибок в приращениях координат $(\Delta x, \Delta y, \Delta h)$.

Рассмотрим наиболее простые и, на наш взгляд, наиболее правдоподобные три типа моделей систематического влияния на суммарную погрешность определения положения ИНС НПО.

Для обоснования математических моделей систематических ошибок в полученных ИНС приращениях координат будем исходить из известного в теории ошибок положения, что любое измерение, как бы тщательно оно не выполнялось, не свободно от погрешности, которая содержит как случайную, так и систематическую составляющую.

Тип 1. Систематические ошибки приращений координат от начального пункта до пункта коррекции обусловлены одним общим фактором, который, например, зависит от времени работы ИНС или от длины маршрута. В такой модели систематическая ошибка будет пропорциональна приращению координат:

$$\begin{aligned} \delta_{\Delta x} &= \Delta x \nu; \\ \delta_{\Delta y} &= \Delta y \nu; \\ \delta_h &= h \nu, \end{aligned}$$

где ν – параметр систематических ошибок (относительная систематическая погрешность).

Тип 2. Систематические ошибки определения планового положения НПО и систематические ошибки определения высотного положения зависят от разных факторов, например, дрейфа гироскопа и ошибки акселерометра высотного канала. Математическая модель систематических ошибок данного типа будет иметь три параметра:

$$\begin{aligned} \delta_{\Delta x} &= \Delta x \nu_1; \\ \delta_{\Delta y} &= \Delta y \nu_1; \\ \delta_h &= h \nu_2. \end{aligned}$$

Тип 3. Если принять, что метод кратковременных остановок ИНС на текущем шаге коррекции позволяет оценивать положение НПО в произвольных точках маршрута с постоянными остаточными систематическими ошибками по каждой из осей координат, то математическая модель принимает вид

$$\delta_{\Delta x} = nv;$$

$$\delta_{\Delta y} = nv_2;$$

$$\delta_h = nv_3,$$

где n – число кратковременных остановок для коррекции маршрута.

В общем случае параметрическая модель измеренных величин на текущем шаге коррекции в матричной форме может быть представлена в виде

$$L = Av + B\tau + C\lambda + I\Delta \quad (6)$$

где Av – параметрическая модель влияния остаточных систематических ошибок интегрирования данных ИНС;

$B\tau$ – параметрическая модель влияния ошибок предварительных координат положения НПО в точках коррекции;

$C\lambda$ – параметрическая модель влияния ошибок координат начального пункта для текущего шага коррекции;

$I\Delta$ – параметрическая модель влияния случайных ошибок измерений.

В модели (6) для маршрута перемещения НПО от пункта $i-1$ до пункта $i+1$ матрицы коэффициентов равны:

$$A = \begin{matrix} \text{Тип 1} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta x_{i-1,i} \\ \Delta y_{i-1,i} \\ h_{i-1,i} \\ \Delta x_{i,i+1} \\ \Delta y_{i,i+1} \\ h_{i,i+1} \end{bmatrix} ; \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Тип 2} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \Delta x_{i-1,i} & 0 \\ \Delta y_{i-1,i} & 0 \\ 0 & h_{i-1,i} \\ \Delta x_{i,i+1} & 0 \\ \Delta y_{i,i+1} & 0 \\ 0 & h_{i,i+1} \end{bmatrix} ; \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Тип 3} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \Delta x_{i-1,i} & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y_{i-1,i} & 0 \\ 0 & 0 & h_{i-1,i} \\ \Delta x_{i,i+1} & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y_{i,i+1} & 0 \\ 0 & 0 & h_{i,i+1} \end{bmatrix} ; \end{matrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial a_{i,i+1}}{\partial x_i} & \frac{\partial a_{i,i+1}}{\partial y_i} & 0 & \frac{\partial a_{i,i+1}}{\partial x_{i+1}} & \frac{\partial a_{i,i+1}}{\partial y_{i+1}} & 0 \\ \frac{\partial d_{i,i+1}}{\partial x_i} & \frac{\partial d_{i,i+1}}{\partial y_i} & 0 & \frac{\partial d_{i,i+1}}{\partial x_{i+1}} & \frac{\partial d_{i,i+1}}{\partial y_{i+1}} & 0 \\ \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial x_i} & \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial y_i} & \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial H_i} & \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial x_{i+1}} & \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial y_{i+1}} & \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial H_{i+1}} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ;$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{i,i+1}}{\partial x_i} &= \frac{3438 \sin a_{i,i+1}}{d_{i,i+1}}; \quad \frac{\partial a_{i,i+1}}{\partial y_i} = -\frac{3438 \cos a_{i,i+1}}{d_{i,i+1}}; \quad \frac{\partial a_{i,i+1}}{\partial x_{i+1}} = -\frac{3438 \sin a_{i,i+1}}{d_{i,i+1}}; \quad \frac{\partial a_{i,i+1}}{\partial y_{i+1}} = \frac{3438 \cos a_{i,i+1}}{d_{i,i+1}}; \\ \frac{\partial d_{i,i+1}}{\partial x_i} &= -\cos a_{i,i+1}; \quad \frac{\partial d_{i,i+1}}{\partial y_i} = -\sin a_{i,i+1}; \quad \frac{\partial d_{i,i+1}}{\partial x_{i+1}} = \cos a_{i,i+1}; \quad \frac{\partial d_{i,i+1}}{\partial y_{i+1}} = \sin a_{i,i+1}; \\ \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial x_i} &= \frac{3438 \cos a_{i,i+1} \cos z_{a_{i,i+1}}}{d_{i,i+1}}; \quad \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial y_{i+1}} = -\frac{3438 \sin a_{i,i+1} \cos z_{a_{i,i+1}}}{d_{i,i+1}}; \quad \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial H_{i+1}} = -\frac{3438 \sin z_{a_{i,i+1}}}{d_{i,i+1}}; \\ \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial x_{i+1}} &= -\frac{3438 \cos a_{i,i+1} \cos z_{a_{i,i+1}}}{d_{i,i+1}}; \quad \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial y_{i+1}} = -\frac{3438 \sin a_{i,i+1} \cos z_{a_{i,i+1}}}{d_{i,i+1}}; \quad \frac{\partial z_{i,i+1}}{\partial H_{i+1}} = \frac{3438 \sin z_{a_{i,i+1}}}{d_{i,i+1}}. \end{aligned}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$I = \{1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1\}$ – единичная матрица.

Рассмотрим задачу решения уравнения (6) относительно ν, τ, λ и Δ . Обозначим

$$\zeta = \begin{bmatrix} \nu \\ \tau \\ \lambda \\ \Delta \end{bmatrix}, R = [A, B, C, I]. \quad (7)$$

Тогда искомые величины ν, τ, λ и Δ должны быть получены из решения уравнения

$$R\zeta = I. \quad (8)$$

Решение формально можно записать в виде

$$\zeta = R^{-1}I, \quad (9)$$

но оно заведомо не единственное. В решении (9) R^{-1} означает обобщенное обращение прямоугольной матрицы R .

Стандартным методом решения уравнений (8) является метод наименьших квадратов, который состоит в минимизации квадратичной нормы вектора ζ . Тогда

$$\|\zeta\|^2 = \min. \quad (10)$$

Составляющие вектора ζ являются независимыми друг от друга величинами. Поэтому норма вектора ζ будет следующей:

$$\|\zeta\|^2 = \|v\|^2 + \|\tau\|^2 + \|\lambda\|^2 + \|\Delta\|^2 \quad (11)$$

Квадратичные нормы векторов v, τ, λ и Δ в евклидовом пространстве можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \|v\|^2 &= v^T P_{vv} v; \\ \|\tau\|^2 &= \tau^T P_{\tau\tau} \tau; \\ \|\lambda\|^2 &= \lambda^T P_{\lambda\lambda} \lambda; \\ \|\Delta\|^2 &= \Delta^T P_{\Delta\Delta} \Delta. \end{aligned} \quad (12)$$

Матрицы $P_{vv}, P_{\tau\tau}, P_{\lambda\lambda}, P_{\Delta\Delta}$ дают ограничения на вариации векторов v, τ, λ и Δ . В качестве таких матриц естественно взять обратные ковариационные матрицы. Следовательно,

$$\begin{aligned} \|v\|^2 &= v^T K_{vv}^{-1} v; \\ \|\tau\|^2 &= \tau^T P_{\tau\tau} \tau; \\ \|\lambda\|^2 &= \lambda^T K_{\lambda\lambda}^{-1} \lambda; \\ \|\Delta\|^2 &= \Delta^T K_{\Delta\Delta}^{-1} \Delta. \end{aligned} \quad (13)$$

Если дисперсии случайных величин v, τ, λ и Δ малы, то эти величины могут варьироваться только в узких пределах. Для больших дисперсий возможны большие вариации. Если часть векторов допускается без ограничений, то элементы этих векторов имеют бесконечную дисперсию, или нулевой вес.

При решении уравнений (6) будем полагать, что векторы v, τ не имеют ограничений на вариации. Объединим их в составной вектор

$$\eta = \begin{bmatrix} v \\ \tau \end{bmatrix} \quad (14)$$

и введем блочную матрицу $D = [A \ B]$ для коэффициентов при неизвестных η . Тогда уравнения (6) можно представить в виде

$$l = D\eta + C\lambda + I\Delta \Rightarrow l = D\eta + \theta. \quad (15)$$

Данное уравнение решим при условии (10), которое с учетом выражений (11), (13) и (14) принимает вид

$$\theta^T K_{\theta\theta}^{-1} \theta = \Delta^T K_{\Delta\Delta}^{-1} \Delta + \lambda^T K_{\lambda\lambda}^{-1} \lambda = \min. \quad (16)$$

Решение уравнений (15) при условии (16) выполним методом Лагранжа. Для этого продифференцируем функцию Лагранжа

$$\Phi_{\eta} = \Delta^T K_{\Delta\Delta}^{-1} \Delta + \lambda^T K_{\lambda\lambda}^{-1} \lambda - 2k^T (D\eta + C\lambda + I\Delta - l) \quad (17)$$

по переменным, Δ, λ, k, η и частные производные приравняем нулю.

После несложных преобразований получим решение:

$$\begin{aligned} \hat{\eta} &= (D^T K_u^{-1} D)^{-1} D^T K_u^{-1} l = Gl; \\ \hat{\Delta} &= K_{\Delta\Delta} I^T K_u^{-1} P_D l = K_{\Delta\Delta} K_u^{-1} P_D l = Sl; \\ \hat{\lambda} &= K_{\lambda\lambda} C^T K_u^{-1} P_D l = K_{\lambda\lambda} K_u^{-1} P_D l = Hl, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} K_u &= K_{\theta\theta} = IK_{\Delta\Delta}I^T + CK_{\lambda\lambda}C^T; \\ P_D &= E - D(D^TK_u^{-1}D)^{-1}D^TK_u^{-1}, \end{aligned}$$

а E – единичная матрица.

Заметим, что матрица P_D является идемпотентной матрицей. Она исключает систематическую часть $D\eta$ в векторе данных l , т. е. центрирует его.

На первом шаге коррекции $K_u = IK_{\Delta\Delta}I^T$, так как координаты начального пункта принимаются безошибочными величинами, для которых $K_{\lambda\lambda}$ – нулевая матрица.

Для оценки точности $\hat{\eta}, \hat{\Delta}, \hat{\lambda}$ получим выражения для ковариационных матриц их ошибок.

Истинные ошибки оценок определяются как разности оцененного и истинного значений. Следовательно, истинными ошибками оценок $\hat{\eta}$, согласно (18) и (15), будут

$$e_{\hat{\eta}} = \hat{\eta} - \eta = Gl - \eta = G(D\eta + \theta) - \eta = G\theta, \quad (19)$$

поскольку

$$GD = E.$$

Аналогично получим выражения для истинных ошибок векторов $\hat{\Delta}, \hat{\lambda}$:

$$\begin{aligned} e_{\hat{\Delta}} &= \hat{\Delta} - \Delta = Sl - \Delta = S(D\eta + \theta) - \Delta = S\theta - \Delta; \\ e_{\hat{\lambda}} &= \hat{\lambda} - \lambda = Hl - \lambda = H(D\eta + \theta) - \lambda = H\theta - \lambda, \end{aligned} \quad (20)$$

так как

$$\begin{aligned} ND &= K_M K_u^{-1} P_D = 0; \\ HD &= K_M K_u^{-1} P_D D = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Точность вектора $\hat{\eta}$ оценивается по ковариационной матрице

$$K_{\hat{\eta}\hat{\eta}} = M(e_{\hat{\eta}} e_{\hat{\eta}}^T) = GK_u G^T = (D^T K_u^{-1} D)^{-1}. \quad (22)$$

Аналогично получим ковариационные матрицы для ошибок векторов $\hat{\Delta}, \hat{\lambda}$:

$$\begin{aligned} K_{\hat{\Delta}\hat{\Delta}} &= M(e_{\hat{\Delta}} e_{\hat{\Delta}}^T) = M\{(S\theta - \Delta)(S\theta - \Delta)^T\} = K_{\Delta\Delta} - K_M K_u^{-1} P_D K_{\Delta\Delta}; \\ K_{\hat{\lambda}\hat{\lambda}} &= M(e_{\hat{\lambda}} e_{\hat{\lambda}}^T) = M\{H\theta - \lambda)(H\theta - \lambda)^T\} = K_{\lambda\lambda} - K_M K_u^{-1} P_D K_{\lambda\lambda}. \end{aligned} \quad (23)$$

При решении навигационной задачи особый интерес представляет вектор \hat{t} , так как по нему осуществляется коррекция текущего положения НПО. Кроме того, полученные координаты последнего пункта звена маршрута принимаются начальными данными для следующего шага коррекции. Поскольку вектор \hat{t} является составным элементом вектора $\hat{\eta}$, то для оценки точности положения НПО из матрицы $K_{\hat{\eta}\hat{\eta}}$ выделяется блок $K_{\hat{t}\hat{t}}$, который соответствует ковариационной матрице ошибок положения НПО после коррекции координат. На следующем шаге коррекции в качестве $K_{\lambda\lambda}$ принимается $K_{\hat{t}\hat{t}}$.

Таким образом, мы получили алгоритм рекуррентного решения задачи коррекции местоположения НПО с учетом систематических ошибок измерений и ранее выполненных определений.

Данный алгоритм решения можно модернизировать, если предварительные координаты пунктов на каждом шаге коррекции вычислять по необходимым измерениям:

$$t_0 = \begin{bmatrix} t_{0_1} \\ t_{0_{i+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{t}_{i-1} A_{i-1,i} \hat{v} + \Delta t_{i-1,i}; \\ \hat{t}_{i-1} - A_{i-1,i} \hat{v} + \Delta t_{i-1,i} + \Phi(s_{i,i+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{0_{i-1}} + F_A \hat{\eta} + \Delta t_{i-1,i}; \\ t_{0_{i-1}} + F_A \hat{\eta} + \Delta t_{i-1,i} + \Phi(s_{i,i+1}), \end{bmatrix}$$

где $F_A = [-A_{(i-1,i)} \times E]$

Тогда погрешности предварительных координат пунктов коррекции можно рассматривать централизованными случайными величинами:

$$\Delta_{t_0} = F_{\eta} \hat{\eta} + \Delta_{\Delta t_{i-1,i}} + F_S \Delta_S \Rightarrow \Delta_{t_0} = F_{\eta} \hat{\eta} + F_{\vartheta} \vartheta, \quad (24)$$

где $F_{\eta} = \left[\frac{\partial t_0}{\partial \hat{\eta}} \right]$; $F_S = \left[\frac{\partial t_0}{\partial s_{i,i+1}} \right]$; $F_{\vartheta} = [E \quad F_S]$; $\vartheta = \left[\begin{matrix} \Delta_{\Delta t_{i-1,i}} \\ \Delta_S \end{matrix} \right]$ – составной вектор случайных ошибок приращений координат, полученных в результате интегрирования данных на отрезке маршрута перемещения НПО от пункта $i - 1$ до пункта i , и ошибок гироскопических, линейных и угловых измерений.

Ковариационную матрицу вектора Δ_{t_0} вычисляют по формуле

$$K_{t_0} = F_{\eta} K_{\hat{\eta}\hat{\eta}} F_{\eta}^T + F_{\vartheta} K_{\vartheta\vartheta} F_{\vartheta}^T. \quad (25)$$

В выражении (25) $K_{\hat{\eta}\hat{\eta}}$ – ковариационная матрица ошибок, полученная на предыдущем шаге коррекции для составного вектора $\left[\begin{matrix} \hat{v} \\ \hat{t}_{i-1} \end{matrix} \right]$, $K_{\vartheta\vartheta}$ – ковариационная матрица вектора ошибок ϑ .

Тогда параметрическая модель избыточных измерений будет иметь вид

$$l = Av + B\tau + I\Delta, \quad (26)$$

где $\Delta = \Delta_{\Delta t_{i,i+1}}$

Тип 1 $A = \begin{bmatrix} \Delta x_{i,i+1} \\ \Delta y_{i,i+1} \\ h_{i,i+1} \end{bmatrix};$	Тип 2 $A = \begin{bmatrix} \Delta x_{i,i+1} & 0 \\ \Delta y_{i,i+1} & 0 \\ 0 & h_{i,i+1} \end{bmatrix};$	Тип 3 $A = \begin{bmatrix} \Delta x_{i,i+1} & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y_{i,i+1} & 0 \\ 0 & 0 & h_{i,i+1} \end{bmatrix}$
$B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$	$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$	

По форме выражение (26) соответствует выражению (15). Однако по содержанию матриц и векторов они различны. В то же время для решения уравнений (26) формально можно применить алгоритм решения уравнений (15):

$$\begin{aligned} \hat{v} &= (A^T K_{ll}^{-1} A)^{-1} A^T K_{ll}^{-1} l = Gl; \\ \hat{\Delta} &= K_{\Delta\Delta} I^T K_{ll}^{-1} P_A l = K_{\Delta l} K_{ll}^{-1} P_A l = Sl; \\ \hat{\tau} &= K_{t_0} B^T K_{ll}^{-1} P_A l = K_{t_0 l} K_{ll}^{-1} P_A l = Hl, \end{aligned} \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} K_{ll} &= BK_{t_0} B^T + IK_{\Delta\Delta} I^T; \\ P_A &= E - A(A^T K_{ll}^{-1} A)^{-1} A^T K_{ll}^{-1}; \end{aligned}$$

а E – единичная матрица.

По аналогии с формулами (22) и (23) напишем выражения для ковариационных матриц ошибок векторов \hat{v} , $\hat{\Delta}$, $\hat{\tau}$:

$$\begin{aligned} K_{\hat{v}\hat{v}} &= (A^T K_{ll}^{-1} A)^{-1}; \\ K_{\hat{\Delta}\hat{\Delta}} &= K_{\Delta\Delta} - K_{\Delta l} K_{ll}^{-1} P_A K_{l\Delta}; \\ K_{\hat{\tau}\hat{\tau}} &= K_{t_0} - K_{t_0 l} K_{ll}^{-1} P_A K_{lt_0}. \end{aligned} \quad (28)$$

Так как векторы \hat{v} , $\hat{\tau}$ на следующем шаге коррекции используются для вычисления предварительных координат пунктов и ковариационных матриц их ошибок, то для формирования

ковариационной матрицы $K_{\hat{\eta}\hat{\eta}}$ для вектора $\hat{\eta} = \begin{bmatrix} \hat{v} \\ \hat{t}_{i-1} \end{bmatrix}$ необходимо знать матрицу взаимных ковариаций $K_{\hat{v}\hat{t}}$.

На основании формул (20) и (21) и (18) напишем выражения для ошибок векторов \hat{v}, \hat{t} :

$$\begin{aligned} e_{\hat{v}} &= G\theta, \\ e_{\hat{t}} &= H\theta - v \end{aligned} \quad (29)$$

Матрица взаимных ковариаций

$$K_{\hat{v}\hat{t}} = M(e_{\hat{v}}e_{\hat{t}}^T) = M\{(G\theta)(H\theta - v)^T\} = GK_{\theta\theta}H^T - GK_{\theta v} = GK_{\theta\theta}H^T, \quad (30)$$

так как составляющие векторов θ и v – стохастически взаимно независимые величины, для которых $K_{\theta v}$ – нулевая матрица.

Можно показать также, что и

$$GK_{\theta\theta}H^T = (A^TK_u^{-1}A)^{-1}A^TK_u^{-1}K_{\theta\theta}(K_{t_0}K_u^{-1}P_A)^T = \mathbf{0} - \text{нулевая матрица.} \quad (31)$$

Таким образом, параметры систематических ошибок приращений координат и поправки к предварительным координатам пунктов в данном алгоритме решения получают некоррелированными величинами.

Полученный алгоритм решения легко приводится к схеме фильтра Калмана с параметрами.

Этап экстраполяции вектора состояния системы. Вычислим предварительные координаты пунктов коррекции и ковариационной матрицы их ошибок:

$$\begin{aligned} t_0 = \begin{bmatrix} t_{0i} \\ t_{0i+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} t_{0i-1} + F_A\hat{\eta} + \Delta t_{i-1,i}; \\ t_{0i-1} + F_A\hat{\eta} + \Delta t_{i-1,i} + \Phi(s_{i,i+1}) \end{bmatrix} \Rightarrow \Delta t_0 = F_{\eta}\hat{\eta} + F_{\vartheta}\vartheta, \\ K_{t_0} &= F_{\eta}K_{\hat{\eta}\hat{\eta}}F_{\eta}^T + F_{\vartheta}K_{\vartheta\vartheta}F_{\vartheta}^T. \end{aligned} \quad (32)$$

Этап коррекции. Вычислим на текущем шаге коррекции отклонений результатов интегрирования данных ИНС ПНО от ожидаемых (прогнозируемых) значений:

$$l = \Delta t_{i,i+1} - L(t_0). \quad (33)$$

Вычислим ковариационную матрицу ошибок вектора l

$$K_l = BK_{t_0}B^T + IK_{\Delta\Delta}I^T. \quad (34)$$

Коррекция ранее полученной экстраполяции вектора состояния – это вычисление уточненных координат пунктов коррекции:

$$\begin{aligned} \hat{t} &= t_0 + \hat{t} = t_0 + K_{t_0}B^TK_u^{-1}P_A l = t_0 + Hl; \\ P_A &= E - A(A^TK_u^{-1}A)^{-1}A^TK_u^{-1} \end{aligned} \quad (35)$$

и вычисление параметров систематических ошибок интегрирования данных ИНС:

$$\hat{v} = (A^TK_u^{-1}A)^{-1}A^TK_u^{-1}l = Gl. \quad (36)$$

Формируем для следующего шага коррекции вектор начального состояния системы $\hat{\eta} = \begin{bmatrix} \hat{v} \\ \hat{t}_{i-1} \end{bmatrix}$ и осуществляем расчет ковариационных матриц полученных оценок:

$$K_{\hat{\eta}\hat{\eta}} = \begin{bmatrix} K_{\hat{v}\hat{v}} & 0 \\ 0 & K_{\hat{t}\hat{t}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A^TK_u^{-1}A)^{-1} & 0 \\ 0 & (E - HB)K_{t_0} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для проверки работоспособности предлагаемых алгоритмов коррекции данных инерциальных навигационных систем наземных подвижных объектов была построена математическая модель идеального маршрута передвижения НПО.

Модель маршрута передвижения НПО состояла из четырех звеньев (см. рис.1). В системе координат на плоскости для каждого звена протяженностью 50 500 м смоделированы резуль-

таты интегрирования данных ИНС, подверженных случайным и систематическим ошибкам, а также результаты гироскопических определений и дальномерных измерений.

Модель систематических ошибок навигационных измерений принята линейной, зависящей от одного параметра $v = 1/4000$:

$$\delta = \Delta t \cdot v.$$

Для случайных погрешностей приняты гауссовы модели со средними квадратическими отклонениями:

- для навигационных измерений – $\sigma_{\Delta t} = 1/5000$;
- для гироскопических определений – $\sigma_{\alpha} = 0,3'$;
- для линейных измерений – $\sigma_d = 1$ см.

Результаты моделирования измерений обрабатывались методом наименьших квадратов и по предлагаемым алгоритмам. Полученные данные сравнивались с идеальной моделью. Сравнительный анализ ошибок приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ ошибок

№ звена маршрута	№ пункта коррекции	МНК		Рекуррентный МНК		Фильтр Калмана	
		$\theta_{x(y)}$, м	$m_{x(y)}$, м	$\theta_{x(y)}$, м	$m_{x(y)}$, м	$\theta_{x(y)}$, м	$m_{x(y)}$, м
1	2	-5,2(0,0)	14,0(10,3)	-5,2(0,0)	14,0(10,3)	-5,2(0,0)	10,0(10,2)
-	3	-5,3(0,1)	14,0(10,3)	-5,3(0,1)	14,0(10,3)	-5,3(0,1)	10,0(10,2)
2	4	-5,2(-8,2)	19,3(15,3)	-5,2(-8,2)	19,3(15,3)	-6,5(-8,9)	16,6(15,2)
-	5	-5,3(-8,3)	19,3(15,3)	-5,3(-8,3)	19,3(15,3)	-6,6(-8,9)	16,6(15,2)
3	6	-24,9(-14,0)	22,7(19,9)	-24,9(-14,0)	22,7(19,9)	-25,6(-14,1)	21,3(18,9)
-	7	-25,0(-14,0)	22,7(19,9)	-25,0(-14,0)	22,7(19,9)	-25,7(-14,0)	21,3(18,9)
4	8	-0,4(-30,4)	25,4(23,9)	-0,4(-30,4)	25,4(23,9)	-0,8(-30,0)	25,2(22,0)
-	9	-0,2(-30,5)	25,4(23,9)	-0,2(-30,5)	25,4(23,9)	-0,6(-30,1)	25,2(22,0)

Анализ данных табл. 1 показывает, что решения задач коррекции ИНС ПНО по алгоритмам МНК и рекуррентного МНК идентичны, а фильтр Калмана, как модификация МНК, дает немного более «грубое» решение с несущественным завышением точностных характеристик по сравнению с МНК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные модели коррекции данных инерциальных навигационных систем наземных подвижных объектов на основе использования гироскопических, линейных и угловых измерений исключают влияние систематической составляющей в результатах интегрирования данных ИНС на положение НПО в геодезической системе координат и повышают точность наземной навигации.

Список используемых источников

1. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
2. *Селиванова Л.М., Шевцова Е.В.* Инерциальные навигационные системы: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – Ч. 1: Одноканальные инерциальные навигационные системы. – 46 с.
3. *Воронков Н.Н., Ашимов Н.М.* Гироскопическое ориентирование. – М.: Недра, 1973. – 254 с.
4. *Астапович А.В., Богачев А.Н., Макаров С.А.* Теория математической обработки измерений.: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – Ч. 2: Метод наименьших квадратов. – 106 с.

С.Б. Варющенко,
доктор военных наук, профессор;
С.В. Косырев,
доктор военных наук, профессор;
М.Ю. Лебедев

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОСМОДРОМА ПЛЕСЕЦК

Авторами предложен подход в моделировании функций системы управления обеспечением экологической безопасности космодрома Плесецк по оцениванию воздействия экологических угроз, выработке управляющих воздействий при планировании и оценивании качества решаемых задач.

Ключевые слова: обеспечение экологической безопасности, система управления, модель.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экологической безопасности (ОЭБ) военного объекта представляет собой комплекс мер правового, организационно-технического, социально-экономического, воспитательного и иного характера, проводимых в целях защиты жизненно важных интересов военнослужащих, гражданского персонала, населения от возможного негативного воздействия деятельности вооруженных сил, предотвращения и ликвидации экологических последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на объектах Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ) [2]. Основой организации мероприятий ОЭБ является деятельность органов военного управления всех уровней, должностных лиц, военнослужащих и гражданского персонала, выделенная в отдельное направление и детерминированная целевой функцией ОЭБ.

Следовательно, можно считать, что реализация совокупности мероприятий ОЭБ военных объектов представляет собой единую целенаправленную деятельность, обеспечивающую выполнение защитной функции от негативного воздействия экологических факторов, способных оказывать прямое или косвенное влияние на состояние здоровья личного состава и окружающую среду, результативность которой определяется в соответствии с выбранными показателями. Прогнозирование результатов организации ОЭБ воинских частей в условиях современных требований государственной и ведомственной экологической политики представляет собой сложную задачу [7].

В свою очередь, систему управления ОЭБ (СУ ОЭБ) можно представить как совокупность подсистем, определенным образом использующих функциональные связи между субъектом управления [служба (экологической безопасности), должностные лица воинской части)] и объектом управления (силы и средства, привлекаемые к выполнению задач ОЭБ) для обеспечения защищенности жизненно важных интересов человека и природной среды от возможного негативного воздействия военной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий на уровне, определенном системой управления более высокого иерархического уровня.

Установление и анализ подобных взаимосвязей позволяют на основе обобщения мероприятий функционально-целевого назначения и экологически опасных факторов деятельности военного объекта построить модель СУ ОЭБ, выделяя при этом типичные структурные составляющие – подсистемы и элементы, а также позволяют определить характер внутренних и внешних связей между ними.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОСМОДРОМА ПЛЕСЕЦК

Модель СУ ОЭБ следует рассматривать как динамическую [6]. В качестве входного процесса примем защищенность жизненно важных интересов (потребностей) личного состава и населения объектов космодрома Плесецк (далее – космодром) от воздействия экологически неблагоприятных факторов (физических, химических, биологических, психофизиологических и социальных). Управляющим воздействием будем считать совокупность требований, норм и рекомендаций системы вышестоящего иерархического уровня, а возмущающим – воздействия экологических аспектов в результате выполнения задач военно-космической деятельности. Соответственно, под элементами системы следует понимать отдельные мероприятия ОЭБ, спланированные субъектом управления и реализуемые объектом, включая обеспечивающие их проведение информационные связи и ресурсы. Совокупность элементов со связями между ними, составляющими вполне самостоятельно функционирующую часть системы, будем рассматривать как подсистему. Руководствуясь основными подходами системно-кибернетических исследований, в структуре СУ ОЭБ космодрома можно выделить:

- подсистему мониторинга (наблюдения, оценки и прогноза изменений состояния ОЭБ);
- подсистему выработки управляющих воздействий (планирования ОЭБ);
- операционную подсистему (реализации мероприятий ОЭБ).

Следует отметить, что перечисленные подсистемы носят организационный характер. Наглядно структура функциональной модели СУ ОЭБ космодрома представлена на рис. 1.

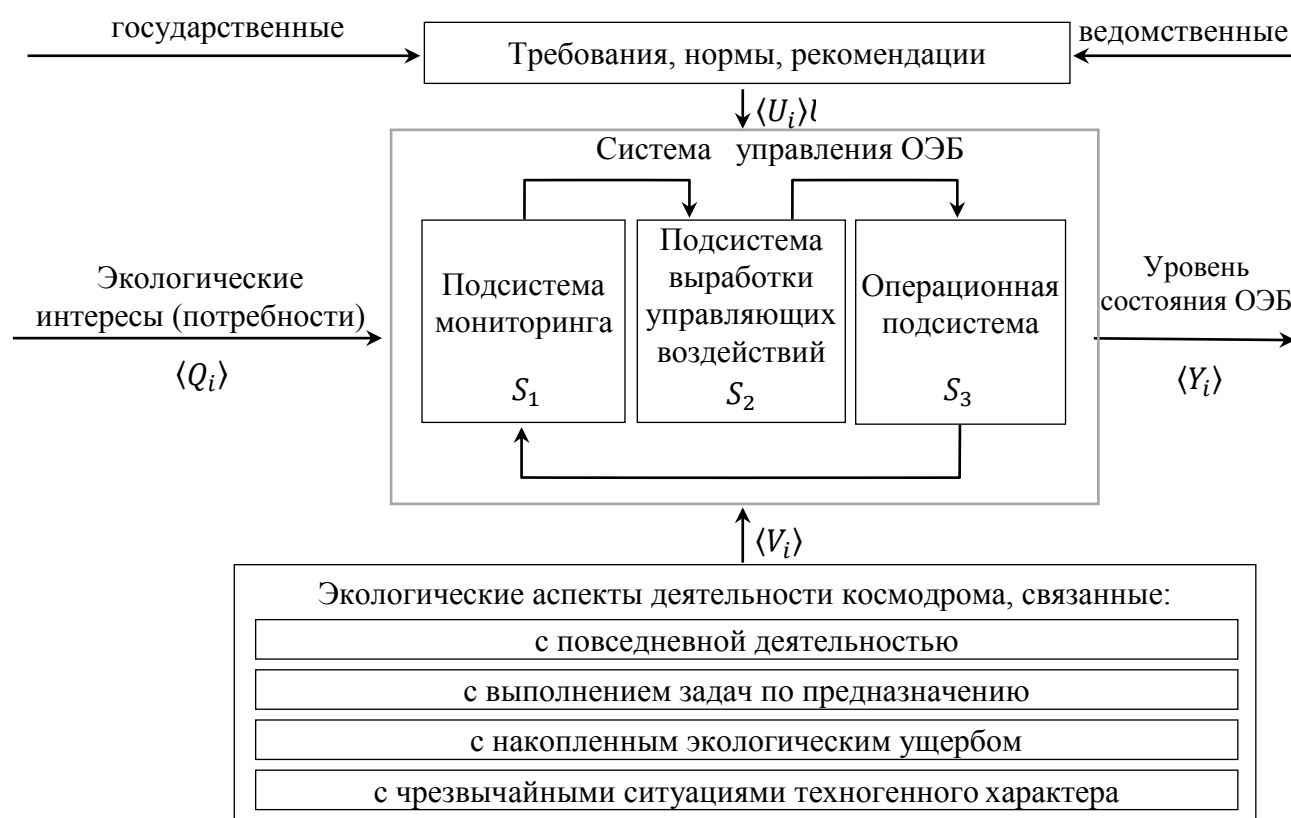


Рис. 1. Структура функциональной модели СУ ОЭБ

Жизненно важные интересы объектов экологической безопасности (Q_i) (права, материальные и духовные потребности личности, природные ресурсы и природная среда) находятся под воздействием экологических аспектов деятельности космодрома (V_i), возникающих в результате жизнеобеспечивающей и специальной деятельности, которые в зависимости от ин-

тенсивности воздействия можно подразделить на два режима: повседневный и чрезвычайной ситуации. В соответствии с государственными и ведомственными требованиями (U_i), организуется выполнение мероприятий ОЭБ, которое вызывает обратное воздействие и приводит к предотвращению или ограничению ущерба, наносимого здоровью человека и природной среде. В совокупности функционирование СУ ОЭБ космодрома наделяет атрибутивные свойства операционной деятельности характеристиками, которые определяют достигнутый уровень ОЭБ (Y_i).

Проведение логической декомпозиции экологических интересов, влияющих на них аспектов военной деятельности космодрома и мер, организуемых на основании требований к ОЭБ, позволяет представить функциональную модель СУ ОЭБ в символьном виде следующим образом:

$$S(Y) = \langle Q_i, V_i, U_i; R_i \rangle = \cup\{S_1(R_1), S_2(R_2), S_3(R_3)\}, \quad (1)$$

где i – индекс экологического фактора, а также относящихся к нему характеристик и обуславливающих его элементов;

U – символ булева объединения;

R – отношение, которое характеризует взаимосвязь между компонентами множеств (Q_i, V_i, U_i), используемых в процедурах соответствующих подсистем (S_1, S_2, S_3).

Так, совокупность экологических важных интересов военного объекта и окружающей среды (Q_i) включает множества потребностей: Q_1 – обеспечения безопасности военной службы; Q_2 – обеспеченных прав пользования безопасными природными ресурсами (воздух, почва, вода); Q_3 – характеристик благоприятного состояния живой природы.

Мероприятия, проводимые в интересах идентификации, оценки и прогнозирования изменения во времени состояний экологических интересов, вызванных воздействием техногенных факторов, образуют подсистему мониторинга, которая может быть выражена как

$$S_1 = \{Q_i, V_i; R_1\} = \{A_i^{S_1}\}, \quad (2)$$

где $A_i^{S_1}$ – систематизированные характеристики природных и техногенных факторов, оказывающих влияние на ОЭБ военного объекта, группируемые по режимам функционирования (повседневный, ЧС) военного объекта и масштабам;

V_i – множество угроз ОЭБ, систематизированных по классам: V_{1i} – обусловленные деятельностью военного объекта, рассмотренные в работах [5, 8, 12]; V_{2i} – общегосударственные, определенные в [1].

Указанные классы включают группы экологических аспектов военной деятельности, воздействие которых вызвано: V_{11} – повседневной деятельностью войск (жизнеобеспечение, боевая подготовка); V_{12} – выполнением военным объектом задач по предназначению (эксплуатация ракетно-космической техники); V_{13} – последствиями возникновения чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) техногенного характера; V_{14} – ЧС природного характера; V_{21} – наличием объектов накопленного вреда окружающей среде; V_{22} – увеличением объема образования отходов производства и потребления при низком уровне их утилизации; V_{23} – последствиями низкого уровня разработки и внедрения экологически чистых технологий.

Информационные потоки, генерируемые подсистемой мониторинга, служат основой для подсистемы выработки управляющих воздействий (S_2), которая определяет мероприятия, распределяет силы и средства, устанавливает порядок взаимодействия для достижения целей и решения задач ОЭБ, поставленных вышестоящим органом экологической безопасности:

$$S_2 = \{A_i^{S_1}, U_i, R_2\} = \{B_i^{S_2}\}, \quad (3)$$

где U_i – множество, объединяющее задачи ОЭБ, требования, нормы, рекомендации и другие установки вышестоящего органа управления, классифицированные в соответствии с положениями [2], представленные общностями: U_1 – формирование эффективной

системы управления ОЭБ; U_2 – выполнение требований законодательства в области охраны окружающей среды; U_3 – снижение (предотвращение) негативного воздействия военных объектов, образцов вооружения и военной техники на окружающую среду при повседневной деятельности войск; U_4 – предотвращение возникновения и ликвидация экологических последствий ЧС природного и техногенного характера на военных объектах; U_5 – очистка (рекультивация) территорий военных объектов от загрязнений; U_6 – подготовка военнослужащих и лиц гражданского персонала по ОЭБ, формирование их экологической культуры; U_7 – научное и информационно-аналитическое ОЭБ войск;

$B_i^{S_2}$ – влияние мероприятий ОЭБ, осуществляемых в интересах снижения (предотвращения) негативного воздействия экологических аспектов деятельности космодрома.

Эффективность функционирования СУ ОЭБ космодрома определяется достигнутыми результатами и оценивается категориями показателей, рассмотренными в работе [9]. Степень снижения (предотвращения) негативного воздействия экологических факторов и повышение экологического благополучия по результатам проведения того или иного спланированного мероприятия, а также изменения их состояний во времени являются элементами комплексного показателя, характеризующего достигнутый уровень ОЭБ. Такой показатель может быть определен с помощью подхода, рассмотренного в работе [4], в соответствии с которым показатели могут классифицироваться следующим образом: обязательные (исполнение установленных требований нормативно-правовых актов) и добровольные или инициативные (участие в программах снижения негативного экологического воздействия). Данный подход соответствует «методу главной компоненты», применяемому для оценивания эффективности целенаправленных процессов и качества проводящей их системы управления [10]. Следовательно, операционную подсистему, объединяющую деятельность по реализации мероприятий ОЭБ и оцениванию их результативности, можно представить выражением

$$S_3 = \{X_{i,\Delta t}, Z_i; R_3\} = \{Y_i\}, Z_i = \begin{cases} Z_1 \in \{Z_1\}^{\text{доп}} \\ Z_{21} \in [0, \infty); Z_{22}, Z_{23} \in [0,1] \end{cases} \quad (4)$$

где $X_{X_{i,\Delta t}}$ – множество, характеризующее процесс изменения состояния ОЭБ военного объекта воздействием подсистемы S_3 за Δt – время функционирования военного объекта и реализации спланированных мероприятий ОЭБ $\{X_{i,\Delta t}\} = \{A_i^{S_1}\} \cap \{B_i^{S_2}\}$;

Y_i – оценка выходных параметров, составляющих комплексный показатель ОЭБ военного объекта, определяемая опосредованно через подсистему мониторинга и являющаяся основой для оперативного реагирования по достижению требуемого качества мероприятий ОЭБ;

Z_i – совокупность показателей, в соответствии с которыми осуществляется оценивание уровня состояния ОЭБ (область допустимых альтернатив), включающая: Z_1 – группу показателей выполнения установленных требований ОЭБ, регламентированных положениями [3]; Z_2 – группу показателей, определенных в работе [1], исключая характеристики, находящиеся вне пределов компетенции деятельности военного объекта по своим масштабам и специализации.

В частности, вторая группа имеет в своем составе показатели: Z_{21} – изменение объема образованных отходов соответствующего класса опасности; Z_{22} – доля утилизированных и обезвреженных отходов соответствующего класса опасности в общем объеме образованных отходов этого класса опасности; Z_{23} – доля ликвидированных объектов накопленного вреда окружающей среде.

Составляющие комплексного показателя достигнутого уровня ОЭБ космодрома демонстрируют:

– соответствие состояния ОЭБ военного объекта законодательным и нормативным актам, другим требованиям, а также принятым обязательствам;

- тенденции, связанные с эффективностью функционирования СУ ОЭБ;
- возможности безопасного использования природных ресурсов и другие результаты операционной деятельности;
- экономию средств на обеспечение деятельности военного объекта (например, снижение затрат на вывоз коммунальных отходов с мест накопления) и другие финансовые результаты [4].

Руководствуясь основополагающими концепциями и принципами кибернетики в отношении организационно-технических систем, функционирование подсистем (S_1, S_2, S_3) можно представить матрицами инцидентности гиперграфов, ребрами которых соединяются не только две вершины, но и любые их подмножества. Данные матрицы представлены на рис. 2, где наличие связей между элементами (участие в процессе) соответствует значению «1», их отсутствие – «0».

<i>Матрица 1</i>				<i>Матрица 2</i>								<i>Матрица 3</i>				
$A_i^{S_1}$	Q_1	Q_2	Q_3	$B_i^{S_2}$	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	Y_i	Z_1	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}
V_{11}	1	1	0	A_{11}	0	1	1	0	0	0	1	X_{21}	1	0	1	0
V_{12}	1	1	1	A_{12}	0	1	1	0	0	1	0	X_{22}	1	0	0	0
V_{13}	1	0	1	A_{13}	1	0	0	1	0	0	0	X_{23}	1	1	1	0
V_{14}	1	0	0	A_{14}	0	0	0	1	0	0	0	X_{24}	1	0	0	0
V_{21}	0	0	1	A_{101}	1	0	1	1	1	1	0	X_{25}	1	0	0	1
V_{22}	0	1	0	S_2								X_{26}	1	0	0	0
V_{23}	0	0	1	S_3								X_{27}	1	0	0	0
S_1												S_3				

Рис. 2. Матрицы инцидентности гиперграфов

Различные элементы и подсистемы играют далеко не одинаковые роли. Их избыток и отсутствие могут приводить к разным последствиям с точки зрения степени влияния на состояние системы ОЭБ. Матрица 1 позволяет определить требования к техническим средствам, а также способам выявления и оценки экологической обстановки, как итог – существующую возможность обнаружения влияния экологических факторов на жизненно важные интересы (потребности) военного объекта и окружающую среду. В случае размещения в ячейках матрицы 2 показателей интенсивности воздействия и коэффициентов, ослабляющих либо усугубляющих их воздействие, можно определить показатель экологической нагрузки. Матрица 3 позволяет определить комплексный показатель экологического риска или состояния ОЭБ при подстановке вместо значения «1» значений его компонент при учете регламентирующих требований.

Рассмотрим в качестве примера техногенного источника воздействия на экологическую безопасность ядерную энергетическую установку мегаваттного класса (далее – ЯЭУ), стендовые испытания которой должны начаться на космодроме в ближайшем будущем. При эксплуатации ЯЭУ возникает гамма-нейтронное излучение, при этом табельные войсковые средства радиационной разведки и контроля позволяют диагностировать исключительно гамма-излучение. Следовательно, для эффективного функционирования подсистемы S_1 подразделения космодрома необходимо дополнительно использовать нейтронные детекторы (измерители мощности эквивалентной дозы нейтронов).

Комплекс мер обеспечения радиационной безопасности в повседневном режиме функционирования включает дозиметрический контроль и ограничительные мероприятия деятельности личного состава космодрома, осуществляющего подготовку к наземной эксплуатации ЯЭУ, формируемые подсистемой S_2 на основании действующих норм. При этом не допускается превышение дозы облучения персонала, относящегося к группе «А», более 5 бэр (для

группы «Б» – 1/4, для населения – 1/10 от указанного значения) [11]. В случае возникновения чрезвычайной ситуации эквивалентная доза облучения (\dot{D}) у поверхности ЯЭУ за время срабатывания системы защиты может составить по нейтронному излучению $2,6 \times 10^5$ бэр, по гамма-излучению – $0,4 \times 10^5$ бэр.

Спланированные меры снижения (предотвращения) негативного радиационного воздействия, помимо сокращения продолжительности облучения ($t_{\text{раб}} < t_{\text{max}}(\dot{D}^{\text{доп}})$), характеризуются коэффициентом ослабления ($K_i^{\text{осл}}$), который включает кратности уменьшения дозы в результате использования радиопротекторов – 1, 7; удаления от источника радиоактивного излучения – до $0,3 \times 10^3$; применения локальных средств защиты – 3; использования теневого экрана – до 1000 раз. Соответственно, R_3 является отношением, при котором U_i становится делителем в выражении (3).

Руководствуясь требованиями к ограничению техногенного воздействия, формируем область допустимых значений экологической безопасности по радиационному фактору, входящих в группу $\{Z_1\}^{\text{доп}}$ выражения (4).

Далее можно перейти к оцениванию опасности радиационного воздействия и результативности мероприятий ОЭБ военного объекта. В первом случае коэффициент опасности определяется отношением $X_b/Z_{1b}^{\text{доп}}$, где X_b – прогнозируемая эквивалентная доза, а $Z_{1b}^{\text{доп}}$ – установленный предел дозы облучения персонала (населения) [11].

Подставляя значения в матрицы, можно определить, что при возникновении чрезвычайной ситуации состояние ОЭБ, соответствующее пределу допустимой дозы облучения, на расстоянии 5 м от ЯЭУ достигается использованием композитных экранов из восьми слоев (полимер – 6, свинец – 2). Пример использования матриц 1–3 представлен на рис. 3.

		Q_1 , бэр		...				U_2		U_3		U_4		...				Z_{1b}		$Z_{1\text{риск}}$		...		...
12	η	?	...	A_{12}		$t_{\text{раб}} < t_{\text{max}}(\dot{D}^{\text{доп}})$		...		...		...		X_3		$< 0,5$ бэр		5×10^{-5}		...		...
	γ	$D_{\text{А}}^{\text{доп}} < 5$...	
...		
13	η	$2,6 \times 10^5$		A_{13}		$K_{\text{прот}}^{\text{осл}} = 1,7$; $K_{\text{ЛСИЗ}}^{\text{осл}} = 3$;		$K_{\text{удаление 5 м}}^{\text{осл}} = 3,2 \times 10^{-3}$;		$K_{\text{ПЭ 6 сл}}^{\text{осл}} = 0,062$; $K_{\text{РБ 2 сл}}^{\text{осл}} = 0,38$		...		X_4		$4,53$ бэр		1×10^{-3}		...		...
	γ	$0,4 \times 10^5$...	
...		
		S_1						S_2								S_3									

Рис. 3. Пример использования матриц при определении показателя состояния ОЭБ по радиационному фактору

В случае оценивания фактического состояния ОЭБ по радиационному аспекту критерием является выполнение условия $X_{\text{фб},t_j} \leq Z_{1b}^{\text{доп}}$, где $X_{\text{фб},t_j}$ – эквивалентная доза облучения человека за год.

Вывод. По мнению авторов данной статьи, подобное моделирование может использоваться органами военного управления для решения прогнозных задач в области ОЭБ военных объектов, что, в свою очередь, будет способствовать формированию эффективной системы управления обеспечением экологической безопасности ВС РФ.

Список используемых источников

1. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года [утв. и введ. в действие Указом Президента РФ № 176 от 19 апр. 2017 г.]. – М., 2017. – 9 с.
2. Об утверждении Положения об органах экологической безопасности Вооруженных Сил Российской Федерации: приказ Министра обороны РФ № 530 от 14 сент. 2015 г. – М., 2015.
3. Об утверждении Порядка проведения проверок состояния обеспечения экологической безопасности в Вооруженных Силах Российской Федерации: приказ Министра обороны РФ № 176 от 5 апреля 2018 г. – М., 2018.
4. ГОСТ Р ИСО 14031-2016. Системы экологического менеджмента. Оценка экологической эффективности. Руководство по оценке экологической эффективности. – М., 2017.
5. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду / под общ. ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, М.В. Сильникова. – М.: ГЕОС, 2016. – 795 с.
6. *Капнинова О.С.* Моделирование управленческих решений для достижения экологической эффективности организации // Слово молодым ученым. – 2018. – № 1. – С. 231–238.
7. *Летучий Ю.А., Доронин А.П.* Пути построения эффективной системы управления обеспечением экологической безопасности Вооруженных Сил Российской Федерации // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Экология и космос» – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2020. – С. 39–48.
8. *Летучий Ю.А., Доронин А.П., Тимощук А.С.* Обеспечение экологической безопасности деятельности космических войск: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 343 с.
9. Показатели экологической эффективности деятельности воинских частей и организаций Вооруженных Сил Российской Федерации / Ю.А. Летучий [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 662. – С. 230–235.
10. *Петухов Г.Б., Якунин В.И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.
11. Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009): [постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47]. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 03.03.2020).
12. *Шатров Я.Т.* Обеспечение экологической безопасности ракетно-космической деятельности: учебно-метод. пособие. – Королев: ЦНИИмаш, 2010. – 1000 с.

И.А. Готюр,
доктор техн. наук, доцент;
А.В. Костромитинов,
кандидат техн. наук;
И.А. Яременко

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МЕТАДААННЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ

В статье предложена модель распределения данных на основе семантического анализа метаданных гидрометеорологических сводок в аспекте гидрометеорологического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации.

Ключевые слова: базы данных, «большие данные», распределенная обработка информации, метайнформация, гидрометеорологические данные.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объемов поступающей и обрабатываемой гидрометеорологической информации привело к тому, что современные модели распределения гидрометеорологических данных (ГМД) не обеспечивают долгосрочность хранения и оперативность доступа к данным. Рост производительности ЭВМ не может обеспечить хранение того количества данных, которое необходимо иметь единовременно для проведения анализа и синтеза знаний. Именно в тот момент, когда используемые технические средства, порядок хранения и получения данных перестают удовлетворять критерию оперативности, можно говорить о «больших данных». Под технологиями «больших данных» будем понимать модели представления, методы и способы хранения и обработки значительного количества данных, порядка 10–30 Тбайт, с целью получения новых знаний в предметной области.

Гидрометеорологические данные в системе гидрометеорологического обеспечения (ГМО) используются для прогнозирования гидрометеорологических условий (ГМУ) и принятия решения на применение сил и средств. По частоте использования данные разделяются на оперативные и редко используемые. Оперативные данные в зависимости от решаемых задач используются в качестве исходных при прогнозировании метеорологических условий.

Редко используемые (архивные) данные применяются при расчете климатических справок, составлении климатических описаний районов и при уточнении климатических показателей. Кроме того, большие ряды наблюдений применяются при разработке новых и уточнении существующих методов прогнозирования ГМУ.

Анализ существующих подходов к организации хранения данных показал [10], что в настоящее время традиционные технологии и модели распределения данных не способны обеспечить хранение такого объема данных.

Возникла необходимость в использовании новых подходов к работе с таким количеством данных. Так, в работах [4–6] описаны принципы организации работы с «большими данными», которые в настоящее время получили большое распространение ввиду отсутствия альтернативных решений проблемы. Необходимо отметить, что в работе [9] предложен подход к организации хранилища метеорологических данных, обеспечивающий доступ к полям метеовеличин в среднем за 0,1 с и обладающий линейным ростом вычислительной сложности операции получения данных из хранилища при увеличении объема хранимых данных. Этот

подход удобен для решения научных и исследовательских задач, так как он не подразумевает частую запись данных в хранилище и работу с оперативными данными.

Разработка структуры базы данных с целью применения обозначенных технологий требует наличия определенных навыков и опыта, так как универсальных решений в разработке структуры базы данных (БД) для любых задач не существует. Поэтому инженерам при ее разработке необходимо учитывать прикладной уровень данных – при проектировании БД исходить из решаемых задач, а не из удобства организации данных в соответствии с какими-либо признаками.

ПОРЯДОК ПОЛУЧЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВС РФ

Решение задач ГМО достигается путем анализа вторичной метеорологической продукции и синтеза рекомендаций для принятия решений командованием. Под метеорологической продукцией будем понимать обработанные и оформленные в виде карт, документов, таблиц метеорологические данные, пригодные для восприятия человеком.

Метеорологическая продукция формируется путем обработки ГМД.

Обозначим множество поступающих ГМД следующим образом:

$$A = \langle a_0, \dots, a_i \rangle, i \in 0(1)n, \quad (1)$$

где n – количество всех данных, поступающих в автоматизированную систему гидрометеорологического обеспечения (АС ГМО). Метеорологические данные разделяются по типам, например: данные наземных наблюдений, данные аэрологического зондирования атмосферы, данные МРЛ, спутниковые данные. Обозначим типы поступающей ГМД:

$$P = \langle p_0, \dots, p_j \rangle, j \in 1(1)m, \quad (2)$$

где m – максимальное количество разнообразия типов данных. Поступающая ГМД, в соответствии с настройками центра коммутации сообщений (ЦКС), направляется к потребителям. Обозначим множество потребителей ГМД как

$$U = \langle u_0, \dots, u_k \rangle, k \in 1(1)l, \quad (3)$$

где l – количество потребителей, которое со временем только увеличивается. Тогда функция распределения данных ЦКС будет зависеть от типа данных, потребителя, которому необходимы данные заданного типа:

$$f_{рд}(p_j, u_k). \quad (4)$$

После получения потребителем сообщения с данными, оно раскодируется и подвергается контролю целостности, что позволяет выявить неполные, ошибочные, искаженные в процессе передачи сообщения и не учитывать их в расчетах. Обозначим функцию контроля целостности через $\xi(a_i)$.

Далее в зависимости от типа данных производится объективный анализ, результатом которого являются значения в узлах регулярной сетки. На данном этапе проверяется условие принадлежности определенного типа данных к множеству Λ :

$$p_j \in \Lambda. \quad (5)$$

В случае установления принадлежности к Λ производится объективный анализ, после чего данные подготавливаются к усвоению в БД для долгосрочного хранения. Принцип подготовки данных мы рассмотрим ниже, сейчас остановимся на том, как данные получают из БД.

Исходя из специфики выполняемой задачи и требуемой метеорологической продукции, формируется запрос на получение данных из БД:

$$Q_{l,s,t,p}(S, T, L, P), \quad (6)$$

где $Q_{l,s,t,p}$ – функция формирования запроса на получение определенного типа данных по станции или точке на фиксированном уровне за несколько сроков;

- S – множество станций или комбинаций координат, по которым имеются данные;
 T – множество сроков наблюдений, по которым могут быть получены ГМД;
 L – множество уровней, на которых производились измерения метеорологических величин (МВ);
 P – множество типов данных.

После формирования запроса составляется план выполнения запроса в соответствии с имеющимися в БД индексами и с учетом распределенности данных между вычислительными узлами, который в общем виде выглядит следующим образом:

$$f_{\text{ПЗ}}(Q_{l,s,t,p}, f_{\text{ind}}(db_{k_{ab}})), \quad (7)$$

где $f_{\text{ind}}(db_{k_{ab}})$ – функция индексации $db_{k_{ab}}$ базы данных.

После выборки данных формируется запрашиваемая метеорологическая продукция. Обозначим функцию формирования ответа для пользователя $repl = f_{\text{repl}}(data)$, где $data$ – это данные, полученные в результате выполнения запроса $Q_{l,s,t,p}$. На рис. 1 представлен порядок получения метеорологической информации.

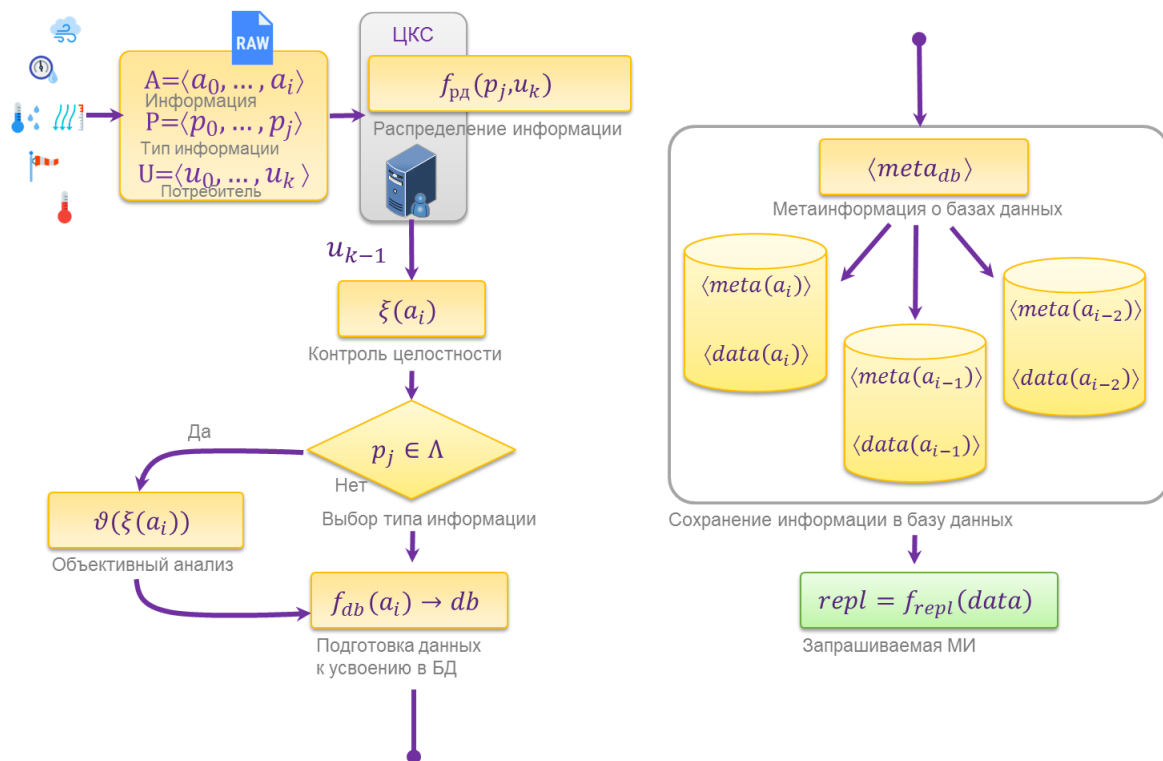


Рис. 1. Порядок получения метеорологической информации при решении задач ГМО ВС РФ

На основе сформированной метеорологической информации в зависимости от выполняемых задач принимаются соответствующие решения. В данном алгоритме наибольший интерес представляет блок распределения данных между вычислительными узлами.

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Исходя из сформулированных требований, данные между БД необходимо распределять равномерно, чтобы в течение определенного времени не возникало избыточной нагрузки на один вычислительный узел, в то время как оставшиеся в этот момент простаивали.

Согласно вышеописанному алгоритму, оперативные сведения о гидрометеорологических условиях поступают на вход системы управления базами данных (СУБД), где данные по

внутренним алгоритмам подвергаются анализу, обработке и записи в БД. Отметим, что сама БД может находиться как на единственном вычислительном узле, так и быть распределенной по нескольким физическим или виртуальным вычислительным узлам.

Механизмы распределения данных в БД реализованы во многих СУБД, следующих принципам «больших данных». Особенности реализации этих механизмов скрыты внутри конкретной СУБД, но администратору СУБД делегировано право определять принцип или ключ, по которому данные будут распределены между вычислительными узлами. Предложенная модель распределения данных является инструментом поиска этого ключа.

Обозначим получаемую из сообщения метаданную о метеорологических измерениях, как функцию $metadata(a_i)$:

$$metadata(a_i) = \langle meta_t(a_i), meta_p(a_i), meta_l(a_i), meta_s(a_i) \rangle, \quad (8)$$

где $meta_t(a_i), meta_p(a_i), meta_l(a_i), meta_s(a_i)$ – функции получения метаданной по сроку, типу данных, уровню и расположению (координатам) соответственно. Комбинация этих параметров между собой уже может служить ключом распределения, так как информация по срокам, типам, уровням и расположению (координатам) уникальна и распределена в течение суток. Вместе с тем возможна ситуация, когда в определенный промежуток времени количество поступающей информации на один узел многократно превышает количество поступающей информации на соседние узлы. С помощью модели распределения данных, изображенной на рис. 2, возможно смоделировать распределение информации между узлами и подобрать такой набор параметров, который обеспечит равномерное распределение по количеству данных и нагрузке между серверами.

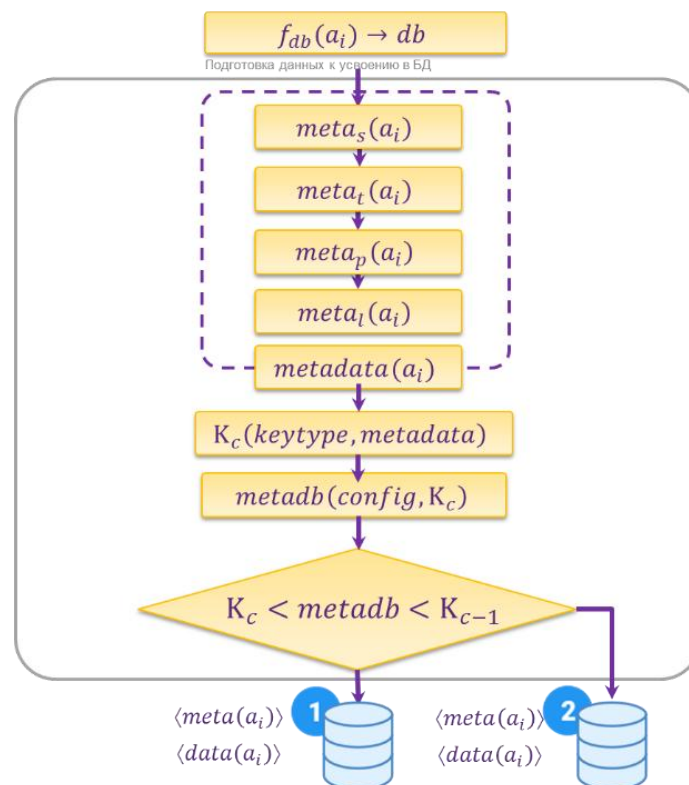


Рис. 2. Модель распределения гидрометеорологических данных

На основе $metadata(a_i)$ и $keytype$ рассчитывается диапазон ключей K_c , где

$$K_c = K_c(keytype, metadata), \quad c \in 1 \dots y. \quad (9)$$

В формуле (9) $keytype$ – это поля, которые используются для составления ключа, а y – количество диапазонов ключей, которые используются для распределения данных по базам

данных отдельных узлов. Тогда справедливо утверждение, что при увеличении объема поступающих данных увеличивается и количество выделяемых диапазонов ключей распределения. В распределенной системе должен присутствовать определенный алгоритм, по которому можно будет однозначно установить, в какой именно базе данных хранятся определенные данные (исходя из соответствующих метаданных) и в какую БД необходимо записать вновь поступившие данные. Вычисление адреса БД происходит в функции *metadb*:

$$metadb = metadb(config, K_c), \quad (10)$$

где *config* – параметры конфигурации БД, содержащие информацию о количестве и составе вычислительных узлов, параметры репликации и распределения. Тогда решение по распределению текущего блока данных принимается исходя из сопоставления значений функций *metadb* и K_c :

$$f(metadb_y, K_c) = \begin{cases} K_0, & metadb < K_0 \\ K_1, & metadb \geq K_0 \cap metadb < K_1 \\ K_2, & metadb \geq K_1 \cap metadb < K_2 \\ \dots \\ K_y, & metadb \geq K_{y-1} \end{cases} \quad (11)$$

Исходя из формулы (11), делается вывод о БД назначения, к которой выполняется запрос или отправка блока данных. Получается, для равномерного задействования всех вычислительных узлов с использованием предложенной модели необходимо найти определенную комбинацию параметров, участвующих в создании ключа распределения. На рис. 3 проиллюстрирован принцип работы модели. Изменение набора ключевых признаков формирования ключа распределения ведет к изменению распределения нагрузки на вычислительные узлы. Комбинирование этих признаков позволит добиться равномерной нагрузки на БД в течение суток.

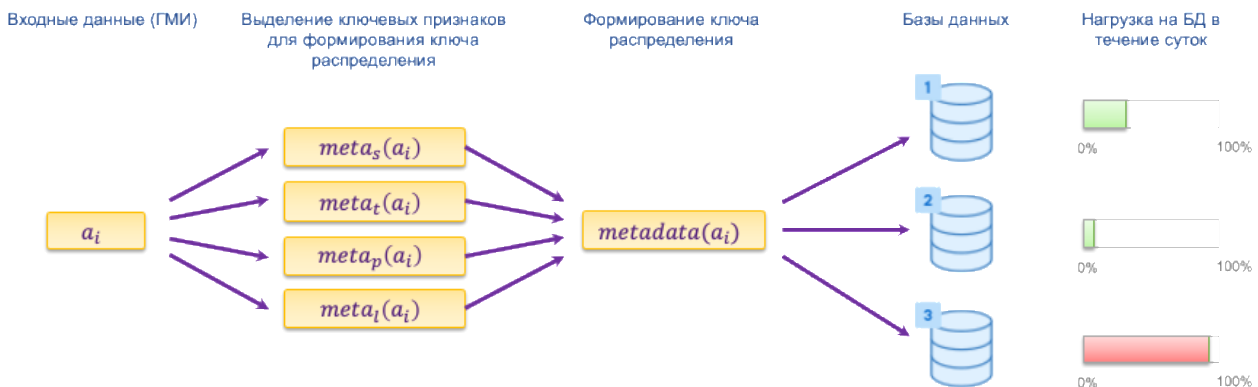


Рис. 3. Схема работы модели для оценки нагрузки на распределенную БД

Ниже представлены результаты проверки адекватности модели, в сравнении с традиционной моделью распределения данных. С учетом требований к модели распределения данных была спроектирована распределенная БД с выделенными признаками, представленными в формуле (8). В нее загружены данные приземных наблюдений и данные аэрологического зондирования атмосферы за период, равный двум месяцам, так, что объем БД составил около 12–16 Гбайт. Выборка производилась с использованием СУБД *MongoDB* в односерверном и двухсерверном вариантах. В качестве оцениваемого параметра выбрано время выполнения запроса. Результаты замеров времени выполнения запросов представлены на рис. 4 и 5.

Видно, что использование модели распределения данных на основе семантического анализа метаданных гидрометеорологических сообщений приводит к снижению времени выпол-

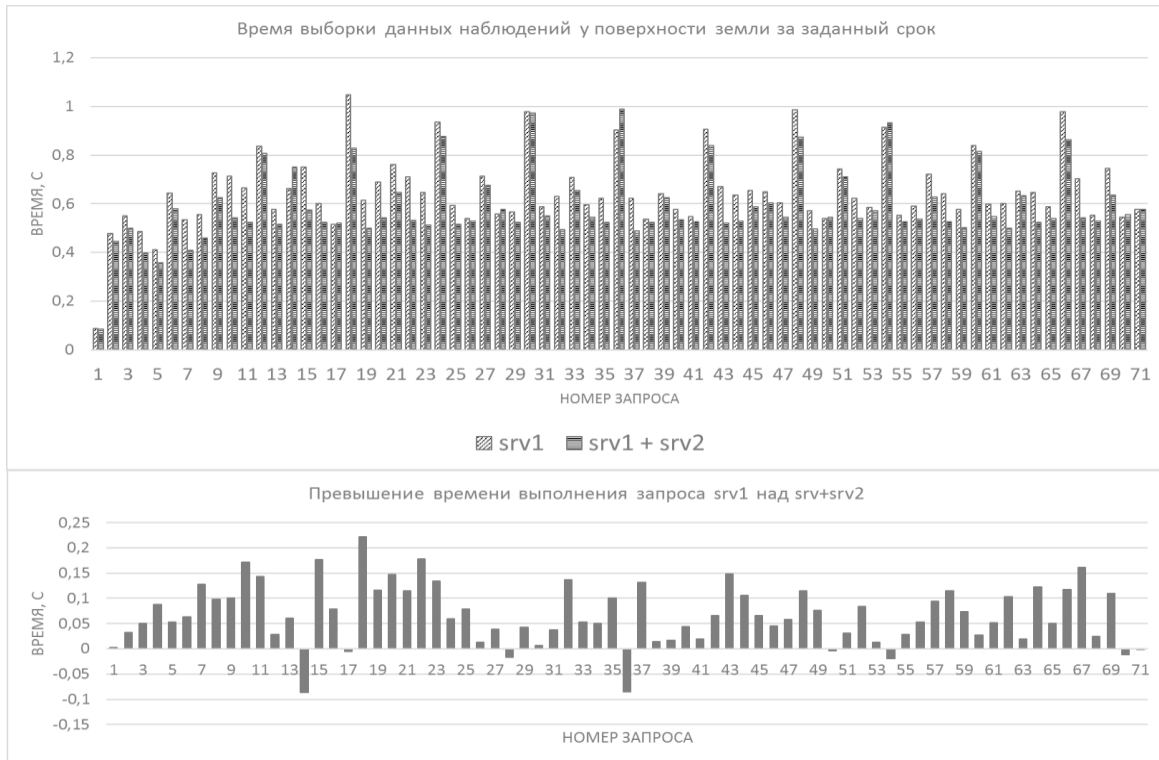


Рис. 4. Время выборки из БД данных наблюдений у поверхности Земли

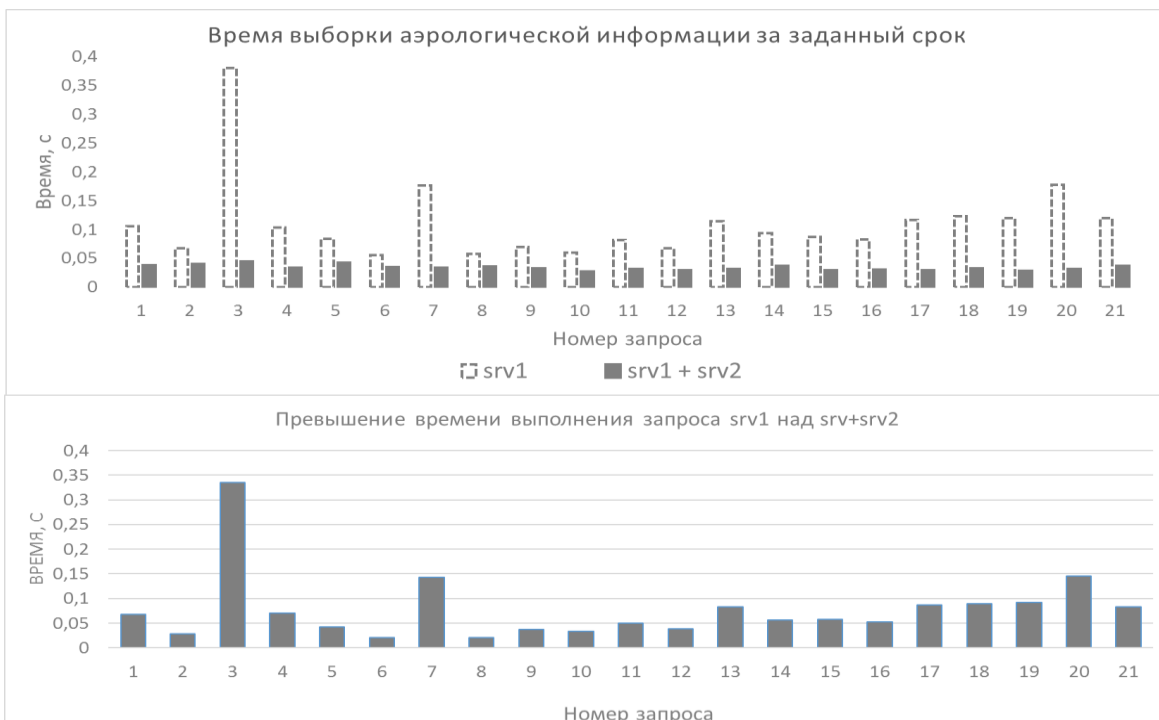


Рис. 5. Время выборки из БД данных аэрологических измерений

нения запросов. Так, для данных у поверхности Земли уменьшение времени выполнения запроса в распределенной системе в среднем составило 10%, а для аэрологических данных 69%. С увеличением вычислительных узлов помимо оперативности выполнения запросов, увеличивается и максимально возможный суммарный объем хранимых данных.

Исходя из результатов проверки адекватности модели, можно сделать вывод, что предложенная в статье модель распределения данных адекватна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в статье модель распределения ГМД может быть использована при проектировании распределенных систем баз данных в целях гидрометеорологического обеспечения ВС РФ. Состав ключа распределения может быть подобран в результате моделирования временной распределенности поступающих данных по составу и структуре, исходя из специфики решаемых задач.

Результаты натурного эксперимента по оцениванию времени получения данных из БД, спроектированной на основе предложенной авторами модели распределения, подтвердили, что время выполнения для различных типов запросов уменьшается от 10 до 69% по сравнению с существующими моделями распределения. Время выборки данных важно учитывать при формировании гидрометеорологической продукции для конечного потребителя, так как при этом задействован значительный объем разнородных ГМД. Так, для обработки информации с использованием ИНС требуются данные за период 15–20 лет, суммарный объем которых составляет $\sim 8\div 10$ Тбайт. Хранение и обработка этих данных возможны только в распределенной системе, с использованием специализированной модели распределения. Такие системы хранения данных подходят для оперативной обработки больших объемов данных, например, для обучения ИНС или создания интеллектуальных систем.

Список используемых источников

1. *Готюр И.А., Костромитинов А.В.* Методика уточнения поля геопотенциала над акваториями океанов // *Навигация и гидрография.* – 2013. – № 36. – С. 97–102.
2. *Петер Ф.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 402 с.
3. *Полетаева Н.Г.* Классификация систем машинного обучения // *Вестник Балтийского федерального университета имени И. Канта.* – 2020. – № 1 – С. 5–22.
4. Обработка больших объемов сырых астрономических данных с помощью модели вычислений MapReduce / С.В. Герасимов [и др.] // *Труды Института системного программирования РАН.* – № 27(6). – 2015. – С. 315–334.
5. *Савоськин И.В.* Исследование способов применения NoSQL и реляционных баз данных // *E-Scio.* – 2019. – №6 (33). – С. 101–108.
6. *Волушкова В.Л.* Интеграция разнородных данных в корпоративных информационных системах // *Программные системы и вычислительные методы.* – 2019. – № 1. – С. 81–90.
7. Объектно-реляционный подход к построению хранилища данных / В.Л. Малых [и др.] // *Программные системы: теория и приложения.* – 2017. – № 3(30). – С. 169–168.
8. Искусственный интеллект: в 3 кн.: справочник / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – Кн. 2: Модели и методы. – 304 с.
9. *Mbogo G.K., Rakitin S.V., Visheratina A.* High-performance meteorological data processing framework for real-time analysis and visualization // *Procedia computer science.* – 2017. – Vol. 119. – P. 334–340.
10. *Готюр И.А., Костромитинов А.В., Яременко И.А.* Метод организации обработки и хранения гидрометеорологической информации с использованием подходов «больших данных» // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – 2020. – Вып. 672. – С. 169–175.

А.П. Доронин,
доктор техн. наук, профессор;
С.И. Козлов,
доктор физико-математических наук;
Н.А. Козлова,
кандидат географических наук;
А.С. Тимощук,
кандидат техн. наук

К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗЛИЧНЫЕ СЛОИ АТМОСФЕРЫ

В статье рассмотрены результаты системного анализа в области воздействий на различные слои атмосферы. Даны общая классификация воздействий и характеристика антропогенного непреднамеренного и преднамеренного (целевого) воздействий. В работе приведен перечень основных источников таких видов воздействий.

Ключевые слова: атмосфера, слои атмосферы, антропогенные непреднамеренные воздействия, антропогенные преднамеренные воздействия, модифицирование, геофизические процессы и явления.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера с момента своего образования всегда подвергалась воздействию со стороны природных процессов и явлений, наблюдаемых в различных геосферах Земли. Так, с начала образования жизни на Земле и формирования ее элементов (морей, океанов, гор, вулканов, лесов, степей, пустынь, равнин и др.) в атмосферу стало поступать огромное количество примесей и аэрозолей различного характера.

В частности, в результате извержения вулканов в атмосферу (в основном в тропосферу и нижнюю стратосферу) выбрасывалось большое количество частиц пепла, а также различные газы. Вследствие лесных пожаров в тропосферу также поступало большое количество продуктов сгорания (например, сажа). Поверхность океанов и морей является источником поступления в атмосферу (в основном в тропосферу) газовых компонентов и аэрозолей, например, частиц морской соли (NaCl). Эти частицы соли становились в дальнейшем ядрами конденсации, способствующими образованию облаков и туманов, без которых жизнь на Земле вряд ли была бы возможной. Такого рода воздействия на атмосферу со стороны природных процессов имели место на протяжении многих тысячелетий. На этом, начальном, этапе развития жизни на Земле воздействие на атмосферу носило естественный характер, т. е. было естественным (природным) воздействием (ЕстВозд).

По мере развития человеческой цивилизации (роста численности населения, развития торговли, мореходства, сельского хозяйства, промышленности и др.) свой вклад в естественное воздействие на атмосферу стал вносить и человек (гр. *antropos* – антропо..., первая составная часть сложных слов, обозначающая «относится к человеку» [1]). Следовательно, на каком-то этапе эволюции общества появляется новый вид воздействия на атмосферу – со стороны человека, т. е. антропогенное воздействие.

Наиболее заметно влияние антропогенного воздействия на атмосферу (гр. *atmos* – шар, сфера – газообразная оболочка Земли и других небесных тел: планет, Солнца и иных звезд [1]) стало проявляться в середине XIX века, стремительно возрастая в XX веке. К настоящему времени оно достигло такого уровня, что игнорировать его стало уже невозможно. Следует отметить, что антропогенное воздействие на атмосферу на сегодняшний день затрагивает уже не только нижние слои атмосферы (тропосферу) и слои стратосферы (до высот 20–25 км), но и более высокие слои атмосферы и околоземного космического пространства

(вплоть до высоты 36000 км, на которой располагаются геостационарные спутники). Целью настоящей работы являются обоснование классификации воздействий на различные слои атмосферы и определение перечня основных источников выделенных воздействий.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗЛИЧНЫЕ СЛОИ АТМОСФЕРЫ

Рассмотренное выше антропогенное воздействие на атмосферу (равно как и на другие сферы Земли), обусловленное необходимостью развития хозяйственных отраслей и создания соответствующей инфраструктуры для обеспечения жизнедеятельности человеческого общества, является как бы сопутствующим фактором. Вследствие этого данный вид антропогенного воздействия на атмосферу можно назвать непреднамеренным антропогенным воздействием (НАнВозд).

К середине XX века обстановка в мире сложилась таким образом, что эти два воздействия на атмосферу, в совокупности, (ЕстВозд и НАнВозд) привели к тому, что возникла острая необходимость в решении ряда новых проблем [загрязнение природной среды, нехватка воды в ряде регионов мира, засорение ОКП космическим мусором, увеличение числа чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера и др.].

Одним из путей решения перечисленных выше проблем стал путь, заключающийся в разработке и практическом применении методов и средств модифицирования геофизических процессов и явлений (МИС МОДИФ ГФПЯ). Модифицирование ГФПЯ предполагает применение таких методов и средств, которые позволяют вносить в них определенное количество вещества (например, химические реагенты) или энергии (например, лазерное излучение) с целью реализации принципа управления. Данный принцип управления, сформулированный академиком Е.К. Фёдоровым [2], предполагает возможность за счет внесения в природные объекты (объекты модифицирования) небольшого количества вещества или энергии получить эффект, во много раз превышающий затраченные ресурсы. Принцип управления ГФПЯ предполагает наличие в природной среде состояний неустойчивости. Применительно к атмосферным процессам и явлениям (в частности, к облакам и туманам) можно выделить следующие виды неустойчивостей [3]:

– *фазовая неустойчивость* – предполагает наличие в облаке (тумане) капель воды и ледяных частиц. Реализуется данный вид неустойчивости только в переохлажденных облаках (туманах), наблюдается при отрицательных значениях температуры воздуха;

– *коллоидальная неустойчивость* – предполагает наличие в облаке (тумане) облачных капель различных размеров. Реализуется данный тип неустойчивости в теплых облаках (туманах), наблюдаемых при положительных значениях температуры воздуха;

– *вертикальная неустойчивость атмосферы* – реализуется в конвективных облаках, наблюдающихся, например, в умеренных широтах, главным образом – в теплое полугодие.

Поскольку применение МИС МОДИФ ГФПЯ осуществляется также человеком, то оно тоже будет антропогенным. Однако, в отличие от первого вида антропогенного воздействия (непреднамеренного), второй вид антропогенного воздействия будет являться преднамеренным или целевым (целенаправленным), т. е. преднамеренным антропогенным воздействием (ПАНВозд) или целевым антропогенным воздействием (ЦАНВозд).

С учетом вышеизложенного в настоящей работе классификацию воздействий на атмосферу в общем случае предлагается представить в виде, показанном на рис. 1. Анализируя данные, представленные на рис. 1, можно сделать вывод о том, что возникает необходимость, по аналогии с источниками естественного воздействия на атмосферу, в определении также источников воздействия на атмосферу при НАнВозд и ПАНВозд (ЦАНВозд). Исходя из этого

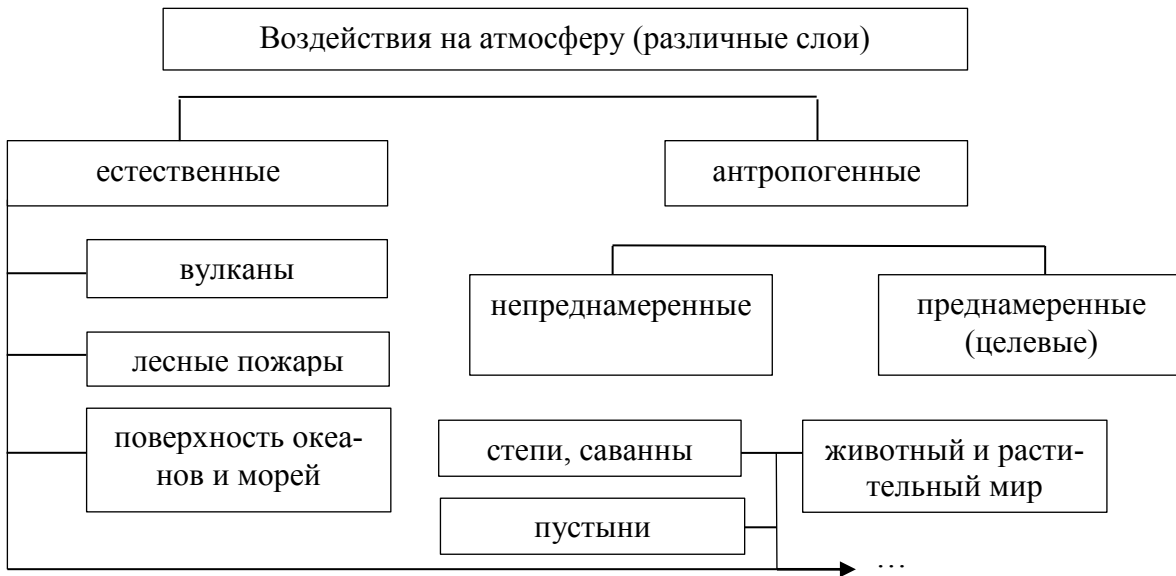


Рис. 1. Классификация воздействий на атмосферу

на рис. 2 показаны основные источники непреднамеренного антропогенного воздействия на атмосферу [4–9].



Рис. 2. Основные источники непреднамеренных антропогенных воздействий на атмосферу

Отметим, что с разных позиций наиболее важное значение, на наш взгляд, имеют выбросы автомобильного транспорта, полеты авиации, запуски ракет, загрязнение околоземного космического пространства (ОКП), теплоэнергетика, ядерные испытания.

Сегодня в литературе существует довольно большое количество публикаций, посвященных качественным и количественным оценкам загрязнения различных природных сред, в том числе и различных слоев атмосферы (включая ОКП) [4–9].

Однако более сложная ситуация складывается с определением источников преднамеренного (непреднамеренного) воздействия на атмосферу. Это обстоятельство, в свою очередь, обуславливает необходимость проведения исследований по определению перечня ГФПЯ как возможных объектов модифицирования со стороны человека. Результаты выполненного в этом направлении системного анализа представлены на рис. 3 [2, 3, 5, 6, 8–11].

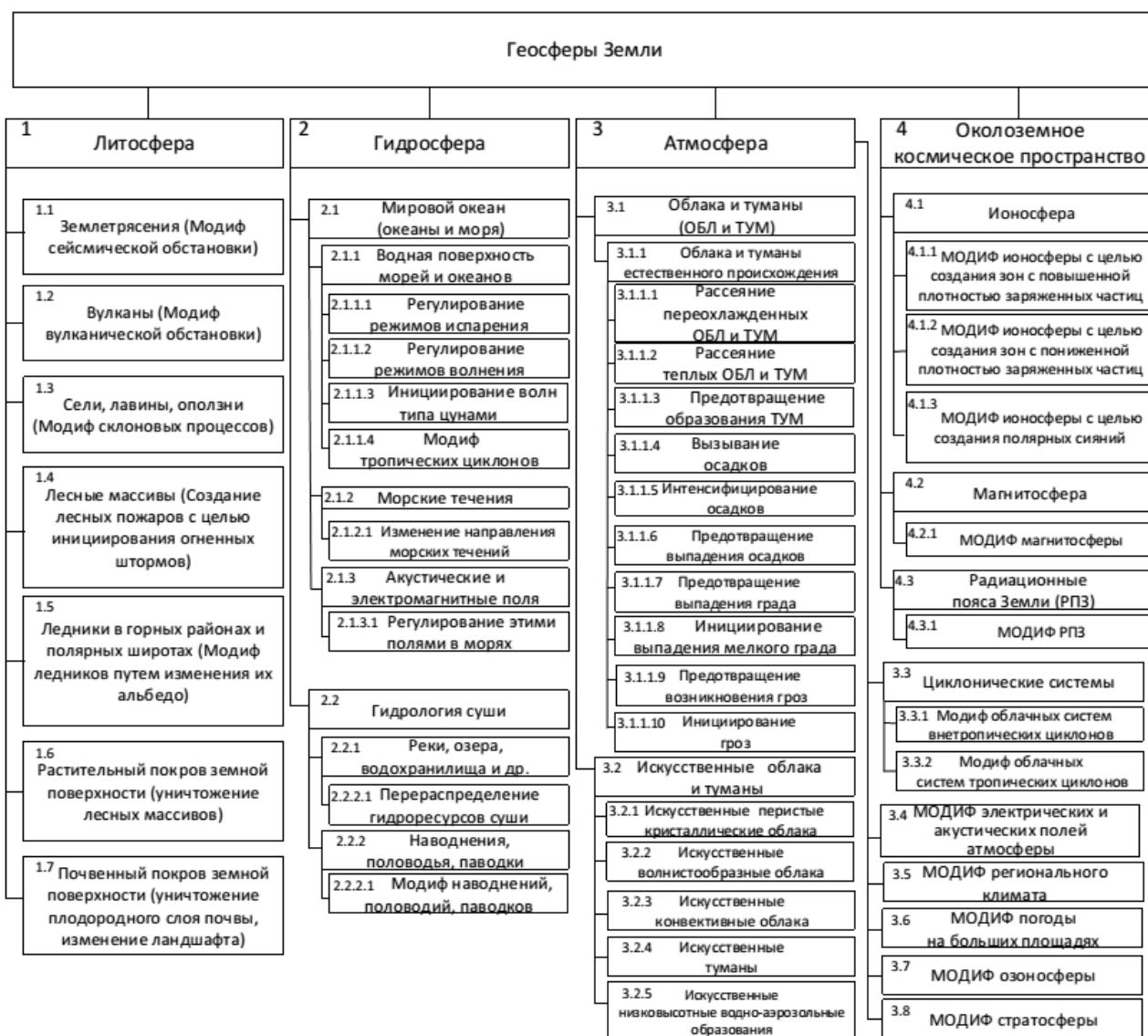


Рис. 3. Перечень основных геофизических процессов и явлений как возможных объектов модифицирования в различных геосферах Земли

Из данных, представленных на рис. 3, следует, что объектами модифицирования на современном этапе могут являться процессы и явления, наблюдающиеся во всех геосферах Земли. Вместе с тем необходимо отметить, что из всего перечня ГФПЯ наиболее существен-

ное влияние на различные слои атмосферы может наблюдаться при воздействии на следующие из этих слоев:

- в литосфере (1.1–1.7);
- в гидросфере (2.1.1; 2.2.1; 2.2.2);
- в атмосфере (3.1–3.8);
- в ОКП (4.1).

Определение перечня ГФПЯ, модифицирование которых приведет к определенному изменению состояния различных слоев атмосферы, неразрывно связано с обоснованием уровня разработки методов и средств воздействия именно на эти процессы и явления.

Проведенные в этом направлении исследования позволили установить, что современный уровень разработок МиС МОДИФ ГФПЯ достаточно широк: от теоретических исследований (как, например, в случае МОДИФ вулканов) до оперативного применения (как, например, в случае рассеяния облаков и вызывания осадков). Основываясь на полученных результатах исследования, представляется возможным определить перечень ГФПЯ, воздействие на которые наиболее вероятно в современных условиях. К их числу относятся:

- переохлажденные облака различных форм (волнистообразные, слоистообразные и конвективные) и туманы;
- теплые облака различных форм [волнистообразные и конвективные (в основном, кучевые)];
- искусственные облака различных форм [перистые кристаллические, волнистообразные (слоистые, слоисто-кучевые, высоко-кучевые, теплые и кристаллические)], облака и туманы;
- лесные массивы;
- склоновые процессы (сели, лавины, оползни);
- гидрологические процессы (реки, озера, водохранилища и др.);
- тропические циклоны;
- ионосфера.

Следует заметить, что по мере развития науки и техники возможности человека будут возрастать, следовательно, будет расширяться и перечень ГФПЯ, поддающихся модифицированию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье предложена классификация воздействий на атмосферу, в соответствии с которой можно рассматривать два вида воздействий: естественного и антропогенного характера. При этом антропогенные воздействия могут быть как непреднамеренными (сопутствующими хозяйственной деятельности человека), так и преднамеренными (целевыми, целенаправленными).

2. Определены основные источники непреднамеренного антропогенного воздействия на атмосферу, включающие в себя: химические и металлургические производства; карьеры, где производится добыча полезных ископаемых взрывным способом; авиационные средства, совершающие полеты в атмосфере; источники электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, включая ЛЭП; теплоэлектростанции и АЭС; запуски ракет; космические объекты, разрушающиеся при входе в атмосферу; возрастающее количество космических аппаратов по различным орбитам и связанный с этим риск роста «космического мусора»; ядерные испытания.

3. Определен перечень процессов и явлений как объектов модифицирования, при воздействии на которые возможно наиболее существенное влияние на различные слои атмосферы на современном этапе. Установлено, что к их числу могут быть отнесены:

- переохлажденные и теплые облака различных форм и туманы;
- искусственные облака различных форм и туманы;

- лесные массивы;
- склоновые процессы (сели, лавины, оползни);
- гидрологические процессы (реки, озера, водохранилища);
- тропические циклоны;
- ионосфера.

4. Проблема применения средств модифицирования на природные процессы и явления неизбежно связана с проведением специальных исследований по оцениванию возможных экологических последствий в разных геосферах Земли (включая и различные слои атмосферы).

5. Учитывая актуальность проблемы для решения прикладных, экологических и научных задач целесообразным является создание специальной программы под условным названием «Воздействие на геофизические процессы и явления в интересах решения прикладных задач».

Авторы полагают, что полученные в настоящей работе результаты могут оказаться полезными как для разработки методов и средств модифицирования геофизических процессов и явлений, так и для проведения исследований, связанных с оцениванием экологических последствий такого рода работ, когда эти последствия сказываются на состоянии различных геосфер, включая и разные слои атмосферы.

Список используемых источников

1. Современный словарь иностранных слов. – СПб.: Дуэт, Комета, 1994. – 740 с.
2. Федоров Е.К. Активные воздействия на метеорологические процессы // Вестник АН СССР. – 1962. – № 9. – С. 73–78.
3. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
4. Смирнова Н.В., Козлов С.И. Озоновые полярные «дыры» и среднеширотные аномалии (обзор) // Прикладная физика. – 1998. – № 6. – С. 40–60.
5. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду / под общ. ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, М.В. Сильникова. – М.: изд-во ГЕОС, 2016. – 794 с.
6. Вениаминов С.С. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 190 с. – (Механика, управление и информатика).
7. Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А. Электрические поля техногенных и природных процессов. – М.: изд-во ГЕОС, 2018. – 459 с.
8. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей космического назначения: монография / В.В. Адушкин [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 372 с.
9. Экологический мониторинг ракетно-космической деятельности. Принципы и методы / под ред. академика РАН Н.С. Касимова, члена-корреспондента РАН О.А. Шпигуна. – М.: РЕСТАРТ, 2011. – 467 с.
10. Доронин А.П., Белевич М.В., Никульшин Б.Ю. Перечень геофизических процессов и явлений как возможных объектов модифицирования // Сб. материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-техн. конф., 12–14 мая 2009. – Казань, 2009. – Ч. II. – С. 126–127.
11. Шереметьев Р.В. Разработка методического подхода и рекомендаций по применению методов и средств модификации слоистообразной облачности для решения народнохозяйственных прикладных задач: дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук [по спец. 25.00.30 «Метеорология, климатология, агрометеорология»]. – Нальчик, 2010. – 193 с.

И.В. Чернов,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТОВ НАПРАВЛЕНИЙ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

В данной статье представлен подход по обоснованию методики определения азимутов направлений, позволяющий получать требования к числу гиротеодолитов в комплекте, числу выполняемых ими измерений и приемов геодезической привязки. Приведенный подход позволяет устанавливать рабочие допуски для производства измерений. Кроме того, приведенный математический аппарат позволяет выполнить проектирование методики для определения азимутов направлений с заданной точностью. Исходными данными для обоснования методики являются требования к точности получения азимутов направлений, что позволяет подойти к обоснованию требований к определению приборной поправки гиротеодолита с позиции обеспечения заданного результата ориентирования.

Ключевые слова: гиротеодолит, гироскоп, азимут, ориентирование, заданная точность.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения решения широкого круга технических, экономических задач требуется выполнение геодезической подготовки сложных технических систем и комплексов, а также районов их расположения и применения. Наиболее актуальной задачей является геодезическая подготовка районов (ГПР), не имеющих исходной геодезической основы (ИГО), либо районов, обеспеченных ИГО с недостаточной плотностью. В данных условиях наиболее целесообразно применение методов геодезической подготовки, обладающих высокой автономностью [1], например метода гироскопического ориентирования [2, 3].

Для реализации метода гироскопического ориентирования в руководстве по астрономо-геодезическим работам и других руководящих документах [4, 5] установлены точности и требования к методикам их реализации, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Обобщенные данные по определению астрономического азимута
гироскопическим методом

Тип гиротеодолита	Число гиротеодолитов и число пусков (в скобках)					Время одного пуска
	2, "	3, "	5, "	10, "	15, "	
ГТ-3	1(2*)	1(1*)	-	-	-	~ 45 мин
15Ш29	-	2(2)	2(2)	2(1)	-	до 45 мин
Ги-БЗ	-	2(3) 3(2)	2(1)	1(1)	-	45 мин
Ги-Б2	-	-	2(3) 3(2)	2(2)	2(1), 1(2)	40-45 мин

*Программа измерений состоит из двух пусков (приемов измерений) с поворотом корпуса гироблока между пусками на 180°.

Разработанные десятилетия назад методики выполнения ГПР, в частности методики определения азимутов направлений, были предназначены для реализации таких методик гиротео-

далитами (гирокомпасами), которые на сегодняшний день устарели и сняты с производства. Кроме того, спектр задач, решаемых при выполнении ГПР, расширился. Одновременно ужесточились требования к точности и оперативности их выполнения. Часто современные сложные технические системы и комплексы требуют индивидуального подхода при решении задач их геодезической подготовки, что не всегда позволяют реализовать имеющиеся стандартные методики.

Таким образом, становится актуальной задача по разработке универсальной методики определения азимутов направлений с заданной точностью.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТОВ НАПРАВЛЕНИЙ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

В общем случае определение азимутов направлений можно представить как последовательное определение: северного направления астрономического меридиана точки установки прибора, исправление приборной поправкой значения северного направления астрономического меридиана и определение значения ориентируемого направления [2, 6]. Вычисление значения астрономического азимута ориентируемого направления выполняется по формуле

$$a = M - N_0 + \Delta, \quad (1)$$

где Δ – приборная поправка;

M – отчет по горизонтальному кругу при наведении зрительной трубы на местный предмет;

N_0 – отсчет, соответствующий северному направлению меридиана точки установки гиротеодолита;

a – азимут направления.

Для гиротеодолитов, разделенных на два независимых устройства, которые не имеют механического сопряжения (ГТ-3 или САГ), – гироскопическая часть (гироблок) и теодолитная часть (теодолит или тахеометр), СКП определения азимута имеет вид [7, 8]

$$m_a^2 = m_M^2 + m_N^2 + m_\Delta^2, \quad (2)$$

где m_M – СКП определения горизонтального направления теодолитной частью;

m_N – СКП определения северного направления астрономического меридиана;

m_Δ – СКП определения приборной поправки.

В случае, если известны коэффициенты понижения точности [6, 9] для используемого гиротеодолита, выражение (2) примет вид

$$m_a^2 = K_n^2 m_M^2 + K_n^2 m_N^2 + m_\Delta^2, \quad (3)$$

где K_n – коэффициент понижения точности для гиротеодолита.

Известно [8, 10], что при повышении числа измерений точность измерений повышается обратно пропорционально корню из числа этих измерений:

$$m_M = \frac{\mu_M}{\sqrt{n_B}}; \quad m_N = \frac{\mu_N}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

где μ_M – СКП определения горизонтального направления одним приемом измерений;

μ_N – СКП определения северного направления астрономического меридиана одним приемом измерений;

n – число измерений северного направления астрономического меридиана;

n_B – число измерений горизонтального направления.

Значения величин СКП μ_M и μ_N определяются при калибровке (эталонировании) гиротеодолита по формулам [2, 3]:

$$\mu_N = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n v_j^2}{n-1}}, \mu_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_B} v_i^2}{n_B-1}}, \quad (5)$$

где v_j – отклонение единичных значений измеренной величины северного направления астрономического меридиана от ее окончательного (среднего) значения;

v_i – отклонение единичных значений измеренной величины горизонтального направления от ее окончательного (среднего) значения.

Подставив выражения (4) в формулу (3), получим зависимость СКП определения азимута направления от числа выполненных измерений:

$$m_a^2 = K_n^2 \frac{\mu_M^2}{n_B} + K_n^2 \frac{\mu_N^2}{n} + m_{\Delta}^2. \quad (6)$$

Величина СКП m_{Δ} определения приборной поправки также должна быть известна из результатов крайних эталонирований.

Гиротеодолиты проектируются таким образом, чтобы точность определения горизонтального направления существенно превышала точность определения северного направления астрономического меридиана. Например, гиротеодолит Ги-Б3 предназначен для определения азимутов направлений с СКП 5-8", его угломерная часть относится к классу теодолитов Т2, в комплект гиротеодолита ГТ-3 (СКП определения азимута 3") входит оптико-механический теодолит Т1А. Такой подход обусловлен следующим правилом: «если погрешность аргумента в три и более раз меньше погрешности функции, то погрешностью аргумента допустимо пренебречь» [7, 8]. Исходя из указанного правила, следует обосновывать число приемов определения горизонтального направления:

$$\frac{1}{3} m_a \geq K_n \frac{\mu_M}{\sqrt{n_B}}, \quad (7)$$

$$n_B \geq K_n^2 \frac{9\mu_M^2}{m_a^2}. \quad (8)$$

где m_a^{δ} – заданная (директивная) СКП определения астрономического азимута.

Для обоснования требуемого числа приемов определения северного направления астрономического меридиана, обеспечивающих заданную точность определения азимута, необходимо составить неравенство

$$\frac{m_a^{\delta 2} - m_{\Delta}^2}{K_n^2} \geq \frac{\mu_N^2}{n}, \quad (9)$$

Полученные зависимости (8) и (9), на основе заданной СКП определения астрономического азимута и метрологических характеристик гиротеодолита, позволяют обосновать необходимое для достижения заданной точности определения азимута число приемов измерений угломерной и гиротеодолитической частью.

Важной частью обоснования методики любых геодезических измерений является обоснование рабочих допусков – предельно допустимых расхождений между величинами, полученными из нескольких измерений. Это связано с нецелесообразностью выполнения большого числа измерений (обычно необходимо более 20 измерений) [8]. Выполнение большого числа измерений ведет к нерациональному расходу ресурсов, затрачиваемых на определение азимутов. В качестве рабочих допусков следует принять предельную ошибку измерений W^{δ} [7]. Для установления ее значения обычно назначаются вероятности [8, 10]:

$$\begin{aligned} P\{-3m < x < 3m\} &= 0,997; \\ P\{-2,5m < x < 2,5m\} &= 0,988; \\ P\{-2m < x < 2m\} &= 0,955. \end{aligned} \quad (10)$$

В общем виде рабочий допуск можно представить как $W^{\delta} \geq |x_1 - x_2|$, где x – результаты измерений. В рассматриваемом случае критерий пригодности G измерений имеет вид

$$G: \begin{cases} 1, \text{ при } W^{\delta} \geq |x_{n-1} - x_n|; \\ 0, \text{ при } W^{\delta} < |x_{n-1} - x_n|, \end{cases} \quad (11)$$

где 1 – пригодно;
0 – непригодно.

С одной стороны, использование в качестве рабочего допуска $W^{\delta} = 2m$ целесообразно при выполнении геодезических работ с предельной точностью. С другой стороны, использование в качестве рабочего допуска $W^{\delta} = 3m$ более вероятно приведет к принятию в обработку грубых результатов. Поэтому целесообразно принять средний допуск

$$W^{\delta} = 2,5m \geq |x_1 - x_2|. \quad (12)$$

Выражения (8), (9) и (12) позволяют выполнить обоснование методики определения азимутов направлений с заданной точностью одним гиротеодолитом. Применение одиночного гиротеодолита допускается при определении азимутов направлений с СКП $\geq 10''$ [2, 3]. Для определения азимутов направлений с СКП $< 10''$ применяются гиротеодолитные комплекты (ГТК). Для составления ГТК выбираются гиротеодолиты одного типа и точности [11], определение приборных поправок всех гиротеодолитов комплекта производится на одном и том же направлении с одинаковой точностью [11]. Априорно точность определения азимута с применением ГТК можно рассчитать по формуле [6, 12]

$$m_{\text{ГТК}} = K_R \frac{m_a}{\sqrt{R}}, \quad (13)$$

где $m_{\text{ГТК}}$ – СКП определения азимута с применением ГТК;
 R – число гиротеодолитов в ГТК;
 K_R – коэффициент понижения точности для ГТК.

АЛГОРИТМ ОБОСНОВАНИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТОВ НАПРАВЛЕНИЙ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Выражения (8), (9), (12) и (13) позволяют представить алгоритм обоснования методики определения азимутов направлений с заданной точностью (рис. 1). Исходными данными, необходимыми для реализации алгоритма, являются: директивная СКП $m_{\text{ГТК}}^{\delta}$ определения азимутов, μ_M , μ_N , m_{Δ} , R , при наличии коэффициентов K_n , K_R . Как отмечалось ранее, при директивной СКП $\geq 10''$ $R \geq 1$, а при СКП $< 10''$ $R \geq 2$.

Алгоритм должен включать четыре основных шага:

- на *первом шаге*, используя выражение (13), необходимо рассчитать директивную точность определения азимута одним гиротеодолитом m_a^{δ} ;
- на *втором шаге*, используя выражение (8), необходимо рассчитать требуемое число измерений n_{β}^T теодолитной частью, применив выражение (9), необходимо рассчитать требуемое число измерений n^T гироскопической частью; величины R , n_{β}^T , n^T должны быть округлены до большего целого значения, при $R=1$ величины n_{β}^T , $n^T \geq 2$;
- на *третьем шаге* реализуются процессы контрольного расчета СКП определения азимута, последовательно по формулам (6) и (13), а также реализуется оценивание пригодности полученных значений результирующей СКП и минимально требуемого числа измерений;
- на *четвертом шаге* реализуется расчет служебных допусков.

Сам порядок действий методики (порядок выполнения измерений) должен учитывать конструктивные особенности ГТ и реализовывать принцип определения астрономического азимута данным гиротеодолитом.

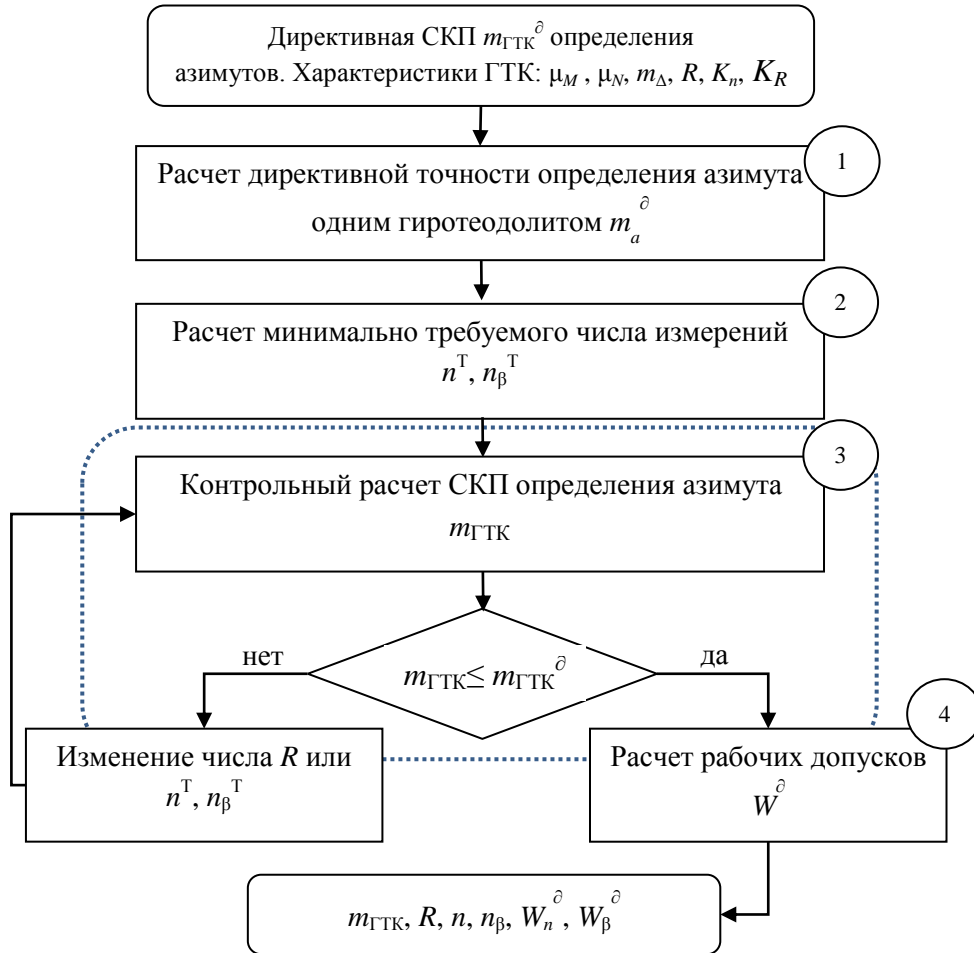


Рис. 1. Алгоритм обоснования методики определения азимуты направлений с заданной точностью

ПРИМЕР ОБОСНОВАНИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТОВ НАПРАВЛЕНИЙ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Пусть требуется определить астрономический азимут направления с СКП $m_{ГТК} \leq 5''$. Для работ доступен ГТК из двух Ги-БЗ ($R=2$) со следующими метрологическими характеристиками: СКП определения горизонтального направления одним приемом измерений $\mu_M = 5''$, СКП определения северного направления астрономического меридиана одним приемом измерений $\mu_N = 10''$, СКП определения приборной поправки $m_\Delta = 2''$, коэффициенты понижения точности $K_n = K_R = 1$.

Для описанного случая на основании выражения (13) получим $m_a^\delta \approx 7,07''$; используя формулу (8), рассчитаем $n_\beta^T = 4,5$, после округления до ближайшего целого четного значения $n_\beta^T = 4,5$; на основании выражения (9) вычислим значение $n^T \approx 2,2$, после округления n^T составит 2 приема измерений; применив формулу (6), получим $m_a \approx 7,8''$; применив формулу (13), получим $m_{ГТК} \approx 5,5''$ (рис. 2); так как $m_{ГТК} > m_{ГТК}^\delta$, примем $n^T = 3$ и $n_\beta^T = 3$; применив формулы (6) и (13), получим $m_{ГТК} \approx 4,8''$; используя выражение (12), рассчитаем рабочие допуски: $W_n^\delta = 14$, $W_\beta^\delta = 7$.

Таким образом, в рассматриваемом случае методика определения азимута ГТК из двух гиротеодолитов должна включать по три измерения значений северного направления астро-

номического меридиана и величины горизонтального направления каждым гиротеодолитом комплекта.

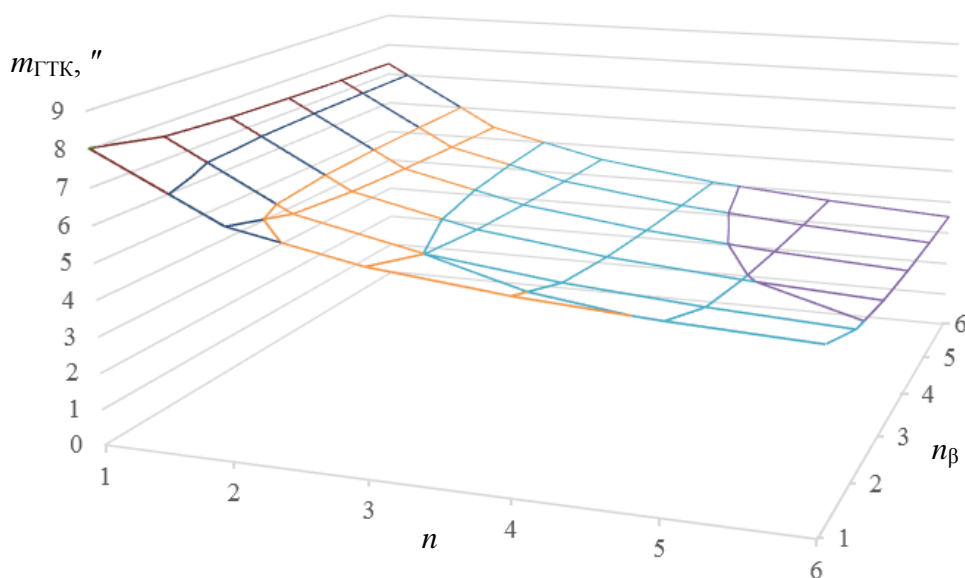


Рис. 2. Зависимость СКП определения астрономического азимута комплектом из двух гиротеодолитов от числа измерений

Следует отметить, что расхождения между значениями северного направления астрономического меридиана не должны превосходить $14''$, а расхождения между значениями горизонтального направления не должны превосходить $7''$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный подход по обоснованию методики определения азимутов направлений позволяет получать требования к числу гиротеодолитов в комплекте, числу выполняемых ими измерений и приемов геодезической привязки. Также этот подход позволяет устанавливать рабочие допуски для производства измерений. Кроме того, приведенный математический аппарат позволяет выполнить проектирование методики для определения азимутов направлений с заданной точностью.

Исходными данными для обоснования методики являются требования к точности получения азимутов направлений, что дает возможность выполнить обоснования требований к определению приборной поправки гиротеодолита с позиции обеспечения заданного результата ориентирования.

Список используемых источников

1. Подход к оцениванию качества геодезического обеспечения удаленного района / И.В. Чернов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 103–110.
2. Воронков Н.Н. Гироскопическое ориентирование: учебник. – М.: ВИА им. В.В. Куйбышева, 1968. – 342 с.
3. Воронков Н.Н., Кутырев В.В., Ашимов Н.М. Гироскопическое ориентирование. – М.: Недра, 1980. – 295 с.

4. Руководство по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. – М.: РИО ВТС, 1979. – Ч. 3: Гироскопическое ориентирование. – 224 с.
5. Технические указания по применению гиротеодолитов ГТ-3 при топогеодезическом обеспечении войск. – М.: РИО ВТС, 1991. – 53 с.
6. *Алексеев В.Ф., Левадный Ю.В., Чернов И.В.* Обоснование эмпирического коэффициента понижения точности гироскопических наблюдений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С. 132–138.
7. *Чернов И.В.* Методика определения приборной поправки гиротеодолита с заданной точностью // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 192–200.
8. *Астапович А.В.* Теория математической обработки измерений: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – Ч. 1: Ошибки измерений. – 191 с.
9. Способ определения коэффициента понижения априорной оценки точности определения азимута гиротеодолитом Рос. Федерация: пат. 2696807 МПК: G01C 1/02 / [Чернов И.В.; заявитель и патентообладатель Чернов И.В.]. – № 2019100954; заявл. 10.01.19; опубл. 06.08.19, Бюл. № 22. – 3 с.
10. *Русяева Е.А.* Теория математической обработки геодезических измерений – М.: МИ-ИГАиК, 2016. – Ч. I: Теория ошибок измерений. – 56 с.
11. *Чернов И.В., Суворов С.А., Реснянский Н.Б.* Подход к определению эмпирического коэффициента понижения точности наблюдений гироскопическим комплектом // Информация и космос. – 2019. – № 4. – С. 129–132.
12. Способ определения коэффициента понижения априорной оценки точности определения азимута гиротеодолитным комплектом Рос. Федерация: пат. 2696808: МПК G01C 1/02 / [Чернов И.В.; заявитель и патентообладатель Чернов И.В.]. – № 2019100953; заявл. 10.01.19; опубл. 06.08.19, Бюл. № 22. – 3 с.

К.М. Абросимов;
К.О. Гнидко,
доктор техн. наук, доцент;
С.А. Макаров;
А.С. Сергеев

СКРЫТОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ СОЦИАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ В УЧЕБНОМ КОЛЛЕКТИВЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ СРЕДСТВ ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ

В работе представлены результаты экспериментального исследования по скрытому выявлению социальных связей в учебном коллективе на основе данных объективного контроля с применением биометрических технологий. Изложена схема проведения эксперимента, а также кратко описаны итоги применения разработанного программного комплекса для формирования графов социальных связей целого учебного коллектива и отдельных обучающихся без применения классических опросных методов. Полученные результаты показали практическую полезность разработанного подхода, а также алгоритмов и программных компонент для скрытого выявления структуры социальных связей в учебном коллективе и для раннего выявления и профилактики девиантного поведения на основе данных средств объективного контроля на примере системы контроля управления доступом и заказа питания (СКУД ЗП).

Ключевые слова: сбор и обработка информации, социальный граф, социометрия, биграмма, объективный контроль, профилактика девиантного поведения.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование посвящено проблематике выявления и изучения взаимоотношений в социальных группах (подразделениях обучающихся) с использованием скрытого наблюдения в целях заблаговременного определения неформальных лидеров, «изгоев» (лиц, не имеющих устойчивых социальных связей в коллективе), а также для предупреждения общественно опасных форм отклоняющегося (девиантного) поведения (вовлеченность в деятельность религиозных сект, террористических и криминальных организаций, суицидальные риски и т. д.). Классические методы сбора социологической информации (опросы, анкетирования и беседы) оставляют возможность сознательного сокрытия информации по личным мотивам, вследствие утомления испытуемого и даже в результате сознательного противодействия исследователю по причине личной неприязни. Таким образом, изучение полученных результатов при проверке гипотез может приводить к ошибочным выводам, а также к ухудшению качества моделей, построенных на основе имеющихся данных.

При применении предложенного подхода, в отличие от существующих способов, в качестве источника исходной информации для анализа социальной структуры группы используют реализуемую в Министерстве обороны РФ систему контроля управления доступом и заказа питания (СКУД ЗП). В такой системе факт и время прибытия обучающихся для приема пищи в столовую образовательной организации регистрируются с использованием биометрических способов. Скрытый для испытуемых характер исследования, большой размер выборки (общее число обработанных записей превышает 10^5) и длительный интервал наблюдений позволяют существенно повысить объективность получаемых результатов.

Ключевая гипотеза исследования заключается в том, что обучающиеся, находящиеся в приятельских и (или) дружеских отношениях, как правило, следуют друг за другом в общей очереди для сохранения возможности общения в период ожидания. Таким образом, сохраняемая в системе после каждого приема пищи информация об очередности обучающихся позволяет построить социальный граф коллектива (подразделения обучающихся), который в зависимости от величины выборки и примененных методов анализа будет показывать тенденции в отношениях, сформировавшихся в подразделении за определенный период. Соот-

ветственно, целью исследования является экспериментальная проверка изложенной выше гипотезы.

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема проведения экспериментального исследования включала в себя пять основных этапов:

- 1) сбор исходных данных СКУД ЗП в виде файлов формата csv;
- 2) предварительная обработка данных (группировка записей по терминалам биометрической идентификации, сортировка по времени, обработка аномальных значений и выбросов, формирование биграмм – пар значений, соответствующих уникальным идентификаторам военнослужащих, следующих в очереди непосредственно друг за другом);
- 3) формирование дискретных вариационных рядов биграмм и сохранение полученных данных в формате описания графов GML (Graph Modelling Language) в виде неориентированного взвешенного графа $G = \{V, E\}$. При этом множеству вершин графа $\{V\}$ соответствуют отдельные военнослужащие, множеству ребер $\{E\}$ – связи между ними, а веса ребер показывают количество повторов зафиксированного факта соседства в очереди двух человек за период наблюдений;
- 4) визуализация и первичный анализ графа социальных связей в подразделении. На данном этапе путем установления порогового значения τ для весов ребер графа G выявляются статистически достоверные социальные связи, устойчивые малые социальные группы, неформальные лидеры, «изгои» с аномально малым числом социальных связей, а также обучающиеся, исполняющие роли переносчиков информации между малыми группами и посредников (в теории устойчивости слабых связей Граннеттера таких лиц принято называть маргиналами [2]);
- 5) на последнем этапе исследования осуществляются статистическая обработка полученных результатов, формирование выводов и рекомендаций по их практическому применению.

Общий вид схемы проведения эксперимента представлен на рис. 1.

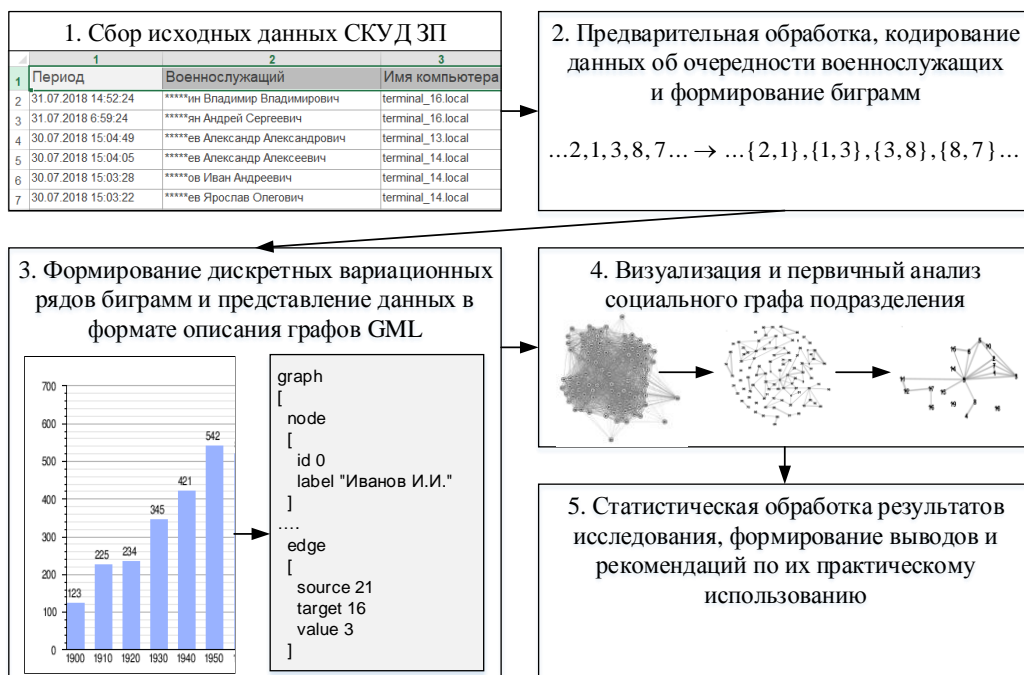


Рис. 1. Схема проведения экспериментального исследования

Для автоматизации перечисленных этапов на функционально-ориентированном языке высокого уровня *Python* был разработан программный комплекс (ПК), позволяющий получить граф социальных связей не только подразделения обучающихся в целом, но и отдельного обучающегося, а также производить фильтрацию ребер графа по настраиваемому пороговому значению. Рассмотрим некоторые результаты, полученные в ходе его применения.

В *первом варианте* применения разработанного ПК решается задача построения графа связей целого коллектива. Так, на рис. 2 представлен граф, полученный по итогам выполнения этапов 1–4 экспериментального исследования для отдельно взятого курса без применения фильтрации по весовым коэффициентам ребер.

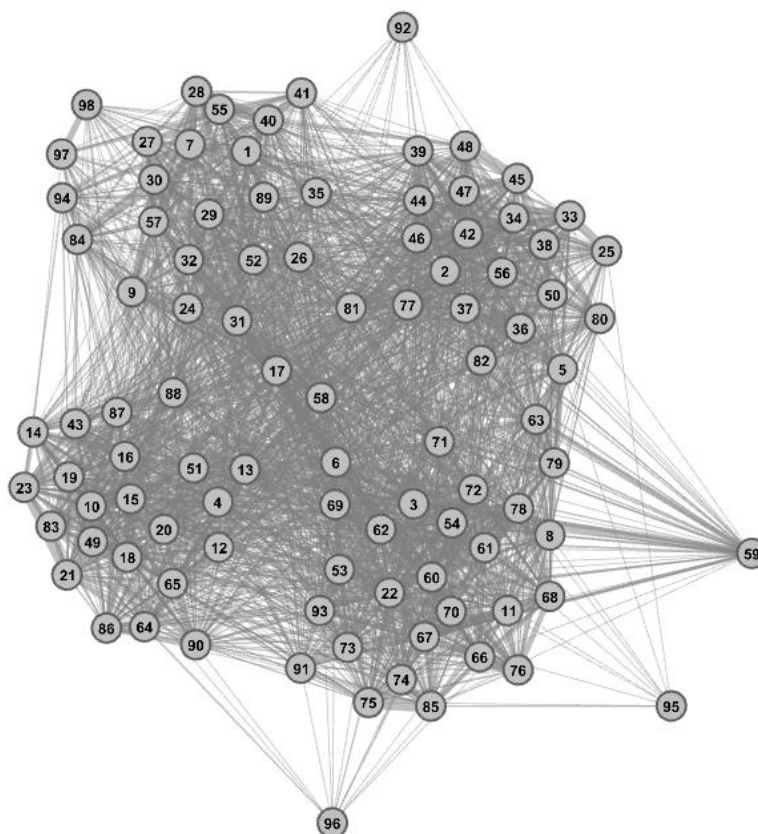


Рис. 2. Исходный граф связей в коллективе без фильтрации по весам ребер

Очевидно, что такое представление малоинформативно в силу наличия большого количества связей, являющихся следствием действий случайных факторов на протяжении периода наблюдения. Тот же граф после отсечения всех ребер, чей вес оказался меньше порогового значения $\tau = M_e - 3\sigma$, где M_e – оценка математического ожидания веса ребра по выборке, а σ – среднеквадратическое отклонение веса ребра соответственно, представлен на рис. 3.

Анализ рис. 3 позволяет утверждать, что вершины 8, 35, 58, 91, 92, 94, 95, 96 имеют аномально малое количество социальных связей (установление причин выходит за рамки настоящего исследования), а вершина 6, например, претендует на роль «лидера». Также примечателен треугольник 74-75-85, представляющий собой пример устойчивой микрогруппы.

Второй вариант применения ПК позволяет построить отранжированное по весам ребер представление круга общения субъекта. Так, на рис. 4 представлена картина «личных» социальных связей для вершины № 3 – наиболее прочные симпатии и антипатии обучающегося.

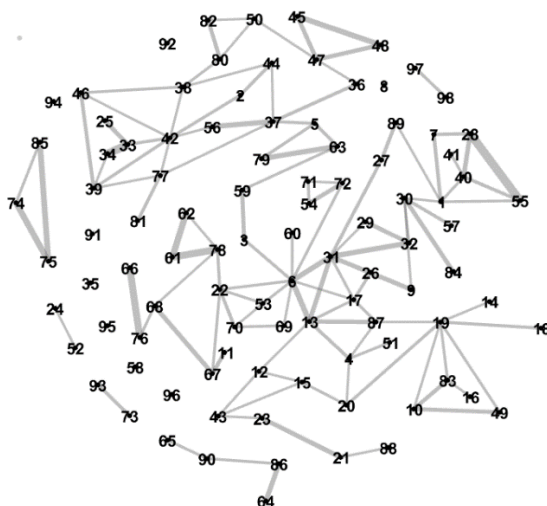


Рис. 3. Граф социальных связей в коллективе после фильтрации по весам ребер

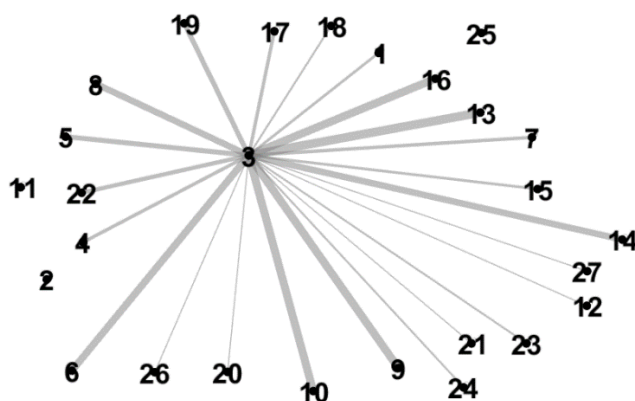


Рис. 4. Индивидуальный социальный граф для вершины №3

Таким образом, в ходе экспериментального исследования продемонстрирована практическая пригодность применения разработанного подхода, а также алгоритмов и программных компонент для скрытого выявления структуры социальных связей в учебном коллективе на основе анализа данных СКУД ЗП и подобных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный подход, а также разработанный в ходе исследования программный комплекс, реализующий алгоритмы построения графа социальных связей на основе скрытого сбора данных объективного контроля, может быть полезен при решении задач в смежных областях знания, например, для решения задач моделирования распространения информации и обеспечения информационной безопасности [1], поиска так называемого нулевого пациента и прогнозирования параметров распространения инфекции в больших коллективах в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений [3], а использование различных методов машинного обучения и искусственного интеллекта способно увеличить результативность выявления новых закономерностей. В перспективу последующего развития исследования

входят создание более гибкого интерфейса и программная реализация дополнительных возможностей анализа графов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-22064).

Список используемых источников

1. Гнидко К.О., Жолус Р.Б. Метод управления топологией социальной сети с целью предотвращения неконтролируемого эпидемиологического распространения информации между узлами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – № 9(59). – С. 729–734.
2. Granovetter M. S. The strength of weak ties // American Journal of Sociology. – 1973. – № 6 (78). – P. 1360–1380.
3. Newman M. E. J. The spread of epidemic disease on networks // Physical Review E. – 2002. – № 1(66).

Д.В. Нагибин

МОДЕЛЬ НАРУШИТЕЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ РУКОВОДЯЩИХ ДОКУМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

В статье рассмотрен вопрос построения модели нарушителя информационной безопасности информационных систем. В рамках работы под нарушителем понимается один из субъектов информационного взаимодействия, и на основе этого моделируется типовая для субъекта функционально-структурная модель его информационной системы. Моделирование проводится на основе руководящих документов в области информационной безопасности Российской Федерации.

Ключевые слова: информационная безопасность, информационное взаимодействие, модель нарушителя, информационная система.

ВВЕДЕНИЕ

В современном информационном мире всё большее значение играет защита информационных систем (ИС) от потенциальных нарушителей. При этом нарушитель может использовать различный инструментарий для реализации атак на ИС: уязвимости в атакуемых ИС, превосходство более совершенной аппаратной или программной платформы, организационные уязвимости, человеческий фактор и др.

В связи с вышеуказанным актуальной становится проблема систематизации и построения модели потенциального нарушителя, что входит в процесс обеспечения информационной безопасности как составная часть информационно-аналитической деятельности согласно Доктрине информационной безопасности Российской Федерации [1].

В настоящее время моделирование нарушителя информационной безопасности (ИБ) в Российской Федерации регламентируется нормативно-методическими документами Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России [2], Федеральной службы безопасности (ФСБ) России, а также национальными стандартами.

В рамках работы предлагается рассматривать информационные системы как объекты (или составные объекты), через которые и на которые нарушителем могут быть осуществлены атакующие воздействия. Таким образом, нарушитель является одним из субъектов информационного взаимодействия. Вторым субъектом при этом выступает владелец защищаемой информационной системы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Субъекты информационного взаимодействия (ИВ) можно классифицировать следующим образом [3]: государства, их союзы и коалиции; международные организации; негосударственные незаконные вооруженные формирования и организации террористической, экстремистской, радикальной политической, радикальной религиозной направленности (в том числе международные); транснациональные корпорации; виртуальные социальные сообщества; медиакорпорации и СМИ; виртуальные коалиции.

Информационное взаимодействие может вестись между различными классами субъектов в глобальном информационно-коммуникационном пространстве (ИКП). При этом в качестве нарушителя ИБ может выступить представитель любого класса субъектов ИВ.

Обе стороны при осуществлении взаимодействия пользуются общедоступным ИКП. При этом ИС каждого субъекта ИВ концептуально идентична (по крайней мере, сопоставима).

Различия возможны в конкретных реализациях (программных, аппаратных, программно-аппаратных) тех или иных объектов этих ИС.

При этом важно заметить, что в зависимости от различных факторов (внешнеполитических, экономических и т. п.) субъекты ИВ не всегда наносят друг другу именно деструктивные воздействия. Однако информационная инфраструктура каждого субъекта ИВ, а также возможности глобального ИКП позволяют говорить о перманентной угрозе проведения субъектами ИВ различных видов деструктивных воздействий. В этой связи важность приобретает построение функционально-структурной модели ИС субъекта ИВ, которая является применимой к каждой из противоборствующих сторон. Указанная модель представлена на рис. 1.

Структурные элементы предложенной модели (частичное описание которых было приведено автором в рамках работы [4]) можно представить в качестве множеств или функций друг от друга:

$CZ = \{cz_1, cz_2, \dots, cz_r\}$ – множество целей субъекта ИВ;

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ – множество угроз информационной безопасности;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} = f(APR_S)$ – множество уязвимостей ИС субъекта ИВ;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_q\}$ – множество типов нарушителя ИВ;

$G = \{g_1, g_2, \dots, g_w\}$ – множество мотиваций нарушителя ИВ;

$D = f(APR_S)$ – потенциал субъекта ИВ;

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_p\}$ – множество ограничений субъекта ИВ;

$APR = \{a_1, a_2, \dots, a_e\}$ – множество программных и аппаратных компонент, из которых может состоять ИС;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_s\}$ – множество способов реализации угроз ИВ;

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_h\}$ – множество способов и средств защиты ИС.

Представленная выше совокупность множеств описывает составные объекты функционально-структурной модели ИС субъекта ИВ.

Элемент этой модели «Атакующее воздействие Y » является не объектом функционально-структурной модели ИС, а *действием*, которое осуществляется посредством этой ИС. Оно может быть описано следующим образом:

$Y = \{y_{i,j}\}$ – классифицированное множество атакующих воздействий ИС субъекта ИВ, где i – группа классификатора (классификационный признак), j – номер классификатора в группе.

Далее для рассмотренных множеств и классификаций введем индексы:

« $S - Z$ » – индекс защищаемого субъекта ИВ;

« $S - A$ » – индекс атакующего субъекта ИВ (нарушителя ИВ).

Каждый субъект ИВ имеет в своем распоряжении определенным образом сконфигурированную ИС. Конфигурация ИС определяется многими факторами: целями субъекта ИВ, его аппаратно-программными возможностями, различными мотивациями и пр.

Цели субъекта ИВ формируют цели и задачи ИС. В данном случае имеются в виду цели и задачи согласно предназначению ИС, например: коммуникационные, вычислительные, обеспечивающие и т. п.

Вместе с тем каждый субъект ИВ должен принимать во внимание современные реалии ИКП и перманентные угрозы, связанные с информационным взаимодействием. Таким образом, ИВ делится на два основных направления: оборонительное (защитное) и наступательное (атакующее).

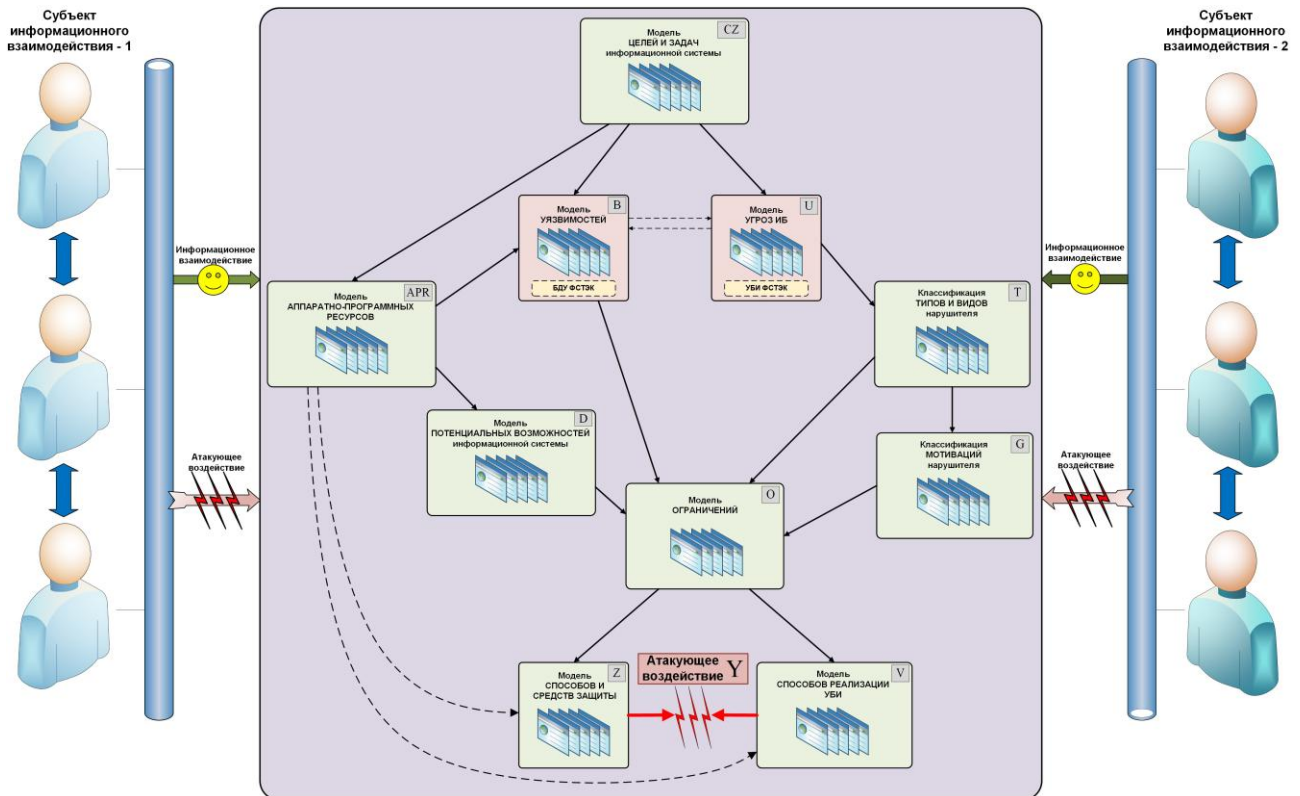


Рис. 1. Функционально-структурная модель информационной системы субъекта информационного взаимодействия

С предложенной точки зрения наступательное (атакующее) направление ИВ может рассматриваться как деятельность нарушителя ИБ, а оборонительное (защитное) направление связано с созданием соответствующих конкретной ИС способов и средств защиты информации и информационных ресурсов. Иными словами, цели и задачи ИС субъекта ИВ должны учитывать угрозы ИБ, а также включать в себя направление по созданию соответствующих ИС способов и средств защиты.

Уязвимости присущи физическим реализациям технических устройств. Их перечень и описание представлены в базе данных уязвимостей ФСТЭК России (БДУ ФСТЭК). Каждая уязвимость позволяет реализовать конкретные угрозы безопасности информации.

Каждой конкретной аппаратно-программной реализации отдельного объекта ИС будет соответствовать определенный для нее список уязвимостей из БДУ ФСТЭК. Совокупность таких отдельных объектов составляет ИС субъекта ИВ. Таким образом, совокупность списков уязвимостей каждого отдельного объекта рассматриваемой ИС будет составлять общий список ее уязвимостей.

При проектировании и создании ИС производитель предусматривает в них способы и средства защиты от угроз ИБ. Логично, чтобы эти способы и средства защиты соответствовали списку аппаратно-программных уязвимостей ИС. Это позволяет обеспечить информационную безопасность и оптимизировать финансовые затраты на ее обеспечение.

Стоит отметить, что систематический подход к моделированию угроз безопасности информации позволяет поддерживать адекватную и эффективную систему защиты в условиях изменения угроз безопасности информации и информационных ресурсов. Учет изменений угроз безопасности информации способствует своевременной выработке адекватных мер защиты информации (обеспечения безопасности). Данное замечание соответствует работе [2].

В целом при построении конкретного экземпляра ИС через конкретные цели и задачи выбор аппаратно-программных компонент, формирование требований к ИС и ее потенциаль-

ным возможностям, через моделирование нарушителя ИБ (включающее и его классифицирование, определение его потенциальных возможностей, мотиваций) определяется модель ограничений для этой ИС, которую можно выразить в следующем виде:

$$O = f(D(APR), B, T, G).$$

Эти ограничения формируют модель способов реализации угроз ИБ и модель способов и средств защиты своей ИС. Во взаимодействии этих двух противоположных компонент субъектов ИБ происходит информационный конфликт (инцидент).

Определим математически атакующее воздействие $Y_{S-A} \in Y$:

$$\begin{aligned} \text{Attack}_{S-A} = Y_{S-A} &= f(V_{S-A}(O_{S-A}), O_{S-Z}) = \\ &= f(CZ_{S-A}, T_{S-A}, G_{S-A}, APR_{S-A}, D_{S-A}, U, CZ_{S-Z}, APR_{S-Z}, B_{S-Z}, Z_{S-Z}). \end{aligned} \quad (1)$$

Реакция на атакующее воздействие Y_{S-A} проявляется в применении способов и средств защиты Z_{S-Z} информационной системы защищаемого субъекта ИБ и может быть выражено следующим образом:

$$Z_{S-Z} = f(O_{S-Z}) = f(CZ_{S-Z}, APR_{S-Z}, B_{S-Z}, D_{S-Z}, U). \quad (2)$$

Функционально-структурная модель информационной системы, представленная на рис. 1, описывает ИС как атакующего, так и защищаемого субъекта ИБ – в этом смысле она универсальна. Однако на основе этой модели взаимодействующие стороны конфигурируют свои частные модели ИС и через них осуществляют информационное взаимодействие.

На рис. 2 представлена модель нарушителя ИБ и модель защищаемой ИС, а также продемонстрировано их информационное взаимодействие, заключающееся в нанесении атакующего воздействия (1) нарушителем ИБ (рис. 2, «Субъект – 2») и в применении способов и средств защиты (2) обороняющейся стороной (рис. 2, «Субъект – 1»).

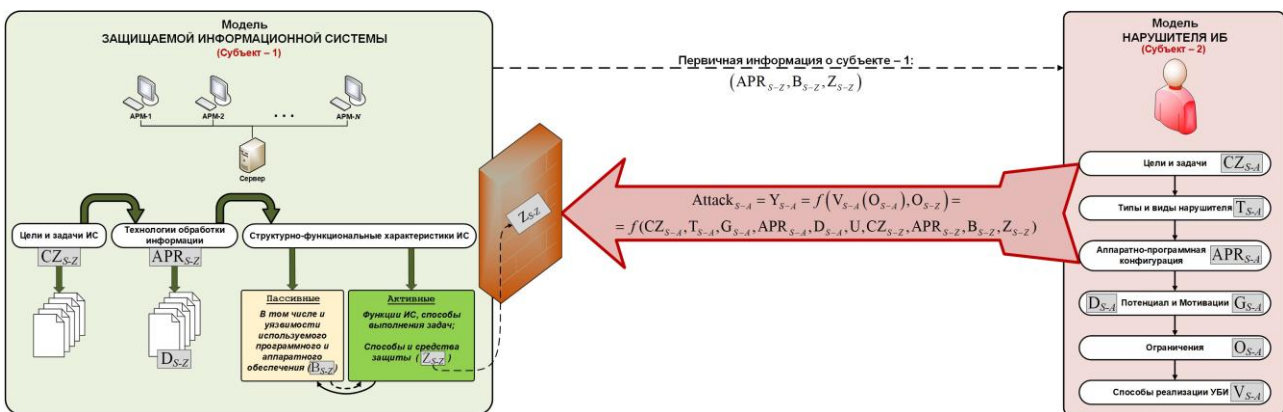


Рис. 2. Модель нарушителя информационной безопасности

На построенной модели (рис. 2) в информационных системах субъектов ИБ выделены только те модули, которые формируют, с одной стороны, – атакующее воздействие «Субъекта – 2», а с другой стороны – ответную реакцию способов и средств защиты «Субъекта – 1». Однако в общем случае каждый из субъектов ИБ может иметь полный набор модулей согласно представленной на рис. 1 модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенных исследований построены следующие модели:

- функционально-структурная модель информационной системы субъекта информационного взаимодействия;
- модель нарушителя информационной безопасности.

В настоящей работе проведено моделирование информационного взаимодействия двух субъектов. На основе этого в дальнейшем планируется моделирование информационного взаимодействия более чем двух субъектов. В рамках дальнейших исследований планируется детализация структурных компонент построенных моделей.

Список используемых источников

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации: введ. Указом Президента Российской Федерации от 05 декабря 2016 г. № 646. – М.: Кремль, 2016. – 16 с.
2. Методика моделирования безопасности информации / ФСТЭК России. – 2020. – URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/2727> (дата обращения: 31.10.2020).
3. *Манойло А.В.* Объекты и субъекты информационного противоборства // Пси-Фактор. – 2003. – URL: <http://psyfactor.org/lib/psywar24.htm> (дата обращения: 31.10.2020).
4. *Нагибин Д.В.* Подход к описанию субъектно-объектных отношений в ходе обеспечения информационной безопасности // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации: материалы 29-й научно-техн. конф. 28–30 сент. 2020 г. – 2020. – С. 44–48.

А.В. Антропова;
А.В. Баталов;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Лагун,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОПЕРЕЧНЫХ НАГРУЗОК, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАКЕТНЫЕ БЛОКИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Представлены основные положения методики расчета поперечных нагрузок, испытываемых ракетными блоками при их транспортировке в специальных контейнерах железнодорожным транспортом. Методика рассчитана на учет изменчивых факторов железнодорожного полотна, влияющих на динамику транспортирования ракетных блоков. Из таких факторов рассмотрены лишь два, наиболее значимые: волнообразность железнодорожного полотна и наличие между плетями рельсов стыков. В методике используется двумерная математическая модель движения железнодорожного транспорта, а потому данная методика является лишь оценочным инструментом, направленным на поиск технических решений, позволяющих снизить нагрузки при транспортировке ракетных блоков. В качестве основных оценочных параметров в расчетах приняты перегрузки, действующие на перевозимые ракетные блоки и амплитуды их колебаний в процессе транспортирования по нормам российских железных дорог (РЖД).

Ключевые слова: ракетный блок, железнодорожный транспорт, перегрузка, рельсы, стыки рельсов, динамика движения, профиль железнодорожного полотна.

В современных условиях перевозимые ракетные блоки устанавливаются на стандартную платформу РЖД (рис. 1), которая опирается на ходовые тележки.

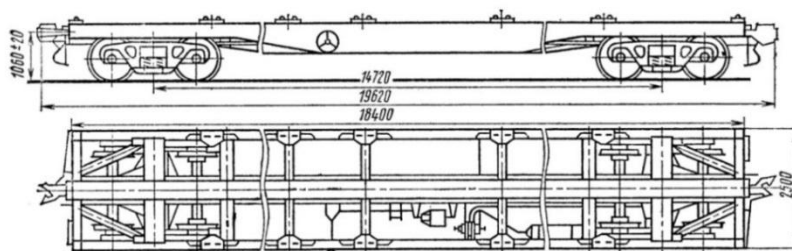


Рис. 1. Схема стандартной тележки РЖД

Амортизация для перевозимого ракетно-космического оборудования ограничена лишь средствами амортизации ходовых тележек (рис. 2).

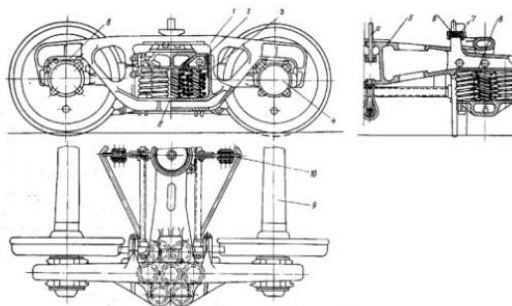


Рис. 2. Схема ходовой тележки

Действующие в РЖД нормативные документы и научно-исследовательские работы нацелены лишь на обеспечение удовлетворительного состояния железнодорожных магистралей, целостности подвижного состава, включая как силовую конструкцию, так и все системы подвижной платформы. В данных обстоятельствах требуемые условия транспортировки ракетных блоков должны обеспечиваться владельцами груза. При этом в РЖД известны дополнительные средства амортизации подвижного состава, используемые, например, для пассажирских вагонов. Однако специальные железнодорожные средства, разрабатываемые по заказам Роскосмоса, таких дополнительных амортизирующих систем сегодня не имеют (рис. 3).

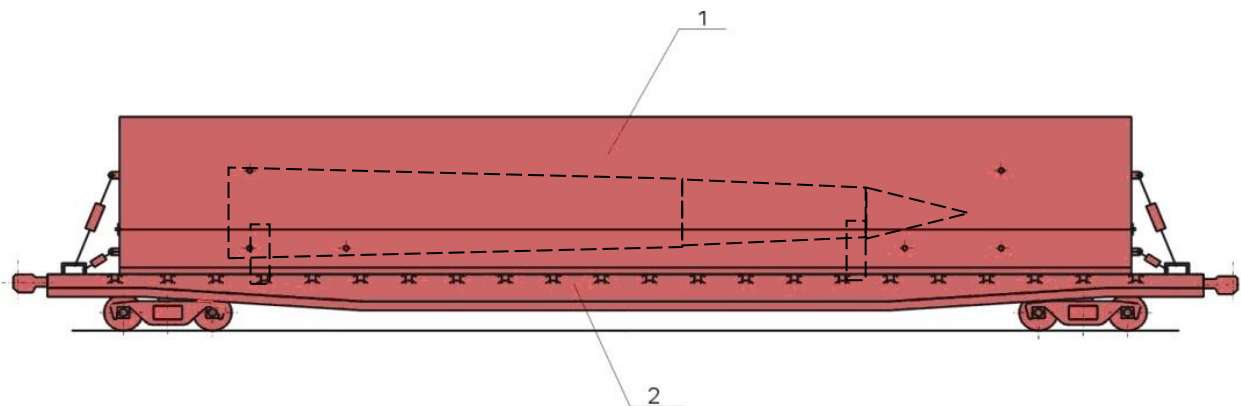


Рис. 3. Специальный контейнер на платформе для доставки ступеней ракет:
1 – контейнер с ракетным блоком; 2 – железнодорожная платформа

Вместе с тем в работах [1, 2] указывается, что вследствие расположения центра тяжести вагона непосредственно над буфером пиковое значение вибрации в вертикальном направлении может быть в полтора раза больше, чем в продольном, но при этом длительность удара может составлять всего 20 мс. Кроме того, там же указывается, что при движении по железнодорожному полотну возможны следующие пиковые значения ускорения:

- 1,5 g для вагонов с пружинным амортизатором (не допуская их полного сжатия) с полным грузом;
- 3,0 g для вагонов с пружинным амортизатором (не допуская их полного сжатия) с малым грузом;
- 15,0 g и более для вагонов с пружинным амортизатором (после их полного сжатия) с полным грузом;
- 2,0 g и более для вагонов с гидравлическим амортизатором с полным грузом при соударениях на скорости 8 км/ч (для малонагруженных вагонов ускорение вдвое больше);
- 4,0 g и более для вагонов с гидравлическим амортизатором с полным грузом при соударениях на скорости 15 км/ч (для малонагруженных вагонов ускорение вдвое больше).

Неприемлемость таких значений вибрационных нагрузок побудила авторов статьи приступить к разработке математической модели для оценивания динамических нагрузок, действующих на ракетную технику, перевозимую по железной дороге [2].

Следствием действия вибрации является усталость материала. В местах концентрации напряжений у хрупких материалов часть рассеянной в материале энергии уходит на развитие микротрещин в местах, имеющих нарушение структуры. Эти трещины развиваются и являются новыми концентраторами напряжений. В результате этого наблюдаем разрушение деталей при напряжениях, значительно меньших, чем предел прочности, часто даже ниже предела упругости, но число циклов, при которых детали разрушаются, имеет значительный порядок (типа миллионов и десятка миллионов). Наличие таких вибраций при длительной транспортировке может стать причиной появления отказов на борту ракетных блоков.

Как показали первые численные эксперименты, представленные в работе [3], описанная математическая модель нуждается в уточнении. В этой статье представлены некоторые из таких уточнений и результаты расчетов, выполненные по скорректированной математической модели, которая содержит, как и прежде, следующие соотношения: уравнение колебания первого колеса левой тележки; уравнение колебания второго колеса левой тележки; уравнение колебания первого колеса правой тележки; уравнение колебания второго колеса правой тележки; уравнение вертикального колебания центра масс кузова; уравнение углового колебания центра масс кузова; силы, действующие в демпферах сухого трения ходовых тележек.

В частности, сделано уточнение гипотезы профессора А.М. Годыцкого-Цвирко, для чего использована физическая модель на основе следующей идеи: чем выше скорость, тем меньше эффективная длина стыка или «больше скорость, меньше ям». По исходной гипотезе импульс силы, действующей на транспорт при прохождении стыка рельсов, может быть оценен по соотношению $S(t) = m_k V \theta_{ст}$, где m_k – масса колесной пары с учетом неподрессоренной части тележки, $\theta_{ст}$ – угол, имеющий дугу, примерно равную расстоянию между точками касания колеса двух рельсов, V – скорость движения транспорта. Значение $\theta_{ст}$ может быть оценено по соотношению $\theta_{ст} = \frac{st}{r_k}$, где st , r_k – величина зазора стыков рельсов и радиус колеса

тележки соответственно. Тогда для описания силы, действующей на ходовые колеса (AS) при проезде рельсового стыка, может быть использовано соотношение

$$AS = m_k V \frac{st}{r_k} \frac{1}{td},$$

где td – длительность импульса силы. В основу предложенного уточнения положено соображение о том, что ходовое колесо железнодорожного транспорта «пролетает» часть стыкового зазора (st) и при этом под действием сил притяжения несколько проседает (δ^*) относительно железнодорожного полотна (рис. 4), что можно описать сокращением величины стыка до значения st^* .

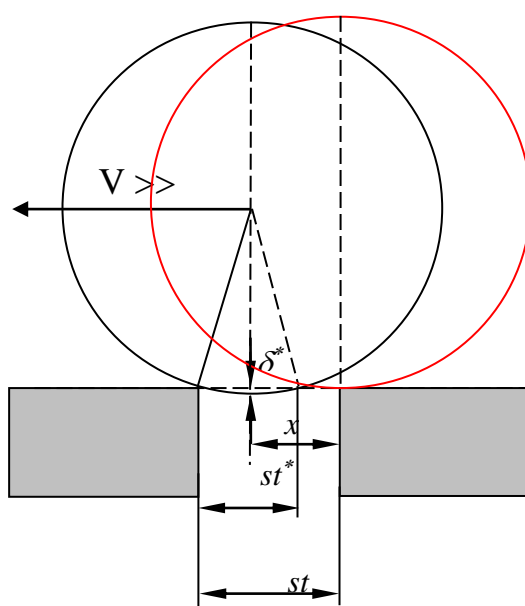


Рис. 4. Схема расчета динамики движения колеса

На основании вышеизложенного представления можно записать, что

$$\delta^* = \frac{gt^2}{2},$$

где g и t – ускорения свободного падения и время такого падения соответственно. Тогда

$$t = \sqrt{\frac{2\delta^*}{g}}.$$

В результате можно записать следующие соотношения:

$$t = \frac{x}{V} = \frac{st - \frac{st^*}{2}}{V} = \sqrt{\frac{2\delta^*}{g}} \text{ и } \delta^* = \left(\frac{st - \frac{st^*}{2}}{V} \right)^2 \cdot \frac{g}{2}.$$

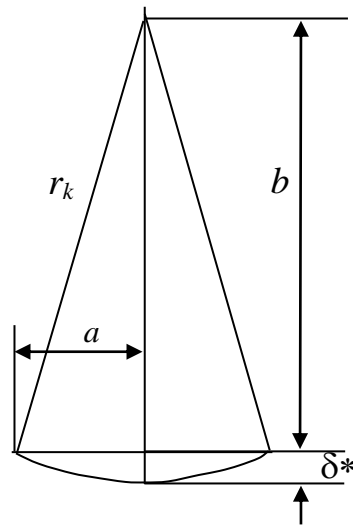


Рис. 5. Геометрическая схема расчета движения колеса

Вместе с тем на основании простого геометрического построения (рис. 5) можно связать величины уточненного межрельсового зазора δ^* и радиуса ходового колеса r_k следующими

соотношениями: $b = \sqrt{r_k^2 - a^2}$, $a = \frac{st^*}{2}$. Тогда $\delta^* = r_k - b$ или

$$\delta^* = r_k - \sqrt{r_k^2 - \left(\frac{st^*}{2} \right)^2}.$$

Для того чтобы связать скорость движения (V) и величину уточненного рельсового зазора δ^* , следует использовать соотношение

$$r_k - \sqrt{r_k^2 - \left(\frac{st^*}{2} \right)^2} = \delta^* = \left(\frac{st - \frac{st^*}{2}}{V} \right)^2 \cdot \frac{g}{2},$$

которое представляет собой трансцендентное уравнение $st^* = f(V)$ для связи скорости движения и величины уточненного межстыкового зазора. Численное решение этого уравнения представлено на рис. 6

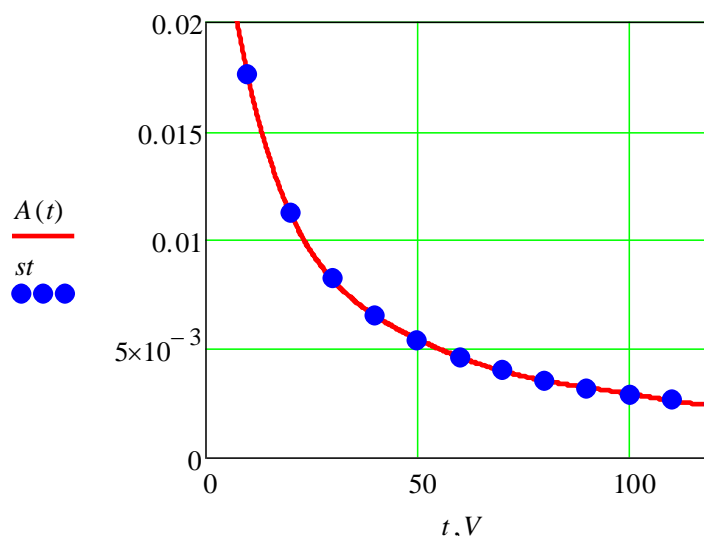


Рис. 6. Графическая зависимость численного решения уравнения $st^* = f(V)$

Решение описанного выше трансцендентного уравнения $st^* = f(V)$ при условии, что реальный межрельсовый зазор принят равным, согласно работе [4], $st = 20$ мм, можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

Решение трансцендентного уравнения $st^* = f(V)$

$V, \text{ км/ч}$	10	20	30	40	50	60
$\delta^*, \text{ м}$	$17,6 \cdot 10^{-3}$	$11,2 \cdot 10^{-3}$	$8,22 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$5,38 \cdot 10^{-3}$	$4,575 \cdot 10^{-3}$
$V, \text{ км/ч}$	70	80	90	100	110	120
$\delta^*, \text{ м}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$3,176 \cdot 10^{-3}$	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$

При проведении расчетов также принято допущение о том, что длительность импульса силы от проезда через стык td пропорционально скорости движения транспорта V . В качестве отправного времени прохождения рельсового стыка использовано экспериментально полученная величина $td = 0.0025$ сек. для скорости движения 90 км/ч [5].

Первой особенностью решения задачи по определению динамических нагрузок, действующих на ракетный блок при его перевозке на железной дороге в условиях волнообразного профиля железнодорожного полотна и межрельсовых стыков, является жесткость обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих этот процесс. Так называемая жесткость обыкновенных дифференциальных уравнений [6], использованных в расчете, обусловлена тем, что одновременно ведется расчет для гармонических функций с относительно малым периодом, которые описывают профиль железнодорожного полотна, и импульсных функций, которые, в свою очередь, описывают прохождение стыков рельс, имеющих незначительную по времени длительность. Исторически интерес к жестким системам возник в середине XX века при изучении уравнений химической кинетики с одновременным присутствием очень медленно и очень быстро протекающих химических реакций. Тогда неожиданно оказалось, что считавшиеся исключительно надежными методы Рунге – Кутты стали давать сбой при расчете этих задач.

Для рассмотренных выше систем уравнений при их численном решении проблематичным становится выбор шага интегрирования. Так, при большом шаге интегрирования решение может привести к плохой сходимости результатов, а при малом шаге – к неустойчивости решения.

Второй особенностью численного решения использованной системы уравнений является *отсутствие правдоподобных начальных условий*. Поэтому расчеты проводились, начиная с нулевых начальных условий, с созданием контрольной точки в конце каждого цикла расчета. В такой контрольной точке записывались последние значения параметров расчета, являющихся начальными условиями для последующего цикла расчета. Эта последовательность расчетов повторялась до тех пор, пока результаты расчетов не приходили к их устойчивой повторяемости.

Длительность расчетного времени каждого цикла подбиралась по критерию устойчивости-сходимость. Кроме того, на правильный выбор длительности расчетного времени двух последовательных расчетов оказывало влияние временная согласованность импульсов от прохождения через стыки рельсов. Такая согласованность менялась в зависимости от заданной скорости движения железнодорожного транспорта. Так, например, для скорости в 90 км/ч длительность времени расчета одного цикла выбиралась длительностью в 120 сек. Тогда как для скорости 120 км/ч она назначалась в 200 сек. (рис. 7). На рис. 7 по ординате показано значение силы импульса для первой колесной пары первой ходовой тележки ($S_{11}(t)$), а по абсциссе – длительность расчета.

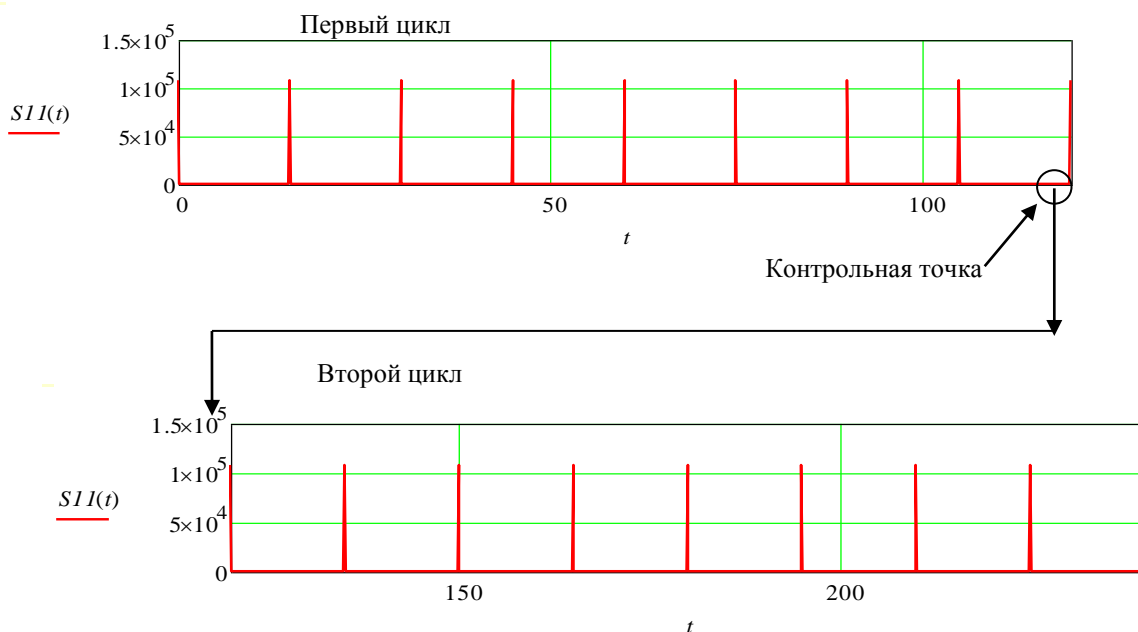


Рис. 7. Результаты расчетов, выраженные в графической зависимости

В расчетах использовались исходные данные.

Длина одной рельсовой плети – 2000 м.

Амплитуда неровности рельсового пути $25 \cdot 10^{-3}$ м.

Значения массовых и габаритных параметров:

масса ходовой тележки платформы.....	10^4 кг;
масса платформы.....	$4 \cdot 10^4$ кг;
масса контейнера.....	$16 \cdot 10^3$ кг;
масса ракетного блока.....	$7 \cdot 10^3$ кг;
массовая нагрузка на левый ложемент.....	$5,6 \cdot 10^3$ кг;
массовая нагрузка на правый ложемент.....	$1,4 \cdot 10^3$ кг.

Жесткость пружин подвески ходовой тележки – $8 \cdot 10^3$.

Коэффициент трения в демпфере сухого трения тележки – 0,25.

Коэффициенты демпферов ложементов контейнера – $0,05 \cdot 10^6 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$.

Жесткость ложементов – $0,12 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Варьируемые в расчетах параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры, варьируемые в расчетах

Скорость движения	Размер стыка st^* , м	Длительность импульса td , сек.	Время одного цикла расчета t , сек.	Количество шагов интегрирования	Количество циклов расчета
120 км/ч	$2.4 \cdot 10^{-3}$	0.00188	120	540.000	7
90 км/ч	$3.176 \cdot 10^{-3}$	0.0025	100	400.000	7
60 км/ч	$4.575 \cdot 10^{-3}$	0.00375	120	270.000	8
30 км/ч	$8.22 \cdot 10^{-3}$	0.0075	120	135.000	10

При проведении расчетов выводились зависимости следующих значений:

- перегрузок центра масс ракетного блока (P) от времени;
- перегрузок ракетного блока в правом ложементе ($PGPL$) от времени;
- перегрузок ракетного блока в левом ложементе ($PGLL$) от времени;
- амплитуды перемещения ракетного блока на левом ложементе (LL) от времени;
- амплитуды перемещения ракетного блока на левом ложементе (PL) от времени.

Из всего массива результатов в статье представлены лишь некоторые зависимости (рис. 8–13).

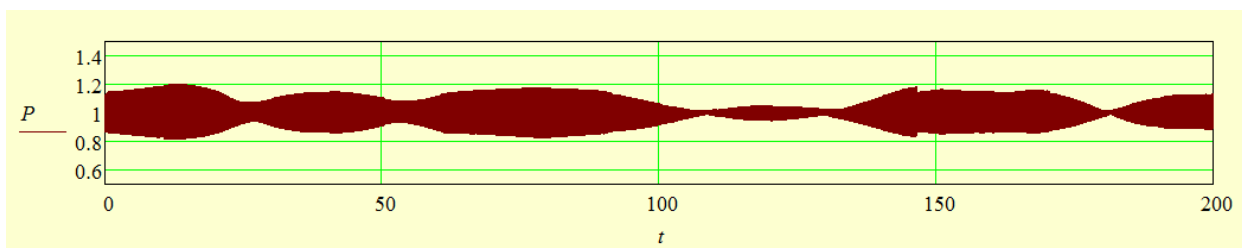


Рис. 8. Перегрузка центра масс ракетного блока. Скорость движения 90 км/ч. Общее время расчета 1000 сек.

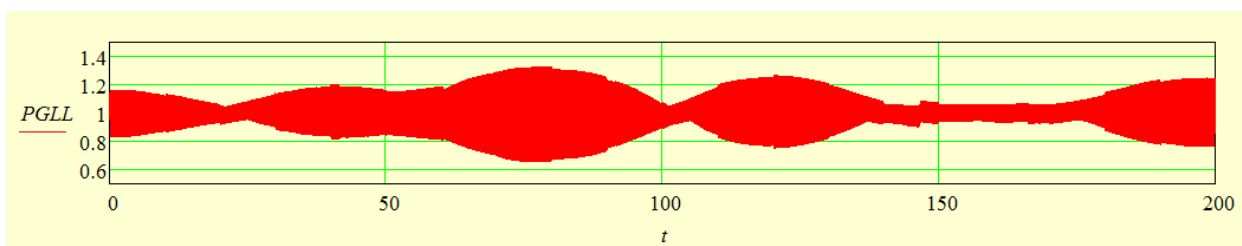


Рис. 9. Перегрузка ракетного блока на левом ложементе. Скорость движения 90 км/ч. Общее время расчета 1000 сек.

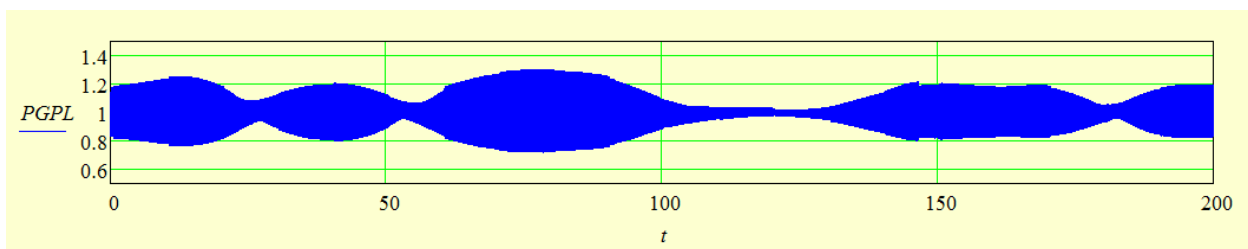


Рис. 10. Перегрузка ракетного блока на правом ложементе. Скорость движения 90 км/ч. Общее время расчета 1000 сек.

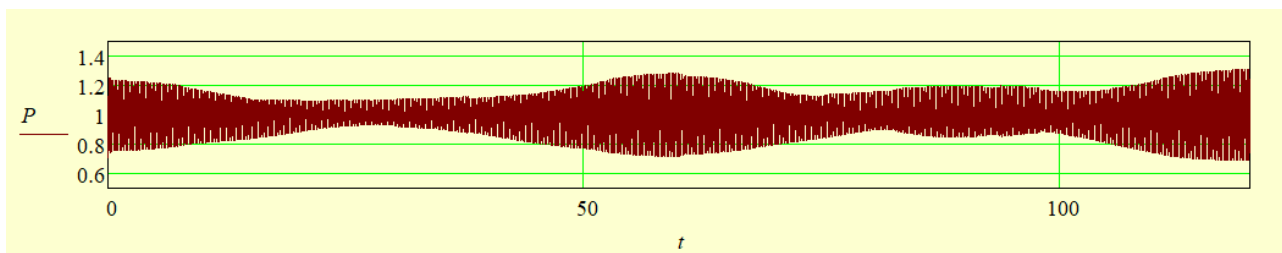


Рис. 11. Перегрузка центра масс ракетного блока. Скорость движения 120 км/ч. Общее время расчета 1080 сек.

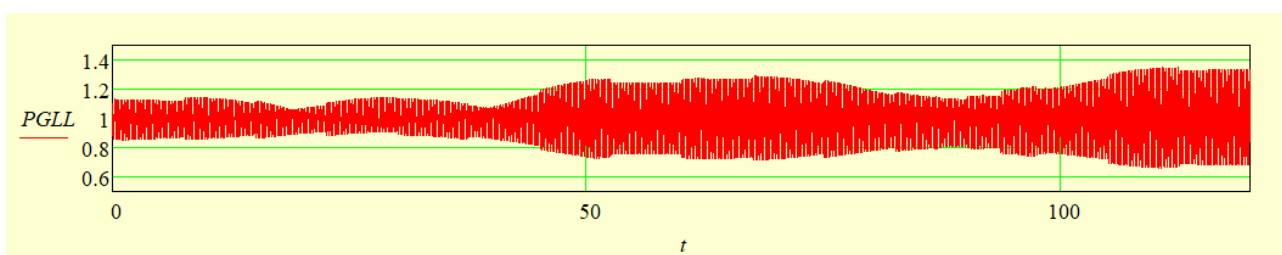


Рис. 12. Перегрузка ракетного блока на левом ложементе. Скорость движения 120 км/ч. Общее время расчета 1080 сек.

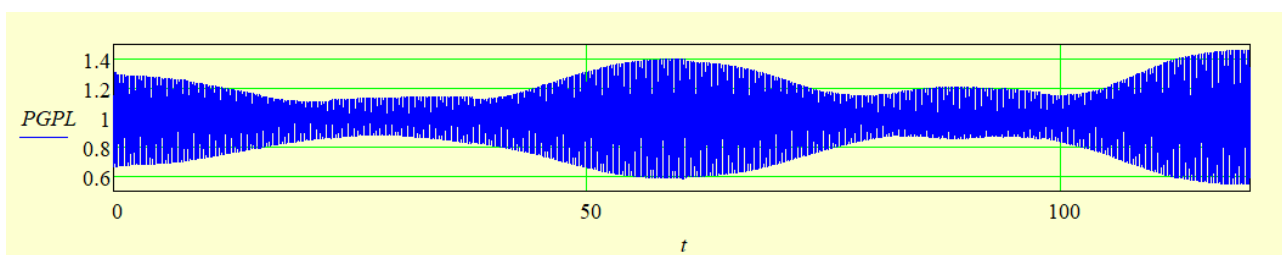


Рис. 13. Перегрузка ракетного блока на правом ложементе. Скорость движения 120 км/ч. Общее время расчета 1080 сек.

Анализ рис. 8–13 показывает, что сочетание неровностей рельсового пути в виде рельсовых стыков и волнообразности железнодорожного полотна приводит, во-первых, к значительным поперечным перегрузкам для ракетного блока. На скорости 120 км/ч такие перегрузки могут превышать значения в 1.45 единиц. При этом согласно требованиям инструкций по перегрузкам при транспортировании эшелонов с ракетами космического назначения (от завода-изготовителя до технических комплексов эксплуатирующей организации) вертикальные перегрузки для разных типов ракет должны быть в пределах $\leq \pm 1,3 \text{ g}$. Зависимости поперечных нагрузок ракетного блока существенно отличаются для правого и левого

ложемента контейнера. Такие зависимости описываются несколькими гармониками с разной частотой.

Во-вторых, амплитуда поперечных движений ракетного блока в ложементах может достигать до 0.01–0.03 м.

В-третьих, полученные зависимости указывают на необходимость поиска альтернативных средств амортизации. Как указано в ГОСТ 57211.3-2016, наиболее жесткие условия воздействия имеют место для вагонов с простыми пружинными амортизаторами. Такие вагоны могут быть использованы для перевозки минерального сырья, однако транспортирование более ценных грузов требует применения более совершенной подвески. Одним из результатов поиска лучших вариантов подвески могут стать ходовые тележки типа 18-9935 (рис. 14).



Рис. 14. Ходовая тележка с гидравлическими амортизаторами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная здесь методика оценочных расчетов динамических процессов транспортировки ракетной техники железнодорожным транспортом, несмотря на ряд уточнений, только приблизительно описывает реальные процессы транспортирования. Вместе с тем, рассматривая полученные в результате расчетов параметры динамики перевозки ракетных блоков, становится понятным, что необходим поиск приемлемых решений для систем амортизации, которые могут быть установлены в транспортных агрегатах с ракетными блоками.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 57211.3—2016/ ИЕС/TR 62131-3:2011. Данные о воздействии на электротехническое оборудование вибрации и ударов. Оборудование, перевозимое железнодорожным транспортом. – URL: <http://www.tdesant.ru> (дата обращения: 5.03.2020).
2. ГОСТ 28213-89 (МЭК 68-2-27-87). Группа Э29. Межгосударственный стандарт. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. – URL: <http://www.tdesant.ru> (дата обращения: 5.03.2020).

3. Математическая модель оценивания динамических характеристик транспортировки ракетных блоков железнодорожным транспортом / В.В. Козлов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 673. – С. 159–169.
4. ГОСТ 33185-2014. Накладки для изолирующих стыков железнодорожных рельсов. Требования безопасности и методы контроля. – URL: <http://www.tdesant.ru> (дата обращения: 5.03.2020).
5. *Кузьмицкий Я.О., Шевченко Д.В., Беляев А.К.* Конечно-элементное моделирование процесса перекачивания железнодорожного колеса через стыки рельсов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. – 2015. – № 4(231).
6. *Хайпер Э., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. – М.: Мир, 1999. – 685 с.

Е.П. Боровской*;
А.Г. Кохановский **,

кандидат техн. наук;

А.Б. Кузнецов **,

кандидат техн. наук, доцент

* Войсковая часть 13991, г. Мирный, Архангельской обл.

** Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ, ТРЕБУЮЩИХ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Предлагается методика выбора объектов наземного технологического оборудования стартового комплекса, требующих дополнительного контроля технического состояния на основе аддитивной свертки частных показателей. Приведен пример использования методики выбора объектов наземного технологического оборудования стартовых комплексов.

Ключевые слова: наземное технологическое оборудование, стартовый комплекс, контроль технического состояния, частный показатель, ранжирование, свертка.

ВВЕДЕНИЕ

Статистика неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации ракетно-космической техники (РКТ), показывает необходимость дальнейшего повышения эффективности и безопасности эксплуатации объектов космодромов. Это обусловлено высокой вероятностью возникновения и тяжестью последствий возможных нештатных ситуаций (НшС), невозможностью проведения контроля штатными средствами или высокой опасностью для личного состава боевых расчетов, связанной с контролем технического состояния непосредственно на объекте. В целях обеспечения безопасного и надежного функционирования ракетно-космических комплексов для контроля технического состояния предлагается использовать робототехнические системы (РТС) [1, 2]. Для определения объектов, требующих дополнительного контроля технического состояния, необходимо провести анализ характеристик составных частей наземного технологического оборудования стартовых комплексов (НТО СК) [1]. Кроме того, необходимо определить тип требуемого контроля и возможность применения РТС на этих объектах. Для решения этой задачи предлагается использовать метод экспертного опроса (ЭО) как один из методов, подходящих для решения сложно формализуемых задач.

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА ДЛЯ ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

Сущность метода экспертных оценок состоит в рациональной организации проведения анализа решаемой задачи с количественной оценкой суждений и обработкой результатов [3]. Общая схема и основные этапы проведения ЭО на основе анкетирования представлены на рис. 1.

В рамках рассматриваемого метода целью экспертного опроса является сбор сведений и анализ потенциальных объектов НТО СК, контроль состояния которых следует осуществлять с применением робототехнических систем.

Задача исследования состоит в оценивании возможности, способов и эффекта от применения РТС на НТО СК и базируется на мнении специалистов, эксплуатирующих объекты НТО СК.

Объектом исследования будем считать элементы НТО СК, которые необходимо контролировать, а также на которые необходимо удаленно воздействовать для предупреждения, пресечения, своевременного и оперативного обнаружения НшС.

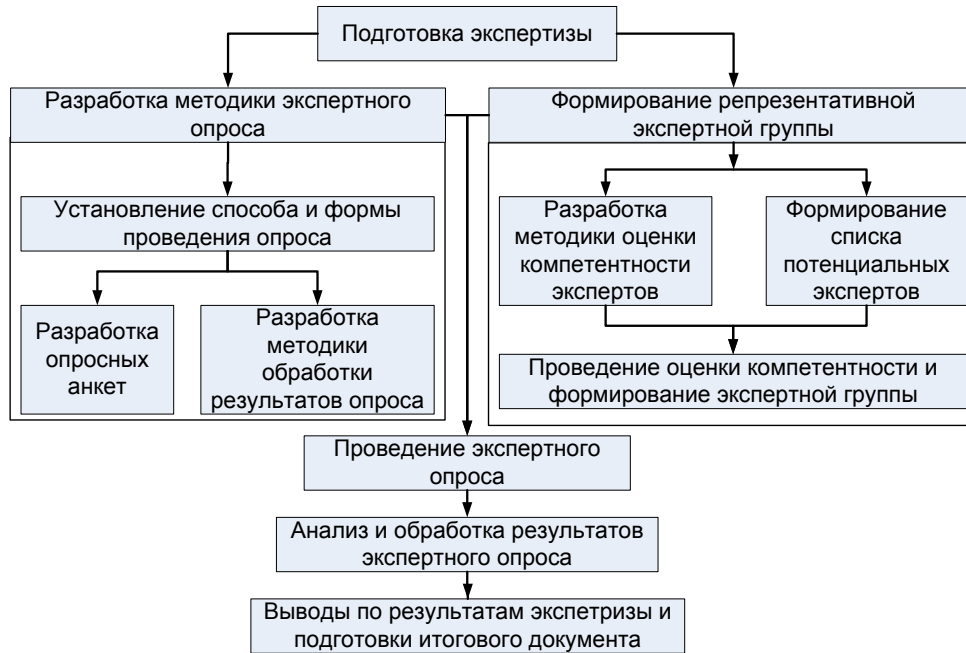


Рис. 1. Общая схема и основные этапы проведения экспертного опроса

Отметим, что при подборе экспертов [4] оценивается их соответствие таким основным критериям, как компетентность, креативность, конформизм, конструктивность мышления, коллективизм, самокритичность, отношение к экспертизе. В настоящее время указанные характеристики в основном оцениваются на качественном уровне [3–6]. При выборе участников ЭО среди специалистов, эксплуатирующих НТО СК, одним из основных критериев определен опыт эксплуатации систем и уровень знаний, характеризующийся оценкой командира подразделения и результатами ежегодных испытаний на допуск к самостоятельной работе.

Применение анкетирования позволяет избежать проблем, связанных с коллективизмом и конформизмом, получить достаточно объективные сведения по рассматриваемой задаче оценивания объектов НТО СК на предмет востребованности дополнительного контроля технического состояния данных объектов.

Полученные результаты анкетирования m участников ЭО, представляющие собой оценку от 1 до 9 каждого из n объектов, в соответствии с оценочной таблицей обрабатываются с использованием методики на основе осреднения оценок экспертов [1, 3, 6–9]. Обобщенная оценка объектов и компетентности экспертов при результатах оценивания x_{ij} и начальных значениях коэффициентов компетентности экспертов k_j^0 рассчитывается по рекуррентным формулам:

$$x_i^t = \sum_{j=1}^n x_{ij} k_j^{t-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

$$\lambda^t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} x_i^t, \quad t = 1, 2, \dots; \quad (2)$$

$$k_j^t = \frac{1}{\lambda^t} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^t, \quad t = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

где i – номер объекта;
 j – номер эксперта;
 t – номер итерации;
 λ – нормировочный коэффициент.

Вычисления начинаются с $t = 1$. Начальные значения компетентности каждого эксперта определяются из выражения

$$k_j^0 = \frac{1}{m}. \quad (4)$$

Для преобразования уравнений (1) и (3) в векторно-матричную форму исключим из них переменные k_j^{t-1} и x_i^t соответственно. Указанные уравнения (после данного преобразования, подробно расписанного в ряде работ [3, 10]) в векторно-матричной форме примут вид:

$$\mathbf{x}^t = \frac{1}{\lambda^{t-1}} \mathbf{B} \cdot \mathbf{x}^{t-1}; \quad (5)$$

$$\mathbf{k}^t = \frac{1}{\lambda^t} \mathbf{C} \cdot \mathbf{k}^{t-1}, \quad (6)$$

где матрицы \mathbf{B} и \mathbf{C} имеют соответственно размерности $(n \times n)$ и $(m \times m)$:

$$\mathbf{B} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^T; \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}, \quad \mathbf{X} = \|x_{ij}\|. \quad (8)$$

Из теоремы Перрона – Фробениуса [11] следует, что если матрицы \mathbf{B} и \mathbf{C} неотрицательны и неразложимы, то при $t \rightarrow \infty$ векторы \mathbf{x}^t и \mathbf{k}^t сходятся к собственным векторам матриц \mathbf{B} и \mathbf{C} , соответствующим максимальным собственным числам этих матриц. Предельные значения векторов \mathbf{x} и \mathbf{k} вычисляются при решении следующих уравнений:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{x} = \lambda_B \cdot \mathbf{x}, \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1; \quad (9)$$

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{k} = \lambda_C \cdot \mathbf{k}, \quad \sum_{j=1}^m k_j = 1, \quad (10)$$

где λ_B, λ_C – максимальные собственные числа матриц \mathbf{B} и \mathbf{C} соответственно.

На практике указанные условия практически всегда выполняются [7].

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

Оцениваемые показатели, которые формируются в ходе экспертного опроса, объединены в две группы. Первая группа содержит признаки, характеризующие НшС (первые четыре признака), а вторая группа содержит качественные оценки возможности определения НшС

стационарными или подвижными системами диагностирования (признаки 5–8). Перечислим эти показатели:

- 1) важность, оперативность выявления НшС;
- 2) степень влияния на выполнение технологического графика;
- 3) вероятность возникновения НшС;
- 4) тяжесть последствий;
- 5) сложность и опасность осуществления контроля технического состояния (ТС) объекта;
- 6) наличие стационарных датчиков для контроля ТС объекта;
- 7) возможность применения РТС для контроля ТС объекта;
- 8) полезность применения РТС для контроля ТС объекта.

Алгоритм выбора объектов НТО СК, требующих дополнительного контроля технического состояния, состоит из пяти шагов.

Шаг 1. Осуществление предварительного оценивания характеристик НшС и потенциальных объектов контроля. В ходе выполнения данного этапа проводится анализ технической документации, руководящих документов, технологического графика с целью установления перечня объектов для включения в экспертизу. Осуществляется подбор экспертов и формируется экспертная группа. Создается базовый список объектов, составляются опросные листы, задаются весовые коэффициенты оцениваемых показателей в соответствии с требованиями заказчика методом усредненных экспертных оценок весовых коэффициентов [3, 5, 7]. Организуется проведение экспертизы.

Шаг 2. Изменение списка объектов по первой группе показателей, ранжирование и исключение из списка объектов нижнего уровня, принятие решения на продолжение экспертизы или повторное проведение экспертного опроса по первой группе признаков.

В ходе выполнения данного этапа эксперты выставляют оценки по девятибалльной системе по показателям 1–4 в соответствии с опросным листом [5]. Оценки 2, 4, 6 и 8 являются промежуточными и проставляются в случаях, когда эксперт не может однозначно выбрать из пяти вариантов ответа.

Если эксперты считают, что необходимо оценить объект, не включенный в первоначальный список, то такие предложения аккумулируются и оцениваются в ходе повторного проведения действий, описанных на втором шаге.

Шаг 3. Определение способов контроля объектов. В ходе выполнения данного этапа экспертам требуется высказаться по вопросу: «Каким способом осуществлять диагностирование и контроль?» и предложить способы, тип датчиков и т. д. Данный этап выполняет функцию дополнительного сбора сведений о возможности решения задачи и сокращения области поиска при подборе технических средств контроля и диагностирования ТС.

Шаг 4. Изменение списка объектов по второй группе показателей. На этом шаге проводится ранжирование и исключение из списка объектов нижнего уровня, принятие решения на продолжение экспертизы или повторное проведение экспертного опроса по второй группе показателей. В ходе выполнения данного этапа эксперты так же, как и ранее, выставляют оценки по девятибалльной системе по показателям 5–8 в соответствии с опросным листом [5].

Шаг 5. Обработка результатов опроса. На данном этапе полученные ответы экспертов обрабатываются, формируется восемь матриц опроса в соответствии с оценками показателей объектов, определяется согласованность экспертов и проводится ранжирование результатов опроса.

По результатам опроса экспертов будут получены матрицы ответов по каждому из показателей, где в строках будут содержаться порядковые номера объектов, выделенных для оценивания, а в столбцах – оценки каждого из экспертов.

Обобщенная (групповая) оценка показателей объектов рассчитывается путем построения обобщенного упорядочения объектов на основе осреднения оценок экспертов. Выявление зависимостей между суждениями различных экспертов позволяет установить степень близости

сти во мнениях экспертов. Графически оценка каждого эксперта представляется как точка в некотором пространстве, в котором имеется понятие расстояния. Если точки, характеризующие оценки всех экспертов, расположены на небольшом расстоянии друг от друга, это можно интерпретировать как хорошую согласованность экспертных мнений. Если же точки в пространстве разбросаны на значительные расстояния, то согласованность мнений экспертов невысокая [3, 10]. При образовании двух или нескольких компактных групп, что означает наличие в экспертной группе существенно отличающихся точек зрения на оценку показателей объектов, необходимо провести анализ риска принятия той или иной точки зрения с учетом весовых коэффициентов оцениваемых показателей. Так, например, если одна группа считает необходимым провести контроль объекта из-за возможного возникновения аварии, а другая считает такой контроль неактуальным ввиду маловероятности такого события, то при большей значимости первого показателя «Важность, оперативность выявления НшС», объект будет рекомендован для проведения дополнительного контроля.

В качестве частных показателей K выступает минимальное значение рангов ($R_1 \div R_8$) каждого из восьми показателей для объектов ($R_1 \rightarrow 1, \dots, R_8 \rightarrow 1$) при ограничении, что эти ранги ниже заданного значения ($R_1 < R_{1\max}, \dots, R_8 < R_{8\max}$). Для выбора объектов, требующих дополнительного контроля, по первой и второй группе показателей используется интегральный показатель, рассчитываемый по методу аддитивной свертки как взвешенная сумма частных показателей [8, 12]. Интегральный показатель R_Σ рассматривается как взвешенная сумма частных показателей, нормированная на соответствующие веса a_v :

$$R_\Sigma = \sum_{v=1}^N a_v \cdot K_v, \quad (11)$$

где K – частный показатель;

a – вес показателя, $\sum_{v=1}^N a_v = 1$;

N – количество показателей;

v – номер показателя.

Для выявления объектов, которые не обладают высоким рангом, в качестве дополнительного показателя предлагается использовать число упоминаний объекта в частных показателях при условии соблюдения ограничительного условия. Такой подход позволяет не рассматривать заведомо малозначимые неисправности и включить в перечень объектов контроля элементы НТО СК с малой вероятностью выхода из строя, которые в относительно малой степени могут повлиять на своевременность выполнения задачи по пуску ракеты космического назначения (РКН).

ПРИМЕР ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Исходными данными для проведения экспертного опроса послужили данные о НшС, описанные в руководящих документах [11].

Первичный анализ позволил выявить 39 объектов, предположительно требующих дополнительного контроля. Сформированы 8 показателей для получения оценки объектов. Данные показатели объединены в 2 группы, характеризующие важность осуществления контроля и рациональность применения РТС для этих целей. В качестве экспертов выступили специалисты боевых расчетов войсковой части 75117, участвующие в подготовке РКН на СК, и офицеры службы вооружения. Состав экспертной группы – 7 человек. Оценивание каждого

объекта по показателям осуществлялось выставлением оценки от 1 до 9 в соответствии с разработанной таблицей ответов.

Результаты анкетирования были обработаны в соответствии с разработанным алгоритмом.

Проведено оценивание ранжированных ответов по показателям в соответствии с частными критериями по каждой группе показателей (рис. 2 и 3), рассчитан суммарный показатель важности объектов, выявлены объекты, имеющие высокий ранг по нескольким показателям каждой группы, а также объекты, удовлетворяющие аддитивному критерию в соответствии с весовым коэффициентом каждого i -го критерия (рис. 4). Данные объекты рассматриваются в качестве объектов, требующих организации дополнительного контроля средствами РТС.



Рис. 2. Оценки совокупной важности показателей 1–4

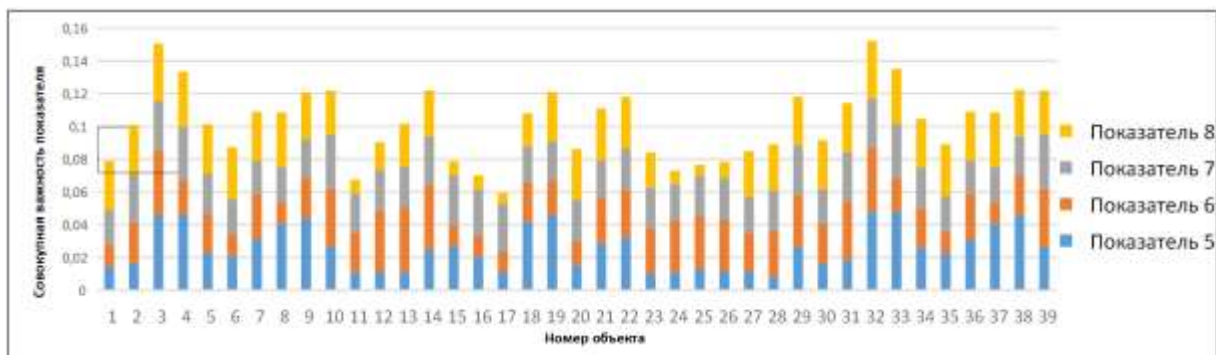


Рис. 3. Оценки совокупной важности показателей 5–8

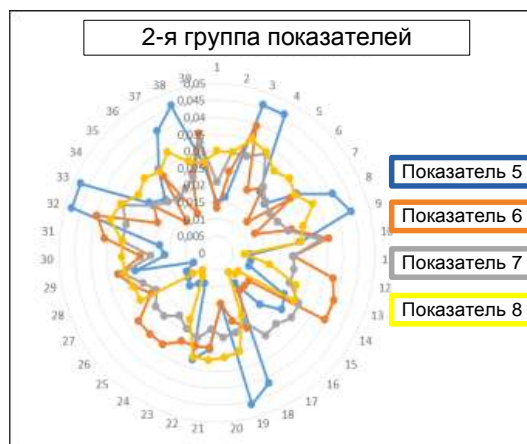
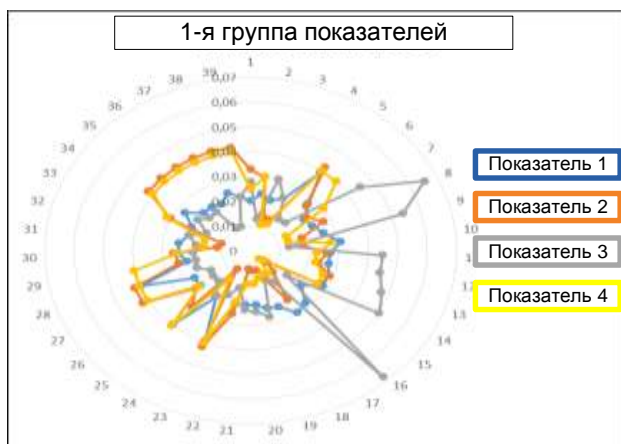


Рис. 4. Графическое представление результатов ранжирования объектов контроля по степени предпочтения

Анализ полученных данных позволил сделать выводы о том, что в процессе подготовки РКН наиболее важными контролируруемыми параметрами НТО СК являются отсутствие пожара, температура пероксида водорода в магистралях заправки, а также техническое состояние оборудования НТО СК в период отсутствия личного состава боевых расчетов на боевых постах.

В результате использования разработанного алгоритма на основании полученной аддитивной свертки частных показателей для объектов НТО СК установлено, что применение РТС в качестве средств дополнительного контроля технического состояния актуально в следующих случаях:

- для контроля отсутствия пожара в сооружениях НТО СК;
- для контроля отсутствия капельной течи компонентов ракетного топлива;
- для контроля ТС оборудования в период отсутствия личного состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение разработанного алгоритма с использованием аддитивной свертки частных показателей, полученных методом экспертного опроса, для классификации объектов контроля технического состояния составных частей НТО СК, позволяет определить перечень объектов НТО СК, требующих дополнительного контроля, без необходимости проведения трудоемких и затратных испытаний для получения достаточной выборки.

Список используемых источников

1. Минаков Е.П., Тарасов А.Г., Боровской Е.П. Развитие структуры автоматизированной системы управления подготовкой и пуском ракет космического назначения с целью автоматизации процессов устранения нештатных ситуаций // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2015. – Т. 7, № 6. – С. 16–21.
2. Тарасов А.Г., Самсонов Ф.А., Цветков А.Ю. Структура автоматизированной системы подготовки и пуска ракет космического назначения с применением робототехнических средств // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С.180–185.
3. Масленников Е.В. Особенности отбора экспертов // Социология. – 2010. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-otbora-ekspertov> (дата обращения: 10.03.2019).
4. Боровской Е.П. Определение объектов использования робототехнических систем на стартовых комплексах методом экспертного оценивания // Сборник III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т.1. – С. 91–95.
5. Чернов В.Г. Оценка статей инвестиционных проектов при нечетких предпочтениях экспертов // Экономический анализ: теория и практика. – 2007. – №7. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-statey-investitsionnyh-proektov-pri-nechetkih-predpochteniyah-ekspertov> (дата обращения: 31.10.2020).
6. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Многокритериальный выбор варианта решения на основе аддитивной свертки показателей, являющихся членами арифметических прогрессий // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – №11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogokriterialnyy-vybor-varianta-resheniya-na-osnove-additivnoy-svertki-pokazateley-yavlyayuschih-sya-chlenami-arifmeticheskikh> (дата обращения: 25.09.2019).
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 213 с.

8. Комбинированный метод многокритериального выбора управленческих решений на основе моделей представления знаний и планирования эксперимента / А.А. Павлов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 656. – С. 9–17.
9. *Виноградов И.М.* Основы теории чисел. – М.: Наука, 1981. – 128 с.
10. *Аристова Е.М.* Установление взаимосвязи между методами аддитивной свертки и метрик // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2017. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustanovlenie-vzaimosvyazi-mezhdu-metodami-additivnoy-svertki-i-metriki> (дата обращения: 10.03.2019).
11. Инструкция по подготовке на СК. 14А14АДИС.372182.001ИЭ-11. – 1-е изд. – 71 с.

М.Ю. Булекбаева;
П.С. Гончаров,
кандидат техн. наук, доцент;
Л.П. Зозуля,
кандидат техн. наук

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРА ЛАПЛАСА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СБЛИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ

Предложена расчетная схема оценивания относительной скорости и углов подлета при сближении частицы космического мусора (ЧКМ) и космического аппарата (КА). Особенностью предлагаемой расчетной схемы является прогнозирование параметров движения ЧКМ по заданным начальным условиям без использования кеплеровских элементов орбиты. В основе предложенного подхода лежит применение вектора Лапласа. Расчет радиуса-вектора и вектора абсолютной скорости ЧКМ производится в зависимости от угловой дальности. Угловая дальность определяется как угол между радиусом-вектором точки образования ЧКМ и радиусом-вектором ее возможной встречи с рядом КА, движущихся по круговым орбитам.

Ключевые слова: космический аппарат, космический мусор, угловая дальность, относительная скорость, углы сближения.

ВВЕДЕНИЕ

Задачей мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) и предотвращения возможных нештатных ситуаций занимаются специальные наземные подразделения. С помощью средств наблюдения подразделения отслеживают отдельные объекты в космосе и прогнозируют возможные инциденты, что позволяет уклонять функционирующие спутники от столкновений с ЧКМ. При отсутствии полной информации может произойти непреднамеренное высокоскоростное соударение, что приведет к образованию группы вторичных ЧКМ. От точки соударения ЧКМ двигаются по своим орбитам. Для определенности дальнейших расчетов из всего многообразия ЧКМ выбирается одна частица, которой присваивается индекс j . Орбита j -й ЧКМ может пересечь орбиты функционирующих КА. Положение точки пересечения орбит определяется угловой дальностью, отсчитываемой от точки образования ЧКМ. Целью данной работы является определение диапазонов параметров орбит КА, пересекающих орбиту ЧКМ, с последующим определением параметров сближения КА и ЧКМ.

Требуется оценить относительную скорость сближения ЧКМ и КА, углы подлета ЧКМ к КА при условии, что рассматриваемые объекты придут в точку пересечения орбит одновременно (рис. 1) [1]. В данной статье предложен один из возможных подходов к проведению оценивания параметров сближения, основанный на применении вектора Лапласа.

В работе используются следующие допущения и ограничения:

- орбита КА – круговая;
- точка пересечения орбиты ЧКМ и КА является точкой их встречи;
- расчеты проводятся в центральном гравитационном поле Земли (ЦГПЗ).

Решение поставленной задачи разделяется на три этапа:

- 1) определение радиуса-вектора и скорости ЧКМ в зависимости от угловой дальности;
- 2) определение диапазона параметров орбит КА, пересекающих орбиту ЧКМ в заданной точке:



Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи

- а) определение диапазонов элементов ориентации орбит;
- б) определение диапазона аргумента широты КА;
- 3) определение относительной скорости ЧКМ и КА в момент их возможной встречи, а также углов подлета ЧКМ к КА.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛОВОЙ ДАЛЬНОСТИ

Задача определения в текущем положении кинематических параметров ЧКМ решается при следующих условиях:

1) исходные данные:

\vec{V}_{0j} – начальная скорость j -й ЧКМ;

\vec{r}_0 – начальное положение каждой из ЧКМ, которое определяется местом их образования;

φ – угловая дальность между начальной точкой и точкой столкновения с новым объектом;

2) искомые величины:

\vec{r}_{1j} – радиус-вектор j -й ЧКМ в момент времени, соответствующий моменту встречи выбранной ЧКМ с КА (в момент столкновения $\vec{r}_{1j} = \vec{r}_{КА}$, где $\vec{r}_{КА}$ – радиус орбиты КА);

\vec{V}_{1j} – скорость j -й ЧКМ в точке, определяемой вектором \vec{r}_{1j} ;

α_{1j} – угол между радиусами-векторами \vec{r}_{1j} и \vec{V}_{1j} ;

α_0 – угол между радиусом-вектором \vec{r}_0 и вектором скорости \vec{V}_{0j} .

Угол α_0 определяется по следующей формуле:

$$\cos \alpha_0 = \frac{\vec{r}_0 \cdot \vec{V}_{0j}}{|\vec{r}_0| \cdot |\vec{V}_{0j}|} = \frac{x_{0j} \cdot V_{0jx} + y_{0j} \cdot V_{0jy} + z_{0j} \cdot V_{0jz}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \cdot \sqrt{V_{0jx}^2 + V_{0jy}^2 + V_{0jz}^2}}, \quad (1)$$

где x_{0j}, y_{0j}, z_{0j} – проекции радиуса-вектора \vec{r}_0 на оси АГЭСК;

$V_{0jx}, V_{0jy}, V_{0jz}$ – проекции вектора скорости выбранной ЧКМ на оси АГЭСК.

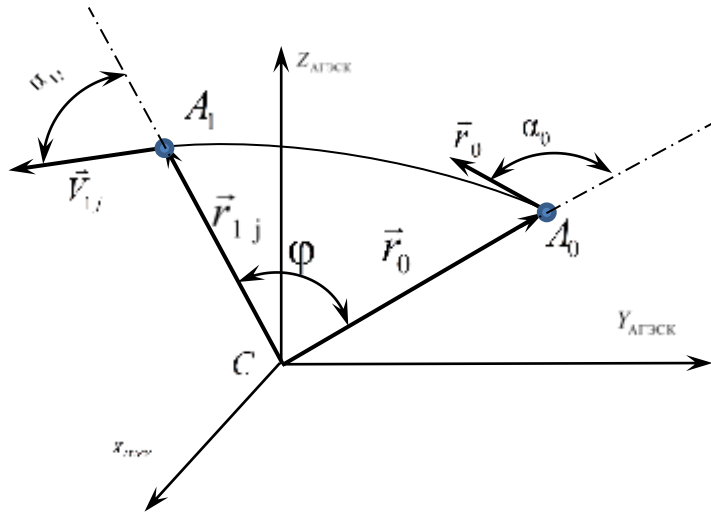


Рис. 2. Схема определения угловой дальности

Для определения зависимости между параметрами движения ЧКМ в точках A_0 и A_1 (рис. 2) используется вектор Лапласа. Для точки A_0

$$\vec{f}_{A_0} = \vec{V}_{0j} \times (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) - \frac{\mu \cdot \vec{r}_0}{r_0}, \tag{2}$$

где \vec{f}_{A_0} – вектор Лапласа, вычисленный в точке A_0 ;
 μ – гравитационная постоянная Земли.

Для точки A_1

$$\vec{f}_{A_1} = \vec{V}_{1j} \times (\vec{r}_{1j} \times \vec{V}_{1j}) - \frac{\mu \cdot \vec{r}_{1j}}{r_{1j}}, \tag{3}$$

где \vec{f}_{A_1} – вектор Лапласа, вычисленный в точке A_1 ;
 \vec{r}_{1j} – радиус-вектор точки A_1 .

Вектор Лапласа есть вектор постоянный, как по модулю, так и по направлению. Поэтому с учетом (2) и (3) справедливо следующее равенство:

$$\vec{V}_{0j} \times (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) - \frac{\mu \cdot \vec{r}_0}{r_0} = \vec{V}_{1j} \times (\vec{r}_{1j} \times \vec{V}_{1j}) - \frac{\mu \cdot \vec{r}_{1j}}{r_{1j}}. \tag{4}$$

При движении КА в поле гравитационной центральной силы имеет место закон сохранения момента количества движения, при этом вектор кинетического момента по времени не изменяется:

$$\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j} = \vec{r}_{1j} \times \vec{V}_{1j}. \tag{5}$$

Тогда с учетом зависимостей (4) и (5) можно записать следующее выражение:

$$\vec{V}_{0j} \times (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) - \frac{\mu \cdot \vec{r}_0}{r_0} + \frac{\mu \cdot \vec{r}_{1j}}{r_{1j}} = \vec{V}_{1j} \times (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}). \tag{6}$$

Введем замену:

$$\vec{b} = \vec{V}_{0j} \times (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) - \frac{\mu \cdot \vec{r}_0}{r_0} + \frac{\mu \cdot \vec{r}_{1j}}{r_{1j}}. \tag{7}$$

Из выражения (6) видно, что $\vec{b} \perp \vec{V}_{1j}$ и $\vec{b} \perp (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j})$ как результат векторного произведения. Тогда на основании вышеизложенного, выражение для \vec{V}_{1j} можно записать в следующем виде:

$$\vec{V}_{1j} = \frac{(\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) \times \vec{b}}{\left| (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) \right|^2}. \quad (8)$$

С учетом введенной замены (7), после соответствующих преобразований, выражение для скорости примет следующий вид:

$$\vec{V}_{1j} = \vec{V}_{0j} + \frac{\mu \cdot (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) \times \begin{pmatrix} \vec{r}_{1j} - \vec{r}_0 \\ r_{1j} - r_0 \end{pmatrix}}{\left| (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) \right|^2}. \quad (9)$$

Для нахождения проекций V_{1jx} , V_{1jy} , V_{1jz} скорости \vec{V}_{1j} на оси АГСЭК находятся проекции каждого вектора, входящего в выражения скорости \vec{V}_{1j} .

При движении ЧКМ в центральном гравитационном поле выполняется закон сохранения энергии:

$$\frac{V_{1j}^2}{2} - \frac{\mu}{r_{1j}} = \frac{V_{0j}^2}{2} - \frac{\mu}{r_0}. \quad (10)$$

На основании выражения (10) модуль искомого радиуса-вектора определится по формуле

$$r_{1j} = \frac{2\mu}{V_{1j}^2 - V_{0j}^2 + \frac{2\mu}{r_0}}, \quad (11)$$

или с учетом зависимости (8):

$$r_{1j} = \frac{2\mu}{\left(\frac{(\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) \times \vec{b}}{\left| (\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) \right|^2} \right)^2 - V_{0j}^2 + \frac{2\mu}{r_0}}. \quad (12)$$

Окончательное выражение для вычисления величины радиуса-вектора r_{1j} , полученное после проведения ряда математических преобразований, может быть представлено в следующем виде:

$$r_{1j} = \frac{r_0^2 \cdot V_{0j}^2 \cdot \sin^2 \alpha_{0j}}{r_0 \cdot V_{0j}^2 \cdot (\cos \varphi - \cos \alpha_{0j} \cdot \cos(\alpha_{0j} - \varphi)) + \mu \cdot (1 - \cos \varphi)}. \quad (13)$$

Для однозначного определения положения ЧКМ относительно первоначального положения в зависимости от угловой дальности необходимо найти направление радиуса-вектора \vec{r}_{1j} .

Для решения данной задачи необходимо ввести следующие единичные векторы:

$$\frac{\vec{r}_0}{r_0} = \vec{i}_0, \quad (14)$$

$$\frac{(\vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j}) \times \vec{r}_0}{\left| \vec{r}_0 \times \vec{V}_{0j} \right| \cdot \left| \vec{r}_0 \right|} = \vec{i}_1. \quad (15)$$

Очевидно, что $\vec{i}_0 \perp \vec{i}_1$, поэтому можно записать:

$$\vec{r}_{1j} = |\vec{r}_{1j}| \cdot (\cos \varphi \cdot \vec{i}_0 + \sin \varphi \cdot \vec{i}_1). \quad (16)$$

Для окончательных расчетов необходимо найти проекции \vec{r}_{1j} на оси АГЭСК – r_{1jx} , r_{1jy} , r_{1jz} .

Таким образом, предложенный выше подход позволяет определить радиус-вектор точки соударения ЧКМ и КА, а также найти скорость ЧКМ, находящейся в точке столкновения с КА. Следует отметить, что новое положение ЧКМ относительно ее первоначального положения определяется угловой дальностью, которая является произвольной величиной.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ПЕРЕСЕКАЮЩИХ ОРБИТУ ЧАСТИЦЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ

Положение ЧКМ определяется радиусом-вектором \vec{r}_{1j} . Случайно образовавшаяся в результате внешних событий ЧКМ может пересечь орбиты других КА. На основании принятого допущения точка пересечения орбит ЧКМ и КА является и точкой их встречи. При этом следует определить параметры орбит, которые могут пересечь орбиту ЧКМ в точке пространства, положение которой задается радиусом-вектором \vec{r}_{1j} . На рис. 3 обозначены:

- орбита ЧКМ через параметры Ω_{1j} , i_{1j} , u_{1j} ;
- M – точка встречи.

Для нахождения допустимого интервала наклонения проводится меридиан [2], проходящий через точку встречи (рис. 3) [3].

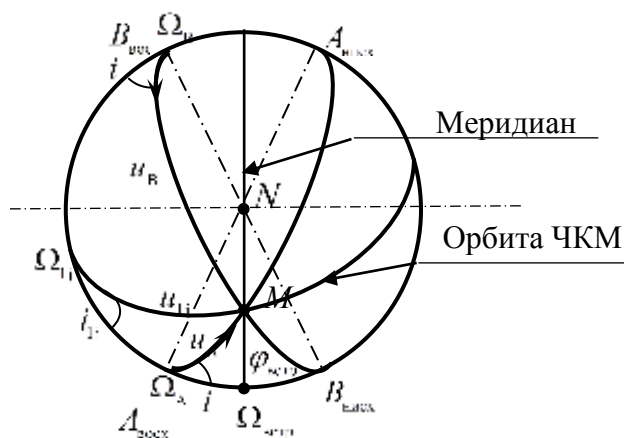


Рис. 3. Допустимые пределы параметров орбит КА, пересекающих заданную орбиту ЧКМ в данной точке

Тогда с учетом выражения $\sin \varphi_{\text{встр}} = \sin u_{1j} \cdot \sin i_{1j}$ можно записать следующее:

$$\varphi_{\text{встр}} = \arcsin(\sin u_{1j} \cdot \sin i_{1j}),$$

- где
- u_{1j} – аргумент широты ЧКМ;
 - i_{1j} – наклонение орбиты ЧКМ;
 - Ω_{1j} – прямое восхождение восходящего узла (ПВВУ) орбиты ЧКМ.

Допустимый интервал наклонений орбит КА находится в пределах, определяемых выражением

$$I_{\text{доп}} = [i_{\text{пред}}; 180 - i_{\text{пред}}], \quad (17)$$

где $i_{\text{пред}} = |\varphi_{\text{встр}}|$. Следует отметить, что для граничных точек этого интервала точку M пересекает единственная орбита, причем точка встречи совпадает с апексом орбиты, т. е. $u_{\text{КА}} = 90^\circ$. Для любого другого допустимого наклонения $i_{\text{пред}} < i_{\text{доп}} < 180 - i_{\text{пред}}$ точку M пересекают две орбиты данного наклонения (на восходящей и нисходящей части витка, которым в дальнейшем присвоены индексы A и B).

Для заданного значения наклонения $i_{\text{КА}} \in I_{\text{доп}}$ необходимо найти значения ПВВУ Ω_A и Ω_B двух орбит, проходящих через точку встречи, а также аргументы широты u_A и u_B на данных орбитах при прохождении ими точки M . При выполнении этого условия справедливо следующее выражение:

$$\sin u_A = \frac{\sin \varphi_{\text{встр}}}{\sin i_{\text{КА}}} \Leftrightarrow \text{sign}(\cos u_A) = \text{sign}(\cos u_{1j}). \quad (18)$$

Если u_{1j} находится в промежутке $0 \leq u_{1j} \leq 180^\circ$, тогда:

$$u_A = \arcsin\left(\frac{\sin \varphi_{\text{встр}}}{\sin i_{\text{КА}}}\right);$$

$$u_B = 180^\circ - u_A.$$

Используя правило Непера, можно записать следующее:

$$\sin \Delta\Omega = \tan \varphi_{\text{встр}} \cdot \text{c} \tan i_{1j}; \quad \cos \Delta\Omega = \frac{\cos u_{1j}}{\cos \varphi_{\text{встр}}}, \quad (19)$$

где $\Delta\Omega = \Omega_{\text{встр}} - \Omega_{1j}$.

Окончательно получим:

$$\Delta\Omega_{A(B)} = \Omega_{\text{встр}} - \Omega_{A(B)}; \quad \cos \Delta\Omega_{A(B)} = \frac{\cos u_{A(B)}}{\cos \varphi_{\text{встр}}}; \quad \sin \Delta\Omega_{A(B)} = \tan \varphi_{\text{встр}} \cdot \text{c} \tan i_{1j}, \quad (20)$$

где $\Omega_{A(B)}$ – прямое восхождение восходящего узла возможной орбиты;

$u_{A(B)}$ – аргумент широты возможной орбиты;

$\Omega_{\text{встр}}$ – прямое восхождение меридиана.

После определения $\Delta\Omega_{A(B)}$ находятся пределы прямого восхождения восходящего узла $\Omega_{A(B)}$ орбит, пересекающих орбиту ЧКМ.

Таким образом, определяются пределы изменения параметров орбиты, пересекающей орбиту ЧКМ в заданной точке. Следовательно, по выбранным параметрам орбиты, находящимся в найденных пределах, а также по координатам точки пересечения двух орбит на основании [4] определяются проекции скорости $V_{\text{КА}x}, V_{\text{КА}y}, V_{\text{КА}z}$ на оси АГЭСК.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ И УГЛОВ ПОДЛЕТА ПРИ СБЛИЖЕНИИ ЧАСТИЦЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Для нахождения параметров сближения необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить углы подлета ЧКМ к КА для нахождения направления действия ударного импульса в точке столкновения;
- 2) определить относительную скорость столкновения.

Для нахождения ударного воздействия определяется относительная скорость встречи ЧКМ и КА ($\Delta \vec{V}$):

$$\Delta V_x = V_{КАx} - V_{1jx}; \quad \Delta V_y = V_{КАy} - V_{1jy}; \quad \Delta V_z = V_{КАz} - V_{1jz}.$$

Углы подлета определяются с помощью формул аналитической геометрии. Для определения угла между векторами скоростей используется выражение

$$\lambda = \arccos \left(\frac{\vec{V}_{1j} \cdot \vec{V}_{КА}}{|\vec{V}_{1j}| \cdot |\vec{V}_{КА}|} \right). \quad (21)$$

Для определения угла наклона вектора скорости к линии местного горизонта используется уравнение

$$\gamma = \arccos \left(\frac{V_{1j\tau}}{V_{1j}} \right), \quad (22)$$

где $V_{1j\tau}$ – тангенциальная составляющая вектора скорости ЧКМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная расчетная схема позволяет определить углы подлета и относительные скорости сближения ЧКМ, образовавшихся в результате столкновения двух произвольных космических объектов, и КА в точке их предполагаемого столкновения. Положение точки предполагаемого столкновения задается углом, отсчитываемым от места образования фрагментов. Особенностью предложенного подхода является возможность его использования для определения искомых значений в произвольный момент времени с применением вектора Лапласа.

Полученные в статье результаты могут быть использованы для решения других практических задач, например для облета опасных зон ОКП.

Список используемых источников

1. Математическая модель движения фрагментов разрушения космических объектов при высокоскоростном соударении / Л.П. Зозуля [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – Вып. 6 – С. 110–116.
2. Воднев В.Г., Наумович А.Ф., Наумович Н.Ф. Математический словарь высшей школы. – М.: МПИ, 1989. – 527 с.
3. Мамон П.А., Половников П.А. Приложения теорем сферической тригонометрии к решению практических задач. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1973. – 18 с.
4. Эскобал П. Методы определения орбит. – М.: Мир, 1970. – 472 с.

И.О. Голиков,
кандидат техн. наук;
Е.Л. Лебедев,
доктор техн. наук, профессор;
Д.П. Мохнаткин,
кандидат техн. наук

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМОГО УЧАСТКА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Представлен порядок действий, необходимый для установления степени пластической деформации стальных силовых конструкций стартового оборудования на участках контроля по локальным значениям коэрцитивной силы, полученным в результате физического метода контроля, и ранее полученным экспериментальным зависимостям коэрцитивной силы конструкционной стали от различных значений упругих и пластических деформаций.

Ключевые слова: коэрцитиметрический контроль, механические напряжения, коэрцитивная сила, металлоконструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения текущего технического состояния металлоконструкций стартового оборудования необходимо обладать информацией об их напряженно-деформированном состоянии (НДС).

В настоящее время магнитные методы активно используются для контроля структуры и механических свойств ферромагнитных сплавов. Одним из основных методов магнитного структурного анализа является контроль по коэрцитивной силе H_C , поскольку этот параметр показывает высокую чувствительность к характеристикам материала: структуре, фазовому составу, внутренним напряжениям [1–5]. Очевидно, что в условиях эксплуатации силовых металлоконструкций стартового оборудования влияние на структурное состояние оказывают только силы внешнего воздействия, способные внести изменение в перераспределение внутренних напряжений в конструкционной стали. Таким образом, своевременные измерения H_C позволят актуализировать информацию о НДС исследуемой конструкции. Основные методы измерения H_C сводятся к использованию приставных электромагнитов [4]. Для контроля крупногабаритных металлоконструкций наиболее часто используется приставной П-образный электромагнит (ПЭМУ), который намагничивает вдоль поверхности область между полюсами до предельных значений петли гистерезиса, затем в процессе программно-управляемого размагничивания фиксируется значение тока, требуемое для полного размагничивания контролируемого участка, которое и пересчитывается в значение коэрцитивной силы. Расстояние между полюсами ПЭМУ многократно меньше трасс контроля крупногабаритных изделий, поэтому при коэрцитиметрическом контроле многократные измерения формируют значительный массив данных, который требует анализа.

Статья направлена на разработку алгоритма обработки данных результатов коэрцитиметрического контроля с целью получения информации о действующих напряжениях в конструкции, выявления зон концентрации напряжений (ЗКН) (ГОСТ Р 52330-2005 «Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования»), зон с пластической деформацией и определения ее степени.

АНАЛИЗ ПОЛНОЙ ВЫБОРКИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ

Полная выборка значений коэрцитивной силы сформирована на основе следующих условий:

- выборка формируется из значений, полученных на равнонагруженном участке МК СО;
- количество замеров в одной точке не менее трех (ГОСТ 30415-96 «Саль. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом») и не более 10 объединяются в серию;
- количество серий (точек контроля) определяется геометрическими параметрами участка контроля.

В таком случае выборка данных контроля имеет вид:

$$\begin{aligned} & H_{C_{11}}, H_{C_{12}}, H_{C_{13}}, \dots, H_{C_{1n_1}}, \\ & H_{C_{21}}, H_{C_{22}}, H_{C_{23}}, \dots, H_{C_{2n_2}}, \\ & \dots \dots \dots \\ & H_{C_{k1}}, H_{C_{k2}}, H_{C_{k3}}, \dots, H_{C_{kn_k}}, \end{aligned}$$

где H_C – значение коэрцитивной силы;

n – количество замеров в серии (в одной точке), $n \in [3 \div 10]$;

k – количество серий (точек контроля).

Анализ данной выборки заключается в проверке гипотезы, что данные всех k серий принадлежат одной и той же генеральной совокупности, которая формируется вычислением дисперсий случайной величины H_C :

– внутрисерийной:

$$S_1^2 = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (H_{C_{ji}} - \overline{H_{C_j}})^2}{N - k};$$

– межсерийной:

$$S_2^2 = \sum_{j=1}^k \frac{n_j (\overline{H_{C_j}} - \overline{H_C})^2}{k - 1},$$

где $\overline{H_{C_j}}$ – среднее значение коэрцитивной силы внутри серии,

$$\overline{H_{C_j}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} H_{C_{ij}}}{n_j};$$

N – общее количество замеров.

А также сравнением отношения полученных дисперсий со значением функции Фишера (F) для конечных выборок:

$$\frac{S_2^2}{S_1^2} < F_{\frac{k-1}{N-k}}. \quad (*)$$

В случае выполнения неравенства (*) можно делать вывод о том, что результаты измерений принадлежат одной и той же совокупности. Это показывает равномерность нагрузки объекта, отсутствие повышенных напряжений на контролируемом участке, а также его работу в зоне упругих деформаций. По общему среднему значению коэрцитивной силы по выборке $\overline{H_C}$ вида

$$\overline{H_C} = \frac{\sum_{j=1}^k n_j \overline{H_{C_j}}}{N}$$

и по экспериментально полученным зависимостям коэрцитивной силы от действующих упругих напряжений для данной стали [6] есть возможность определения действующих напряжений в диагностируемой металлоконструкции стартового оборудования σ_d (рис. 1,

точка А). Полученное действующее напряжение в металлоконструкции можно сравнить с расчетным и с допустимым $[\sigma]$, установленными для данного вида конструкций.

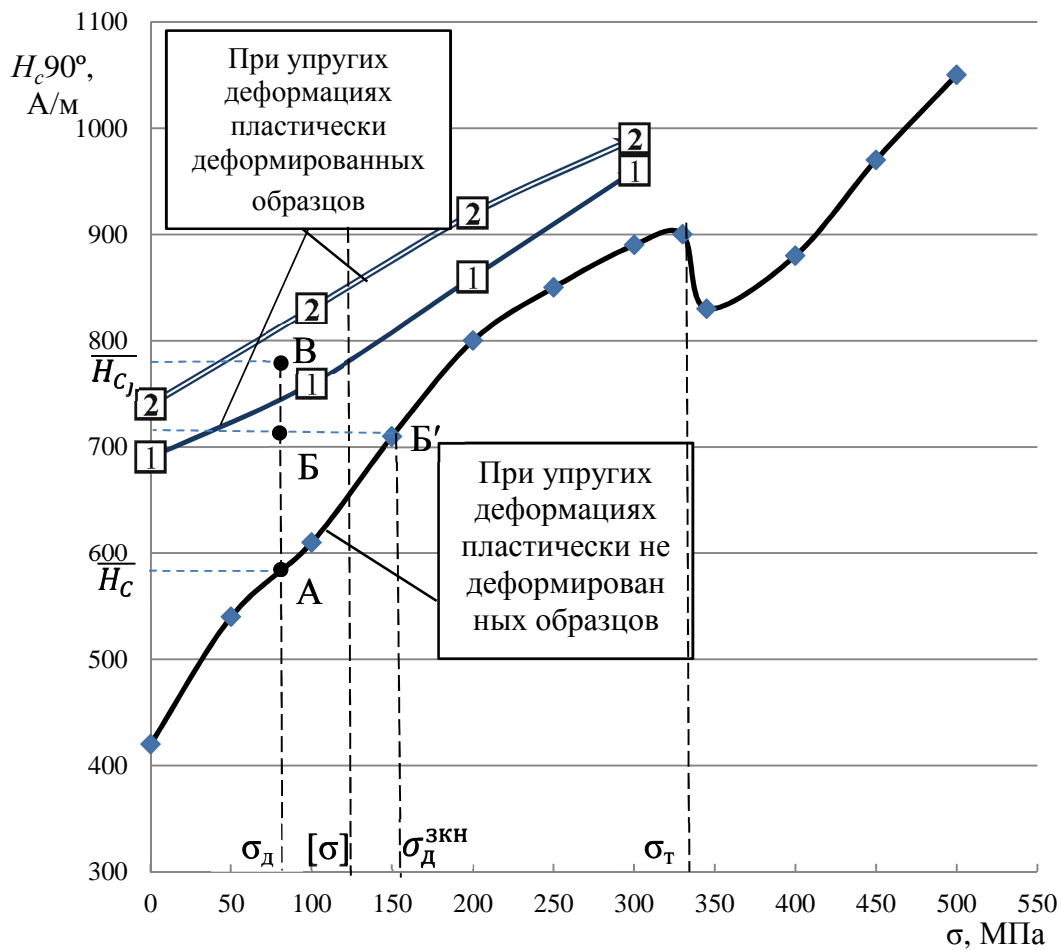


Рис. 1. Экспериментальная зависимость коэрцитивной силы от действующих напряжений (♦ — для пластически не деформированных образцов; — для образцов с пластической деформацией 0,3%; === — для образцов с пластической деформацией 3%)

При $\sigma_d \leq [\sigma]$ контролируемый элемент нагружен равномерно и в пределах допуска. Эксплуатация элемента конструкции осуществляется в штатном режиме. При $[\sigma] \leq \sigma_d \leq \sigma_T$ очевидно, что элемент конструкции также функционирует в зоне упругих деформаций. Однако значения действующих напряжений превышают допустимые. В таком случае на контролируемом объекте необходимо провести работы по устранению перегруженности элементов металлоконструкций, возможно провести ремонтно-восстановительные работы по сохранению геометрии контролируемого элемента путем обязательного усиления металлоконструкции.

Особенностью эксплуатации металлоконструкций стартового оборудования ракетно-космических комплексов является противостояние пиковым нагрузкам, возникающим, как правило, во время пусков ракет космического назначения. Именно при пиковых нагрузках вероятнее всего развитие локальных зон пластической деформации конструкционной стали. Выявление подобных зон с помощью коэрцитиметрического метода возможно в следующем порядке. При отношении дисперсий, большем значения функции F [невыполнение неравенства (*)], имеет место статистическая неподконтрольность результатов измерений. В таком случае по наиболее удаленному значению $\overline{H_c}$ от общего среднего значения определяется j -й участок как ЗКН. По среднему значению коэрцитивных сил в «выпадающей серии» с помо-

щью ранее полученных экспериментальных зависимостей возможно определение действующих напряжений в установленной ЗКН. Для этого по общему среднему значению в выборке $\overline{H_C}$ и экспериментально полученной зависимости коэрцитивной силы от действующих напряжений для пластически не деформированных образцов $H_{Cупр}(\sigma)$ определяем действующее в конструкции напряжение σ_d . Далее необходимо определить: в упругой или пластической зоне деформации находится выявленная ЗКН. Данный шаг реализуется путем сравнения $\overline{H_{C_j}} < H_{C\delta_{min}}(\sigma_d)$, где $H_{C\delta_{min}}(\sigma)$ – это экспериментально полученная зависимость коэрцитивной силы от напряжений при минимальной степени предварительной пластической деформации испытуемых образцов. В случае, если $\overline{H_{C_j}} < H_{C\delta_{min}}(\sigma_d)$, можно утверждать, что значения деформации в исследуемой зоне не достигли пластических (точка Б на рис. 1), а следовательно, повышенные значения напряжений в данной точке $\sigma_d^{ЗКН}$ определяются по экспериментальной зависимости $H_{Cупр}(\sigma)$ (точка Б' на рис. 1). Однако даже в упругой зоне деформации значения напряжений ЗКН могут превышать допустимые для данного элемента конструкции ($\sigma_d^{ЗКН} > [\sigma]$). Выявленные зоны требуют разгрузки, чего возможно добиться путем проведения ремонтно-восстановительных работ по усилению конструкции.

При $\overline{H_{C_j}} \geq H_{C\delta_{min}}(\sigma_d)$ очевидно, что при установленных для всего равнонагруженного участка действующих напряжений σ_d такое значение коэрцитивной силы может соответствовать только пластически деформированной зоне контроля (точка В на рис. 1). Оценить максимальную величину воздействия на исследуемый элемент в период между сеансами диагностики возможно, оценив степень пластической деформации ЗКН. Применяя алгоритм билинейной интерполяции для имеющихся зависимостей в случае $H_{C\delta_2}(\sigma) > \overline{H_{C_j}} > H_{C\delta_1}(\sigma)$, получаем следующую формулу:

$$\delta_d = \frac{(\overline{H_{C_j}} - H_{C\delta_1}(\sigma_d))(\delta_2 - \delta_1)}{H_{C\delta_2}(\sigma_d) - H_{C\delta_1}(\sigma_d)} + \delta_1,$$

где δ_n – степень пластической деформации испытуемых образцов;
 $H_{C\delta_n}(\sigma)$ – экспериментальная зависимость коэрцитивной силы от действующих упругих напряжений, полученная на образцах с пластической деформацией δ_n .

Для подтверждения факта выявления критического сечения в исследуемой металлоконструкции необходимо убедиться в наличии повышенных значений диагностического параметра, характерного для установленной ЗКН на протяжении всего равнонагруженного участка рассматриваемого сечения. Соответствие измеренных значений коэрцитивной силы в максимально нагруженной части сечения значению $\overline{H_{C_j}}$ подтверждает критичность обследуемого сечения. Структура рассмотренного алгоритма показана на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ этапов разработанного алгоритма показал, что точность выявления зон пластической деформации исследуемой металлоконструкции определяется возможностью получения экспериментальной зависимости значений коэрцитивной силы от упругих напряжений на образцах с минимально возможной степенью предварительной пластической деформации испытуемых образцов необходимой марки стали.

Разработанный алгоритм позволяет:

– выявить зоны концентрации напряжений и определить их границы;

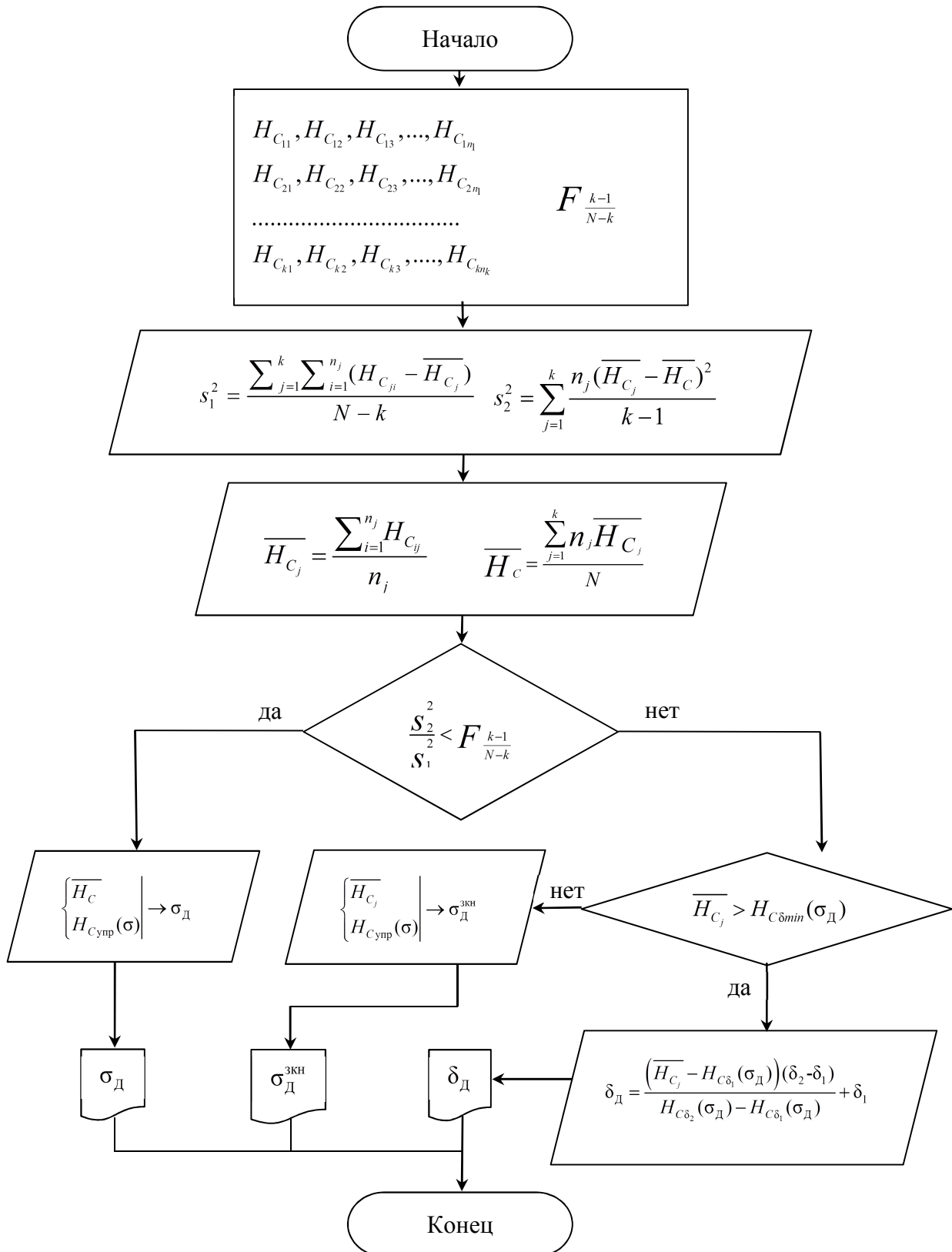


Рис. 2. Алгоритм обработки результатов коэфициметрического контроля напряженно-деформированного состояния равномерно нагруженного элемента металлоконструкции стартового оборудования

- определить характер и значения внутренних механических напряжений в зонах концентрации напряжений;
- оценить распределение полей внутренних механических напряжений;
- сопоставить результаты контроля напряженно-деформированного состояния с расчетными, допустимыми и предельными значениями напряжений, установленными для исследуемой конструкции;
- оценить кинетику развития зон концентраций напряжений (при периодическом контроле);
- создать основу для автоматизации процесса обработки результатов коэрцитиметрического контроля напряженно-деформированного состояния как равнонагруженного элемента металлоконструкции стартового оборудования, так и конструкции в целом.

Автоматизация процесса обработки данных диагностики напряженно-деформированного состояния металлоконструкций стартового оборудования позволит оперативно предоставлять информацию для систем поддержки принятия решения по дальнейшей эксплуатации обследуемых конструкций.

Список используемых источников

1. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества – физическая основа магнитного структурного анализа (обзор) // Дефектоскопия. – 1981. – № 8. – С. 5–21.
2. *Gorkunov E. S.* Magnetic structural-phase analysis as applied to diagnosing and evaluating the lifetime of products and structural components. Part 1, 2 // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures.* – 2015. – Is. 1. – P. 6–40.
3. *Gorkunov E. S.* Magnetic structural-phase analysis. Part 2 // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures.* – 2015. – Is. 3. – P. 6–50.
4. О снижении влияния зазора на результаты коэрцитиметрии при учете свойств приставного преобразователя / А.П. Ничипурук [и др.] // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 45–53.
5. *Гобов Ю.Л., Жаков С.В., Михайлов А.В.* Измерение коэрцитивной силы в локальной области образца // Дефектоскопия. – 201. – № 11. – С. 27–32.
6. *Мохнаткин Д.П.* Методика оценивания потери несущей способности металлоконструкций по результатам коэрцитиметрического контроля / С.А. Смуров [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 658. – С. 111–118.

Н.В. Головчинская;
В.О. Головчинский,
кандидат техн. наук;
Н.С. Демидова;
А.И. Птушкин,
кандидат техн. наук, профессор

МЕТОДИКА ОБОБЩЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КОСМОДРОМОВ

Рассмотрена процедура получения обобщенной оценки текущего технического состояния объектов наземной космической инфраструктуры космодромов как при условии однотипной формализации ключевых параметров, так и в условиях существенной неопределенности с использованием экспертных оценок.

Ключевые слова: текущее техническое состояние, объект наземной космической инфраструктуры, ресурс, жизненный цикл, отказ, степень проблемности.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема получения полной и достоверной информации о текущем техническом состоянии (ТТС) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) космодромов еще далека от своего решения. Имеются частные разработки, но единого взгляда или единого подхода к анализу ТТС ОНКИ в целом пока не существует. В основном теоретические и прикладные вопросы контроля и диагностирования достаточно полно рассмотрены для объектов, систем и агрегатов общепромышленных комплексов, железнодорожного и автомобильного транспорта, кораблей Военно-морского флота. Но в работах, посвященных этим вопросам, не учитываются специфические особенности наземных комплексов космического назначения и условия их эксплуатации.

В системе эксплуатации как ОНКИ, так и в целом объектов ответственного и специального назначения, имеющих значительную техническую сложность, традиционно используется стратегия управления их техническим состоянием, основанная на знании фактического, по данным конкретного обследования, состояния этих объектов. То же касается систем и комплексов, а также составных частей отдельных объектов, агрегатов. Такая стратегия является по сути индивидуальной и далее принимает во внимание не только техническое состояние эксплуатируемого объекта в определенный момент времени, но также и условия функционирования и применения этого объекта [3–5]. Однако при подобном (дискретном) управлении эксплуатацией объектов, которое обусловлено спецификой применения методов неразрушающего контроля, учет реального состояния объекта на текущий момент времени не в состоянии исключить такой фактор, как возможность возникновения «постепенных» отказов, возникающих в результате естественного износа и устаревания.

Для исключения влияния указанного фактора на результат управления эксплуатацией ОНКИ дальнейшим развитием стратегии управления эксплуатацией стала стратегия управления по текущим и прогнозным оценкам состояния (текущему состоянию) контролируемого объекта. Такая стратегия обеспечивает гарантированное предупреждение отказов на заданном временном интервале эксплуатации (функционирования) объекта (системы) вследствие его «постепенных» отказов (старения)[5]. Такой подход является актуальным ввиду того, что доля «постепенных» отказов оборудования ОНКИ в среднем значении превышает

50%, а для механического оборудования и металлоконструкций часто достигает величины 80–90%.

Основным элементом стратегии управления по текущим и прогнозным оценкам состояния контролируемого объекта является мониторинг технического состояния, актуальной задачей которого стало подтверждение соответствующей информации с целью гарантированной оценки технического состояния объектов. В настоящее время в понятие мониторинга включается не только наблюдение и получение информации о текущем состоянии контролируемого объекта, но и получение прогнозной информации о его будущем состоянии и возможных вариантах действий, направленных на изменение этого состояния в случае необходимости. Поэтому такой результат мониторинга, как оценка текущего технического состояния ОНКИ можно интерпретировать как элемент системы поддержки принятия решения о выполнении на контролируемом объекте (системе) комплекса соответствующих эксплуатационных мероприятий, необходимых для поддержания его работоспособности (готовности) и безопасности. При этом описанная задача актуальна при проведении продления срока службы (ресурса) действующих объектов космодромов, которые нередко эксплуатируются за пределами назначенных показателей ресурса и срока службы [6]. Поэтому использование обобщенной оценки текущего технического состояния позволяет в значительной степени как уменьшить трудоемкость самого диагностирования технического состояния, так и снизить временные затраты на прогнозную деятельность по определению остаточного ресурса и предельных состояний.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МЕТОДИКИ ОБОБЩЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Методика базируется на положении о том, что «постепенные» отказы (старение) начинают проявляться только после истечения гарантийного срока эксплуатации объекта. В настоящее время такой срок, как правило, составляет 10 лет для основной массы ОНКИ. Этот же временной отрезок можно отнести к ограничениям настоящей методики.

Основными исходными параметрами для разработанной методики являются требуемые (заданные в эксплуатационной документации) значения ключевых параметров ОНКИ для каждого объекта (его подобъектов, агрегатов) и требуемые суммарные значения ключевых параметров систем (комплексов).

К исходным данным добавляются требуемые значения качественных и количественных параметров ОНКИ, получаемые на основе обработки экспертных знаний, что является стабилизирующим фактором при применении методики в условиях неопределенности, ограничения времени на принятие решения либо при отсутствии или сложности формализованного описания объекта существующими методами [1, 2].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Объединение разнородных параметров производится за счет их однотипной формализации, после чего выполняется оценка.

1. На начальном этапе по заданным условиям эксплуатации и характеристикам объекта НКИ осуществляется выбор необходимых параметров, суммарно однозначно характеризующих его текущее техническое состояние.

2. Далее производится оценка степени проблемности технического состояния исследуемого объекта по совокупности параметров.

Данную оценку предложено производить согласно [5], где «значения параметров принимаются как x_{ijk} , где i – номер объекта ($i = \overline{1, s}$, где s – количество объектов); j – номер составной части объекта ($j = \overline{1, t}$, где t – количество составных частей объекта); k – номер параметра ($k = \overline{1, u}$, где u – количество параметров).

Для параметров, имеющих верхнее ограничение значением x_{ijk}^B , нижнее ограничение x_{ijk}^H , а также номинальные значения $x_{ijk}^{НОМ}$, имеется следующая оценка:

$$F_{ijk} = \begin{cases} 1 - \frac{x_{ijk} - x_{ijk}^H}{x_{ijk}^{НОМ} - x_{ijk}^H}, & \text{где } x_{ijk}^H \leq x_{ijk} \leq x_{ijk}^{НОМ}; \\ 1 - \frac{x_{ijk}^B - x_{ijk}}{x_{ijk}^B - x_{ijk}^{НОМ}}, & \text{где } x_{ijk}^B \geq x_{ijk} \geq x_{ijk}^{НОМ}. \end{cases} \quad (1)$$

Для параметров, ограниченных с одной стороны, зависимость определяется выражениями:

$$F_{ijk} = \begin{cases} 1 - \frac{|x_{ijk} - x_{ijk}^B|}{|x_{ijk}^{ИСХ} - x_{ijk}^B|}, & \text{где } x_{ijk} \geq x_{ijk}^{ИСХ}, \\ 0, & \text{где } x_{ijk} < x_{ijk}^{ИСХ} \end{cases} \quad (2)$$

(для параметров, имеющих только верхнее ограничение, где $x_{ijk}^{ИСХ}$ – исходное значение параметра) и

$$F_{ijk} = \begin{cases} 1 - \frac{|x_{ijk} - x_{ijk}^H|}{|x_{ijk}^{ИСХ} - x_{ijk}^H|}, & \text{где } x_{ijk} \leq x_{ijk}^{ИСХ}, \\ 0, & \text{где } x_{ijk} > x_{ijk}^{ИСХ} \end{cases} \quad (3)$$

(для параметров, имеющих только нижнее ограничение, где $x_{ijk}^{ИСХ}$ – исходное значение параметра).

В роли меры индекса проблемности технического состояния (техническое состояние j -й составной части i -го объекта – F_{ij} , i -го объекта в целом – F_i и совокупности объектов – F) выступают соответствующие взвешенные евклидовы расстояния ρ :

$$F_{ij} = \rho(\vec{0}, \vec{\pi}_{ij}), F_i = \rho(\vec{0}, \vec{\pi}_i), F = \rho(\vec{0}, \vec{\pi}),$$

где $\vec{0}$ – нулевой вектор,

$$\vec{\pi}_{ij} = [F_{ij1}, F_{ij2}, \dots, F_{iju}]^T, \vec{\pi}_i = [F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{it}]^T, \vec{\pi} = [F_1, F_2, \dots, F_s]^T.$$

Тогда индексы проблемности выражаются зависимостями:

$$F_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^u \alpha_{ijk} F_{ijk}^2}, F_i = \sqrt{\sum_{1=s}^t \alpha_{ij} F_{ij}^2}, \quad (4)$$

$$F = \sqrt{\sum_{j=1}^s \alpha_i F_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^s \alpha_i \left(\sum_{1=s}^t \alpha_{ij} \left(\sum_{k=1}^u \alpha_{ijk} F_{ijk}^2 \right) \right)}, \quad (5)$$

где α_{ijk} , α_{ij} , α_i – нормированные веса k -го параметра j -й составной части i -го объекта (α_{ijk} характеризуют тяжесть последствий выхода k -го параметра за пределы нормы, α_{ij} характеризуют тяжесть последствий отказа составной части объекта, α_i – объекта в целом). Соответственно, $\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^s \alpha_{ij}}{n}$, а α_{ijk} и α_{ij} определяются экспертным путем [5, 6].

3. По результатам регистрации общих значений индексов проблемности составных частей объектов и объектов в целом формируется сводная таблица индексов для оценивания влияния полученных диагностических признаков на изменение технического состояния объектов либо их группы.

4. В случае, если оценка текущего технического состояния объекта НКИ представляет сложность, на следующем этапе для получения требуемых значений качественных и количественных параметров используется нечетко-возможностный подход [1, 2] на основе построения логико-лингвистических моделей (ЛЛМ).

Наиболее важным условием процедуры оценивания состояния ОНКИ является построение математических моделей и выбор способов их построения. В условиях существенной неопределенности, вызванной недостаточностью статистических данных по эксплуатации технически сложных ОНКИ, возможно применение экспертных оценок [1, 2, 5]. Методы такого оценивания в большинстве случаев являются количественными, степень детализации исходной информации зависит от конкретного применения. При этом возможны ограничения количественного анализа по причине недостатка информации об объекте или технологическом процессе, нехватки данных об аварии (отказе объекта), воздействии человеческого фактора и т. п. Эффективным способом в данной ситуации является сравнительное количественное или качественное распределение возникновения того или иного технического состояния. При качественном распределении достаточно иметь четкое обоснование всех классификаций параметров и последствий. При проведении полной количественной оценки необходимо производить учет факта о точности расчетных значений, которая должна соответствовать точности используемых данных и применяемых аналитических методов.

Для восполнения отсутствующей информации о текущем техническом состоянии ОНКИ эксперт выступает в качестве «интеллектуальной информационно-диагностической системы» [1]. При оценивании необходимым условием является использование слабых шкал (порядковых и номинальных). Такие шкалы являются основой для проведения мягких измерений, которые, в свою очередь, используются в экспертных системах поддержки принятия решений [1]. Такие вербально-числовые шкалы позволяют производить переход от лингвистических выражений эксперта к числовым выражениям и образуют так называемые фактор-множества состояний объекта НКИ типа «работоспособное – неработоспособное» [1].

Следовательно, оценка возможности дальнейшей эксплуатации объекта происходит по его действительному техническому состоянию и в соответствии с корректностью вынесенного экспертом заключения (или комиссией экспертов) о количественной оценке технического состояния в данный момент времени [1]. Способ представления экспертных оценок в импlicative форме типа «Если..., то...» предоставляет возможность воспроизводить соответствующие алгоритмы поведения обширного класса объектов и процессов в различных режимах, таких как: «ситуация – действие», «ситуация – прогноз поведения объекта», «ситуация – принятие решения».

Подход к системе обработки экспертных знаний при моделировании ТС ОНКИ в многомерном пространстве лингвистических переменных заключается в следующем. Дано множество высказываний эксперта A_j :

$$\text{если } \langle X_l = \tilde{U}_{jl} \wedge X_2 = \tilde{U}_{j2} \wedge \dots \wedge X_n = \tilde{U}_{jn}, \text{ то } Y = \tilde{V}_j \rangle, j = 1, \dots, 2^n \quad (6)$$

где нечеткие переменные X_l и значения факторов принадлежат терм-множествам $T(X_l)$ в нечетких лингвистических шкалах:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{jl} \in T(X_l), M_l: T(X_l) \rightarrow F(R^l), l = 1, \dots, n \\ \tilde{V}_j \in T(Y), M_Y: T(Y) \rightarrow F(R^l), \end{aligned} \quad (7)$$

в виде \tilde{U} нечетких чисел (LR) – типа

$$\begin{aligned} M_l(\tilde{U}_{jl}) = \hat{U}_{jl} = (\underline{U}_{jl}, \bar{U}_{jl}, \alpha_{jl}, \beta_{jl}, h_{jl})_{LR}, \\ M_Y(\tilde{V}_j) = \hat{V}_j = (\underline{V}_{jk}, \bar{V}_{jk}, \alpha_{jk}, \beta_{jk}, h_{jk})_{LR}. \end{aligned} \quad (8)$$

Требуется построить аппроксимирующую функцию оценивания ТС ОНКИ:

$$\hat{V} = f(\vec{U}, \vec{B}), \quad (9)$$

минимизирующую нечеткие расстояния между вычисленными по модели и экспертными оценками

$$\sum_{j=1}^{2^n} (V_j - f(U_{j1}, \dots, U_{jn}, \vec{B}))^2 \rightarrow \min_{\vec{B} \in F(R^k)} \quad , \quad (10)$$

где U_{jn} – нечеткое число;
 V_j – терм-множество переменной Y ;
 \vec{B} – вектор коэффициентов полинома;
 $F(R^k)$ – нечеткое k -мерное пространство [1].

Таким образом, математическая формулировка (6) – (10) требует от эксперта соблюдения всех перечисленных выше условий функционирования ОНКИ, что дает возможность не только решать задачи прогнозирования технического состояния во времени, но и представлять решения задачи оценивания текущего технического состояния в традиционной форме, то есть без необходимости перерасчета либо иного представления результатов.

5. На заключительном этапе результаты оценивания текущего технического состояния системы (комплекса) служат для выработки и принятия решения и, в свою очередь, основой для прогнозирования изменения технического состояния исследуемых объектов с использованием как прогноза индекса проблемности, так и экспертных знаний при моделировании технического состояния ОНКИ в многомерном пространстве лингвистических переменных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе вариативного использования различных подходов к определению технического состояния разработанная методика позволяет получать интегральные оценки текущего и прогнозного технического состояния ОНКИ без выполнения емких исследований и вычислений в зависимости от условий применения, ограничений времени проведения оценки и требуемой точности параметров, что в значительной мере ускоряет процесс принятия решений.

Представленная методика обеспечивает проактивное управление ТС ОНКИ и предупреждение возможных неблагоприятных ситуаций при их эксплуатации на всех стадиях жизненного цикла за счет учета расчетных параметров и неформализованной информации с применением логико-лингвистических моделей, что делает ее в значительной мере универсальной в отношении ОНКИ как объектов, имеющих существенную дискретность эксплуатационных процессов.

Список использованных источников

1. *Спесивцев А.В.* Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации. – СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 238 с.
2. *Миронов А.Н.* Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. – МО, 2000. – 329 с.
3. Жизненный цикл и эксплуатационное качество космических средств: учебник / В.И. Звягин [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – Ч. I. – 294 с.
4. *Перминов А.Н., Птушкин А.И.*, Исследование влияния мониторинга технического состояния объектов наземной космической инфраструктуры на эффективность их функционирования // Вестник МАИ. – 2005. – Т. 12, № 3. – С. 74–80.
5. Военно-техническое обоснование направлений развития системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры космодромов: отчет о НИР [шифр «Регламент-14» по теме 2М1677]. – 2016. – 440 с. – № 8316-П.
6. Состав и состояние технической структуры космодромов. – URL: <https://helpiks.org/9-54234.html> (дата обращения: 5.02.2021).

В.И. Горбулин,
доктор техн. наук, профессор;
Д.Л. Каргу,
кандидат техн. наук, доцент;
С.А. Поляков,
кандидат техн. наук;
Н.В. Радионов,
доктор экономических наук, профессор

ОЦЕНИВАНИЕ МАЛЫХ НЕМОДЕЛИРУЕМЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА НАВИГАЦИОННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РАСЩЕПЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС

Предлагается способ оценивания малых немоделируемых сил, действующих на центр масс навигационного космического аппарата (КА), с использованием метода расщепления движения центра масс. Представлена математическая модель движения космического аппарата для оценивания влияния немоделируемых ускорений. Рассмотрены результаты прогноза отклонений по положению КА за различный период действия постоянного ускорения.

Ключевые слова: навигационный космический аппарат, изменение траектории, немоделируемые ускорения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значение отечественной системы спутникового позиционирования для различных социально-экономических и военно-технических целей приобретает приоритетный характер во множестве сложнейших проблем обеспечения жизнедеятельности страны. Такая система и услуги на ее основе являются необходимым условием развития экономики, повышения безопасности жизни, а сама система спутникового позиционирования постепенно становится ключевым элементом во многих областях инфраструктуры стран. Области применения системы ГЛОНАСС и потребители ее координатно-временной и навигационной информации определяются двойным назначением этой системы. Достижение заданных точностных характеристик позволит ГЛОНАСС стать конкурентно способной системой на рынке навигационных услуг, а Вооруженным силам Российской Федерации обеспечить паритетные возможности при применении систем, базирующихся на высокоточном навигационно-временном обеспечении.

Однако в настоящее время существует проблемная ситуация, связанная с ростом точности определения местоположения потребителем и длительным сроком функционирования орбитального сегмента глобальной навигационной системы. Длительный срок активного существования требует учета влияния ускорений различной природы на точность прогноза орбитального движения навигационных КА.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСКОРЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ НА ТОЧНОСТЬ ПРОГНОЗА ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Высокая точность расчета эфемерид навигационных космических аппаратов (НКА) может быть достигнута только при применении адекватной модели движения, учитывающей следующую совокупность сил и представленной на рис. 1 [1–6].

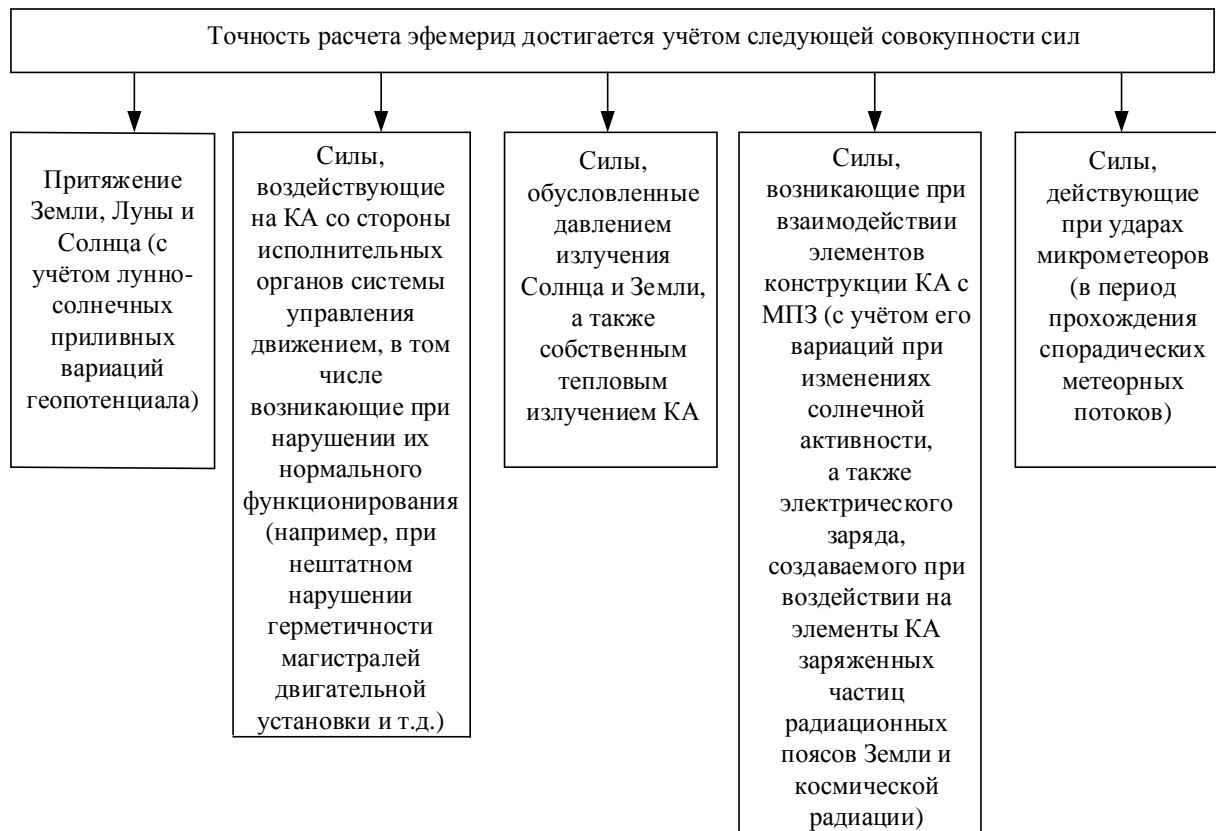


Рис. 1. Совокупность сил, влияющих на точность расчета эфемерид

При определении этой совокупности для НКА, как правило, учитывались величины действующих на центр масс НКА ускорений. Для пояснения необходимости учета соответствующих ускорений в модели движения НКА в табл. 1 приведены их максимальные и средние значения, рассчитанные на орбите НКА существующих систем (например, ГЛОНАСС), а также приведено среднеквадратическое отклонение (СКО), характеризующее факторы неопределенности при формализации физических величин.

Таблица 1

Оценки составляющих ускорения движения центра масс на орбите КА ГЛОНАСС

Природа ускорения	Максимум, м/с ²	Среднее, м/с ²	СКО,	
			%	м/с ²
Центральное поле Земли	4,85	$2,10 \cdot 10^{-2}$	10^{-8}	$2,1 \cdot 10^{-12}$
Несферичность Земли	$3,86 \cdot 10^{-3}$	$3,39 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-14}$
Притяжение сторонних тел	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$4,13 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$
Световое давление	$1,93 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-7}$	10	$1,5 \cdot 10^{-8}$
Разгрузки электромеханических исполнительных органов	$5,87 \cdot 10^{-8}$	$5,87 \cdot 10^{-8}$	10	$5,9 \cdot 10^{-9}$
Приливы	$6,62 \cdot 10^{-8}$	$2,36 \cdot 10^{-10}$	20	$4,7 \cdot 10^{-11}$
Альбедо	$2,14 \cdot 10^{-8}$	$1,13 \cdot 10^{-11}$	20	$2,2 \cdot 10^{-12}$

Из табл. 1 следует, что наибольший вклад вносит гравитационное ускорение. При этом, однако, следует отметить, что физическая модель гравитационного ускорения в настоящее время определена с наименьшей неопределенностью. Наибольшая неопределенность в модели движения обусловлена такими факторами, как приливы, альбедо и разгрузки маховиков.

Ошибки моделирования остальных возмущений, как минимум, на 1-2 порядка меньше. Максимальные значения ошибок из-за моделирования приливного потенциала и влияния излучения Земли могут возникать только на малых расстояниях от Земли и длиться несколько десятков минут за виток. Этот вывод справедлив не только для аппаратов со схожими с КА ГЛОНАСС орбитальными характеристиками, но и для КА на перелетной траектории, например, на геостационарную орбиту. Возмущения при учете высших гармоник гравитационного поля Земли, приливного потенциала и излучения Земли сильно убывают с расстоянием и могут вносить такой же или меньший вклад, как и возмущения от разгрузок и светового давления.

Приведенный выше анализ показывает, что основным фактором, определяющим характер движения центра масс НКА, является геопотенциал. Возмущающая часть геопотенциала создает основную картину эволюции орбиты. При этом воздействие остальных возмущающих факторов примерно в 1000 раз меньше воздействия геопотенциала. Ускорения от этих факторов часто имеют характер неопределенности, что затрудняет определение их математической модели. Поэтому большинство из таких факторов в настоящее время принято относить к классу так называемых немоделируемых ускорений. Причины возникновения немоделируемых ускорений негравитационной природы, действующих на движение центра масс КА представлены на рис. 2 [1–6].

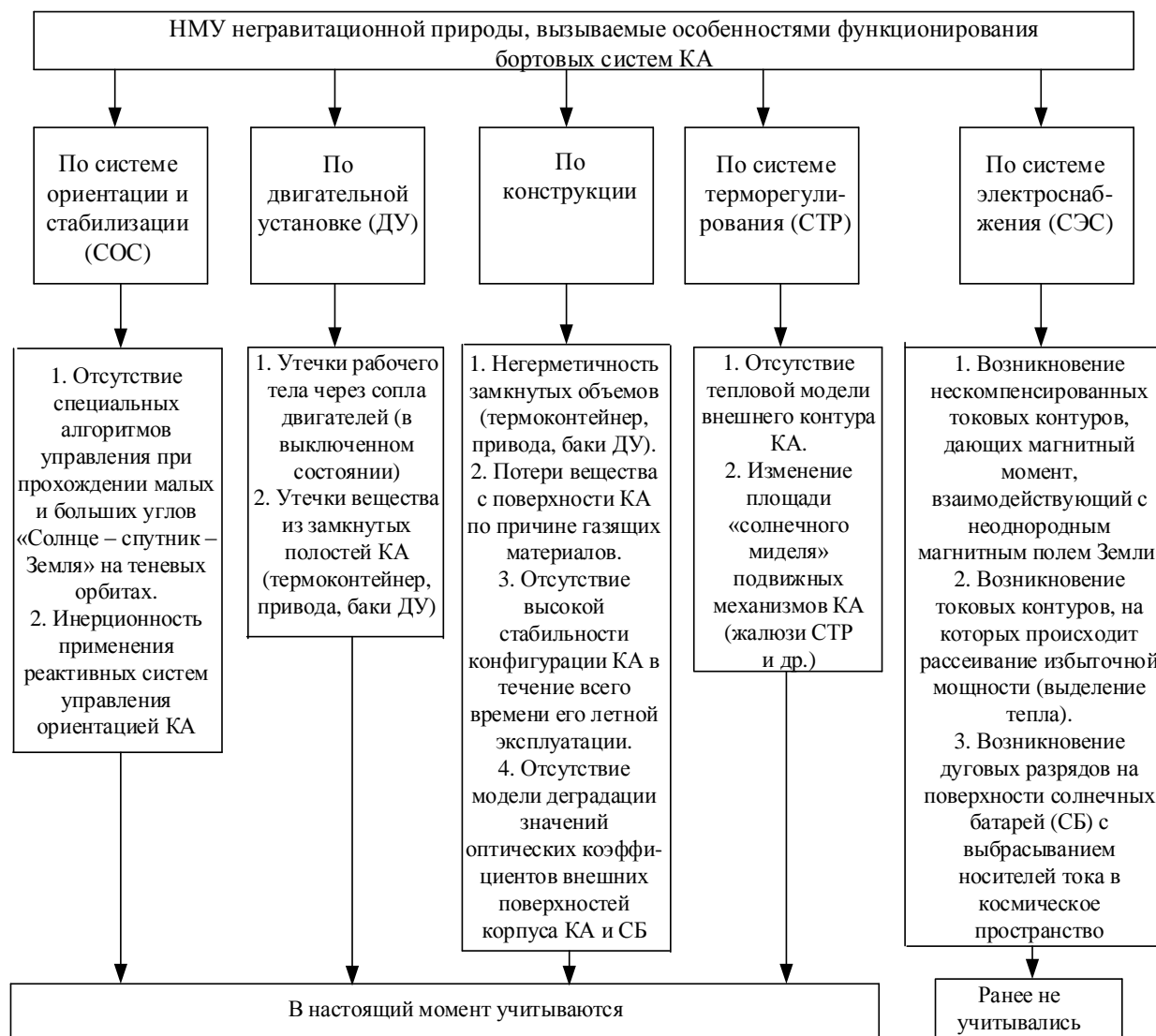


Рис. 2. НМУ негравитационной природы

В настоящее время, учитывая важность высокоточного прогнозирования движения НКА по орбите в течение длительного периода, в задачах навигационного обеспечения повышены требования учета немоделируемых ускорений, возникающих за счет ряда воздействующих на центр масс НКА активных сил негравитационной природы. В связи с этим необходимо произвести коррекцию математических моделей прогнозирования движения НКА за счет комплексного учета особенностей влияния функционирования всех бортовых систем НКА на движение центра масс НКА, включая и систему электроснабжения (СЭС) (рис. 2) [3–4]. Идентификация физических причин немоделируемых ускорений и разработка методических рекомендаций по их учету или устранению, в свою очередь, требует разработки особых математических моделей движения центра масс НКА. Эти модели должны учитывать силы, вызываемые ускорениями величиной в 2–2,5 раза менее, чем известные значения, приведенные в табл. 1, имеющие случайный характер воздействия и ранее не подвергавшиеся моделированию. Такие модели должны обеспечивать не только возможность оценивания величин ускорений, но и формировать аппроксимационные временные зависимости, которые в дальнейшем позволят выдвигать и подтверждать гипотезы о физической природе немоделируемых ускорений. Рассмотрим один из таких подходов к моделированию движения КА.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ КА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ НЕМОДЕЛИРУЕМЫХ УСКОРЕНИЙ

Пусть реальное и модельное движения КА на шаге прогнозирования движения h вычисляются по формуле:

$$\bar{V}_{\text{РЕАЛ}}(t_0 + h) = \bar{V}_0 + \int_{t_0}^{t_0+h} [\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}, \bar{X}, t) + \Delta\bar{a}(t)] dt, \quad (1)$$

где $\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}, \bar{X}, t)$ – моделируемое ускорение;

$\Delta\bar{a}(t)$ – немоделируемое ускорение;

$\bar{V}_0 = \bar{V}(t_0)$ – начальные условия движения.

Ставится задача – оценить функцию $\Delta\bar{a}(t)$ по известным фактическим результатам измерений $\bar{V}_{\text{ФАКТ}}(t_0 + h)$.

Очевидно, что формально интеграл в правой части (1) можно представить в виде выражения

$$\int_{t_0}^{t_0+h} [\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}, \bar{X}, t) + \Delta\bar{a}(t)] dt = \int_{t_0}^{t_0+h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}, \bar{X}, t) dt + \int_{t_0}^{t_0+h} \Delta\bar{a}(t) dt, \quad (2)$$

в котором первый интеграл в правой части зависит от результатов интегрирования второго интеграла.

Но тогда и модельное движение можно представить в виде суммы двух движений:

– «абсолютного» модельного движения с координатами $\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}$, $\bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}$, происходящего под действием только ускорения $\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}$;

– «относительного» модельного движения с координатами $\Delta\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t))$, $\Delta\bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t))$, происходящего за счет смещения модельной траектории под действием немоделируемого ускорения $\Delta\bar{a}(t)$.

В указанных выше обозначениях рассмотрим подынтегральную функцию первого интеграла в правой части (2):

$$\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}, \bar{X}, t) = \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}} + \Delta\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)), \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}} + \Delta\bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)), t), \quad (3)$$

Разложим эту функцию в ряд Тейлора относительно точки $(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t)$. Опуская для простоты аргументы сложной функции в записи производных и ограничиваясь линейными членами разложения, в результате получим:

$$\begin{aligned} & \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}} + \Delta\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)), \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}} + \Delta\bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)), t) = \\ & = \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t) + \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{V}} \cdot \Delta\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)) + \\ & + \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{X}} \cdot \Delta\bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)). \end{aligned} \tag{4}$$

Подставляя выражение (4) в функцию (3) и далее в интеграл (2) с учетом ранее примененного приема формального распределения интегрирования, получим:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\text{ФАКТ}}(t_0 + h) &= \bar{V}_0 + \int_{t_0}^{t_0+h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t) dt + \\ & + \int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{V}} \cdot \Delta\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)) dt + \\ & + \int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{X}} \cdot \Delta\bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)) dt + \int_{t_0}^{t_0+h} \Delta\bar{a}(t) dt. \end{aligned} \tag{5}$$

Полученная формула (5) отличается от (2) тем, что в ней «абсолютное» модельное движение, записанное в виде интеграла $\int_{t_0}^{t_0+h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t) dt$, оказывается полностью независимо от движения под действием немоделируемого ускорения, записываемого в виде интеграла $\int_{t_0}^{t_0+h} \Delta\bar{a}(t) dt$.

Обозначим величину «наблюдаемой» ошибки прогнозирования за счет действия немоделируемого ускорения:

$$\Delta\bar{V}_{\text{Н}}(t_0 + h) = \bar{V}_{\text{ФАКТ}}(t_0 + h) - \bar{V}_0 - \int_{t_0}^{t_0+h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t) dt.$$

Тогда из (5) можно выразить движение под действием немоделируемого ускорения в виде формального уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta\bar{V}_{\text{Н}}(t_0 + h) &= \int_{t_0}^{t_0+h} \Delta\bar{a}(t) dt + \int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{V}} \cdot \Delta\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)) dt + \\ & + \int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{X}} \cdot \Delta\bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta\bar{a}(t)) dt. \end{aligned} \tag{6}$$

Без потери точности (в первом приближении) можно считать, что на всем протяжении малого участка времени $[t_0, t_0 + h]$ величины частных производных в (6) постоянны и равны начальным значениям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{V}} &= \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{V}}(\bar{V}_0, \bar{X}_0) = \text{const}, \\ \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{X}} &= \frac{\partial\bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial\bar{X}}(\bar{V}_0, \bar{X}_0) = \text{const}, t \in [t_0, t_0 + h]. \end{aligned}$$

С другой стороны, несложно заметить, что так как «относительное» модельное движение происходит под действием немоделируемого ускорения с нулевыми начальными условиями, то соответствующие координаты можно представить в следующем виде:

$$\Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta \bar{a}(t)) = \int_{t_0}^{t_0+h} \Delta \bar{a}(t) dt,$$

$$\Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta \bar{a}(t)) = \int_{t_0}^{t_0+h} \left[\int_{t_0}^{t_0+h} \Delta \bar{a}(t) dt \right] dt.$$

Подставляя эти выражения в (6), окончательно получим уравнение для расчета оценки немоделируемого ускорения:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{X}}(\bar{V}_0, \bar{X}_0) \cdot \int_{t_0}^{t_0+h} \left\{ \int_{t_0}^{t_0+h} \left[\int_{t_0}^{t_0+h} \Delta \bar{a}(t) dt \right] dt \right\} dt + \\ & + \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{V}}(\bar{V}_0, \bar{X}_0) \cdot \int_{t_0}^{t_0+h} \left[\int_{t_0}^{t_0+h} \Delta \bar{a}(t) dt \right] dt + \int_{t_0}^{t_0+h} \Delta \bar{a}(t) dt = \Delta \bar{V}_H(t_0 + h). \end{aligned} \quad (7)$$

Для продолжения процедуры оценивания немоделируемого ускорения на следующем шаге необходимо знать начальные условия $\bar{V}(t_0 + i \cdot h)$, $i = 1, \dots, N$. Но очевидно, что по условиям задачи они должны быть тождественны фактически измеренным значениям, то есть

$$\bar{V}(t_0 + i \cdot h) \equiv \bar{V}_{\text{ФАКТ}}(t_0 + i \cdot h), \quad i = 1, \dots, N.$$

Если вместо значений $\bar{V}_{\text{РЕАЛ}}(t_0 + i \cdot h)$ на каждом шаге известны только величины «наблюдаемой» ошибки прогнозирования $\Delta \bar{V}_H(t_0 + i \cdot h)$, $i = 1, \dots, N$, то начальные условия могут быть определены по формуле

$$\bar{V}(t_0 + i \cdot h) = \bar{V}(t_0 + (i-1) \cdot h) + \int_{t_0}^{t_0+h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t) dt + \Delta \bar{V}_H(t_0 + i \cdot h),$$

$$i = 1, \dots, N.$$

Далее для получения рабочих алгоритмов необходимо:

- 1) рассчитать частные производные $\frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{V}}(\bar{V}_0, \bar{X}_0)$, $\frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{X}}(\bar{V}_0, \bar{X}_0)$;
- 2) построить и оценить характеристики (параметры) аппроксимационной зависимости $\Delta \bar{a}(t)$, позволяющей решать уравнения типа (7).

При решении первой задачи можно применить упрощенную методику. Данная методика основана на приближенном вычислении следующих интегралов в формулах (5):

$$\int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{V}} \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta \bar{a}(t)) dt, \quad (8)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{X}} \cdot \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta \bar{a}(t)) dt. \quad (9)$$

В этих формулах с некоторой степенью точности можно зафиксировать отклонения модельной траектории в начальный момент времени:

$$\Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta \bar{a}(t)) = \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0), \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta \bar{a}(t)) = \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0), t \in [t_0, t_0 + h].$$

Тогда выражения, например для интеграла (8), можно записать в виде

$$\int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{V}} \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\Delta \bar{a}(t)) dt \approx \left[\int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)} dt \right] \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0).$$

Отсюда путем вынесения дифференцирования за знак интеграла, получим уравнение:

$$\begin{aligned} \left[\int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)} dt \right] \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0) &= \left[\frac{\partial}{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)} \int_{t_0}^{t_0+h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}} dt \right] \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0) \approx \\ &\approx \frac{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0+h)}{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)} \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0). \end{aligned}$$

По аналогии для интеграла (9) запишем выражение:

$$\left[\int_{t_0}^{t_0+h} \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)} dt \right] \cdot \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0) \approx \frac{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0+h)}{\partial \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)} \cdot \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0).$$

В полученных выражениях величины начальных отклонений $\Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)$ и $\Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)$ фактически реализуются за счет действия на модельное движение ускорения $\Delta \bar{a}(t)$ на предыдущем участке. При этом из выражений (5) следует, что на каждом шаге прогнозирования, за исключением первого, для определения немоделируемого ускорения необходимо решать уравнения:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_0+h} \Delta \bar{a}(t) dt = \bar{V}_{\text{ФАКТ}}(t_0+h) - \bar{V}_0 - \int_{t_0}^{t_0+h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t) dt - \\ - \frac{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)}{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h)} \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h) - \frac{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)}{\partial \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h)} \cdot \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h). \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом полученного решения $\Delta \bar{a}^*(t)$ начальные отклонения на следующем шаге по скорости вычисляются по формуле

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0) &= \frac{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)}{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h)} \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h) + \\ &+ \frac{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)}{\partial \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h)} \cdot \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h). \end{aligned}$$

По аналогии можно получить формулы для расчета начальных отклонений по координатам:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0) &= \frac{\partial \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)}{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h)} \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h) + \\ &+ \frac{\partial \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0)}{\partial \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h)} \cdot \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0-h). \end{aligned}$$

При этом на первом шаге получим выражения:

$$\Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0) = \int_0^h \Delta \bar{a}(t) dt, \quad \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0) = \int_0^h \int_0^h \Delta \bar{a}(t) dt^2.$$

Сравнивая выражения (5) и (10), можно сделать вывод о том, что в результате применения методики вычисления интегралов приращений (8) и (9) можно получить N однотипных уравнений:

$$\int_{t_0+(i-1)h}^{t_0+i \cdot h} \Delta \bar{a}_i(t) dt = \delta \bar{V}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

где в случае (5) правые части вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \delta \bar{V}_i = & \bar{V}_{\text{ФАКТ}}(t_0 + i \cdot h) - \bar{V}_0(t_0 + (i-1) \cdot h) - \int_{t_0+(i-1)h}^{t_0+i \cdot h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t) dt - \\ & - \int_{t_0+(i-1)h}^{t_0+i \cdot h} \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{V}} \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{a}_i(t)) dt - \int_{t_0+(i-1)h}^{t_0+i \cdot h} \frac{\partial \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}}{\partial \bar{X}} \cdot \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{a}_i(t)) dt, \end{aligned}$$

в случае (10) правые части вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \delta \bar{V}_i = & \bar{V}_{\text{ФАКТ}}(t_0 + i \cdot h) - \bar{V}_0(t_0 + (i-1) \cdot h) - \int_{t_0+(i-1)h}^{t_0+i \cdot h} \bar{a}_{\text{МОДЕЛ}}(\bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}, \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}, t) dt - \\ & - \frac{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0 + i \cdot h)}{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0 + (i-1) \cdot h)} \cdot \Delta \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0 + (i-1) \cdot h) - \\ & - \frac{\partial \bar{V}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0 + i \cdot h)}{\partial \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0 + (i-1) \cdot h)} \cdot \Delta \bar{X}_{\text{МОДЕЛ}}(t_0 + (i-1) \cdot h). \end{aligned}$$

Оценочные расчеты влияния на движение НКА малых ускорений $\Delta \bar{a}(t)$ или $a_{\text{ВОЗМ}}$, представлены в табл. 2 и 3, где в качестве гипотезы представлен прогноз возможного воздействия бортовой СЭС (см. рис. 2). Графическая иллюстрация данных в табл. 2 и 3 представлена на рис. 3 и 4.

Таблица 2

Бюджет отклонения движения центра масс НКА по осям орбитальной системы координат (S, T, W)

Период действия постоянного ускорения 24 часа

$a_{\text{ВОЗМ}}, \text{M/C}^2$	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
S	0,00103766	0,01048808	0,104868045	1,048732	10,48737	104,8739	1048,747
T	0,01074922	0,107645927	1,076456723	10,76457	107,6458	1076,459	10764,67
W	$8,29279 \cdot 10^{-5}$	0,000830293	0,008304692	0,083046	0,830463	8,304629	83,04629

Период действия постоянного ускорения 1 час

$a_{\text{ВОЗМ}}, \text{M/C}^2$	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
S	$6,73369 \cdot 10^{-5}$	0,000692383	0,006931886	0,069344	0,693425	6,934274	69,34281
T	0,0006596507	0,0066370043	0,066466519	0,664655	6,646578	66,46592	664,6605
W	$1,73438 \cdot 10^{-6}$	0,000172948	0,001729215	0,017292	0,172918	1,729173	17,29172

Таблица 3

Прогноз отклонения движения центра масс НКА по радиус-вектору

Период действия постоянного ускорения 24 часа

$a_{\text{возм}}, \text{ м/с}^2$	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
Суммарное	0,011801358	0,118077629	1,180892676	11,80896	118,0897	1180,899	11809,16

Период действия постоянного ускорения 1 час

$a_{\text{возм}}, \text{ м/с}^2$	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}
Суммарное	0,000670838	0,006813817	0,068071091	0,680747	6,807508	68,07511	680,7526



Рис. 3. Бюджет отклонения движения центра масс НКА по осям орбитальной системы координат (S, T, W)

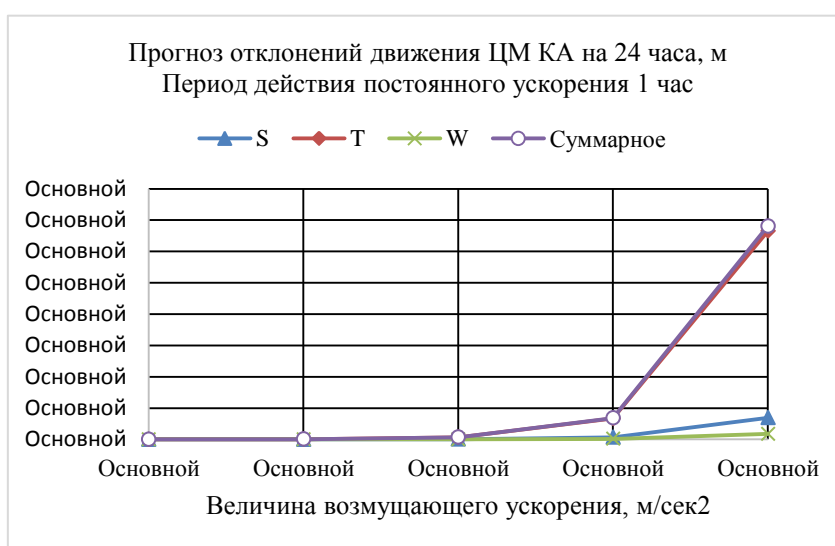


Рис. 4. Прогноз отклонения движения центра масс НКА по радиусу-вектору

Представленные графические зависимости позволяют спрогнозировать ухудшения точностных характеристик эфемеридного обеспечения. При этом видно, что расчетные максимальные отклонения эфемерид, возникающие вдоль орбиты, могут достигать недопустимых значений в десятки метров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты могут быть положены в основу подтверждения гипотезы о влиянии различных режимов работы СЭС в неучтенных ранее моделях движения ЦМ НКА. Что позволит обеспечить требуемую точность определения местоположения, в том числе и путем анализа и учета наиболее значимых физических процессов в ходе всего срока активного существования НКА. Это позволит спрогнозировать и принять меры по парированию недопустимых значений отклонения эфемерид, возникающих вдоль орбиты космического аппарата, величина которых может достигать десятков метров.

Список используемых источников

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
2. Физика космоса: маленькая энциклопедия / редкол. Р.А. Сюняев (гл. ред.) [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. Энциклопедия, 1986. – 783 с.
3. Модель эквивалентного токового контура системы электроснабжения космического аппарата в неоднородном магнитном поле Земли / В.И. Горбулин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 645. – С. 149–153.
4. Методика расчета компонент вектора малой силы взаимодействия токовых контуров бортовой системы электроснабжения с внешним неоднородным магнитным полем Земли / В.И. Горбулин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 643. – С. 88–91.
5. Голяков А.Д., Лукашевский А.А., Смирнов В.В. Системы навигации космических аппаратов. – МО РФ, 2003. – 267 с.
6. Попович П.Р., Скребушевский Б.С. Баллистическое проектирование космических систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 239 с.

В.А. Горин,
кандидат техн. наук;
В.В. Карагодин,
доктор техн. наук, профессор;
И.В. Хомич

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СРЕДЕ MATLAB

Предложена математическая модель явнополюсного синхронного генератора, разработанная в среде Simulink математического пакета MatLab по уравнениям Парка – Горева. Проанализировано влияние принимаемых с целью упрощения математической модели допущений на корректность описания электромагнитных переходных процессов в синхронном генераторе при набросах активно-индуктивной статической нагрузки с различными $\cos\varphi$.

Ключевые слова: явнополюсный синхронный генератор, математическая модель, уравнения Парка – Горева, переходные процессы.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития для российской электроэнергетики характерна тенденция привлечения потребителей (юридических и физических лиц, осуществляющих пользование электрической энергией) к решению вопросов обеспечения надежности электроснабжения и качества электроэнергии. Это приводит к существенному возрастанию роли автономного электроснабжения, особенно для объектов, предъявляющих повышенные требования к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии.

В системах автономного электроснабжения (САЭ) в большинстве случаев в качестве источников электроэнергии применяются дизель-генераторные агрегаты (ДГА), представляющие энергетическую установку, состоящую из первичного двигателя – дизеля и синхронного генератора (СГ), которым в настоящее время адекватной альтернативы пока нет.

Совершенствование систем регулирования составляющих ДГА элементов путем разработки и реализации более совершенных законов регулирования невозможно без применения современных методов математического моделирования, которые как инструмент научных исследований получают все более широкое применение. Это приводит к необходимости разработки и исследования их математических моделей. В связи с этим актуальной является задача получения таких моделей элементов автономных электростанций, которые при значительно более низком порядке описывающих их уравнений давали бы адекватную реальную реакцию на возмущения в сетях потребителей.

Синхронные генераторы являются наиболее сложными динамическими элементами систем электроснабжения (СЭС). Вопросы адекватного описания процессов в синхронных генераторах становятся более актуальными в современных условиях. Это связано во многом с изменяющимися требованиями к ним со стороны потребителей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Наибольшее распространение для исследования происходящих в СЭС процессов получили модели, разработанные на основе преобразований Парка – Горева [1, 2]. В этом случае электрическая машина представляется как двухфазная с перпендикулярно расположенными обмотками по осям d - q , жестко связанными с ротором синхронной машины.

Сама математическая модель СГ с учетом общепринятых допущений [2] может быть представлена системой уравнений Парка – Горева в относительных единицах в операторной форме:

$$\begin{aligned}
 p\Psi_d/w_0 + \Psi_q(1+s) - ri_d &= u_d; \\
 \Psi_d(1+s) - p\Psi_q/w_0 - ri_q &= u_q; \\
 T_{d0}p\Psi_f + e_q &= u_f; \\
 T_{rd}p\Psi_{rd} + e_{rd} &= 0; \\
 T_{rq}p\Psi_{rq} + e_{rq} &= 0; \\
 T_jps + (\Psi_d i_q + \Psi_q i_d) &= M_m; \\
 \Psi_d &= -x_s i_d + e_{idH}; \\
 \Psi_f &= x_{fs} e_q / x_f + x_{ad} e_{idH} / x_f; \\
 \Psi_{rd} &= x_{rds} e_{rd} / x_{rd} + x_{ad} e_{idH} / x_{rd}; \\
 \Psi_q &= x_s i_q + e_q; \\
 \Psi_{rq} &= x_{rqs} e_{rq} / x_{rq} + x_{aq} e_q / x_{rq}; \\
 e_{idH} &= e_{id} h; e_{id} = e_q - x_{ad} i_d + e_{rd}; e_q = x_{aq} i_q + e_{rq},
 \end{aligned} \tag{1}$$

Где $x_d, x_q, x_{ad}, x_{aq}, x_{rd}, x_{rq}, x_f, x_{fs}, x_{rds}, x_{rqs}, T_{d0}, T_{rd}, T_{rq}, T_j, u_d, u_q, i_d, i_q, e_q, e_{rq}, e_{rd}, e_{id}, e_{idH}, \Psi_d, \Psi_q, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}, \Psi_f, h$ – параметры синхронного генератора, о.е.;

T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения, с;

T_{rd}, T_{rq} – постоянные времени демпферных контуров, с;

T_j – постоянная времени инерции вала генератора, с;

u_d, u_q – напряжения СГ в осях d и q , о.е.;

i_d, i_q – токи СГ в осях d и q , о.е.;

e_q – эдс возбуждения, равная току i_f , о.е.;

e_{rq}, e_{rd} – эдс демпферных контуров, равные токам i_{rq}, i_{rd} , о.е.;

e_{id} – внутренняя эдс СГ по оси d ;

e_{idH} – внутренняя насыщенная эдс СГ по оси d ;

$\Psi_d, \Psi_q, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}, \Psi_f$ – потокосцепления статорных, демпферных контуров по осям d и q и обмотки возбуждения;

h – коэффициент насыщения.

Приведенная математическая модель синхронного генератора (1) учитывает все основные электромагнитные и электромеханические процессы в синхронной машине с демпферными контурами и включает систему дифференциальных уравнений шестого порядка, которая дополняется системой алгебраических уравнений для расчета потокосцеплений. Однако, если учесть модель регулятора возбуждения и описание двигательной нагрузки, то порядок возрастает до 12-го.

Решение полученной системы уравнений является непростой задачей. Тем более существенно усложняется анализ и синтез законов управления, и особенно нетрадиционных, в частности, использование оптимальных и интеллектуальных (нечетких и нейросетевых) систем управления.

В данных условиях стоит задача разработки моделей, удовлетворяющих двум взаимоисключающим требованиям:

- с одной стороны, требованию соблюдения условий максимальной простоты математического описания;
- с другой стороны, адекватности описания электромеханических переходных процессов генераторов.

Несмотря на значительное количество работ, в которых авторы обосновывают возможные упрощения математического описания синхронного генератора [3–5], данная задача не теряет своей актуальности. Это связано с тем, что исследования, как правило, выполнялись в рамках решения конкретных задач для определенных типов генераторных агрегатов, функционирующих в определенных электроэнергетических системах или системах электроснаб-

жения, для конкретных режимов их работы, а также осуществлялись имеющимися средствами (математические модели, электродинамические модели) и с учетом имеющихся возможностей для проведения моделирования.

Таким образом, целью настоящей статьи является исследование моделей генератора, которые при принятии обоснованных для конкретной задачи допущений можно получить из исходной сложной модели ее упрощением, но при этом не исказить основные характерные особенности модели за счет использования для данных исследований пользовательских моделей, разработанных в пакете прикладных программ Matlab с расширением Simulink.

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ПАКЕТЕ MATLAB

В технической литературе описываются различные инструменты моделирования, например программные комплексы Maple, MathCAD, пакет визуального моделирования VisSim и др. [6]. Однако в последнее время всё большее распространение получает пакет моделирования Matlab Simulink, возможности которого шире.

Для исследования дизель-генераторных агрегатов часто используются математические модели СГ, при разработке которых не учитывают активное сопротивление обмоток статора, трансформаторные эдс и влияние демпферных контуров. Для исследования влияния этих допущений на корректность описания электромагнитных переходных процессов генераторов воспользуемся пакетом прикладных программ Matlab с расширением Simulink. При этом можно выбрать готовые макромодули в Simulink. Однако их использование часто связано с определенными трудностями [6], что требует разработки пользовательских моделей.

Построение исследуемой модели в Matlab Simulink представляет собой объединение необходимых стандартных блоков пакета в структуру с учетом функциональных связей между ними, задание параметров блоков и параметров моделирования, а также объединение, при необходимости, блоков в логически завершенные подсистемы [7]. Модель явнополюсного СГ в среде Simulink, учитывающая математическое описание (1), приведена на рис. 1. Используемые в модели подсистемы представляют собой объединенные по функциональному признаку стандартные блоки пакета.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: U_f – напряжения возбуждения СГ, о.е.; U_{gen} , I_{gen} – напряжение и ток СГ, о.е.; U_d , U_q – напряжения СГ в осях d и q , о.е.; I_f – ток возбуждения СГ, о.е.; I_d , I_q – токи СГ в осях d и q , о.е.; I_{rd} , I_{rq} – токи демпферных контуров, о.е.; Ψ_{sf} , Ψ_{sd} , Ψ_{sq} – потокосцепления обмотки возбуждения и статорных обмоток по осям d и q , о.е.; $Uf1.mat$, $If1.mat$, $Ugen1.mat$, $Igen1.mat$ – блоки вывода соответствующих величин.

При построении модели не учитывалось изменение частоты, т. е. считается, что скольжение отсутствует, $s = 0$, а также не учитывалось насыщение машины ($h = 1$). Первое предположение допустимо ввиду того, что частота вращения ротора генератора не изменяется скачком, а также из-за кратковременности электромагнитных процессов по сравнению с длительностью электромеханических процессов.

Второе допущение принято в связи с тем, что в статье рассматривается режим наброса (резкого изменения) активно-индуктивной статической нагрузки, при котором насыщение практически не влияет на характер переходных процессов.

Будем считать полученную в результате математическую модель «эталонной».

При моделировании переходных процессов в качестве параметров модели использовались параметры синхронного явнополюсного генератора СБГ 800–750.

Параметры генератора: $U_{ном} = 400$ В, $S_{ном} = 1000$ кВА, $P_{ном} = 800$ кВт, $\cos\varphi_{ном} = 0,8$, $x_d = 1,59$, $x_s = 0,089$, $x_{ad} = 1,501$, $x_d' = 0,24$, $x_q = 1,06$, $x_d'' = 0,15$, $x_q'' = 0,185$, $r = 0,01$, $T_{d0} = 2,4$ с, $T_d' = 0,36$ с, $T_d'' = 0,011$ с, $T_{d0в} = 0,34$ с.

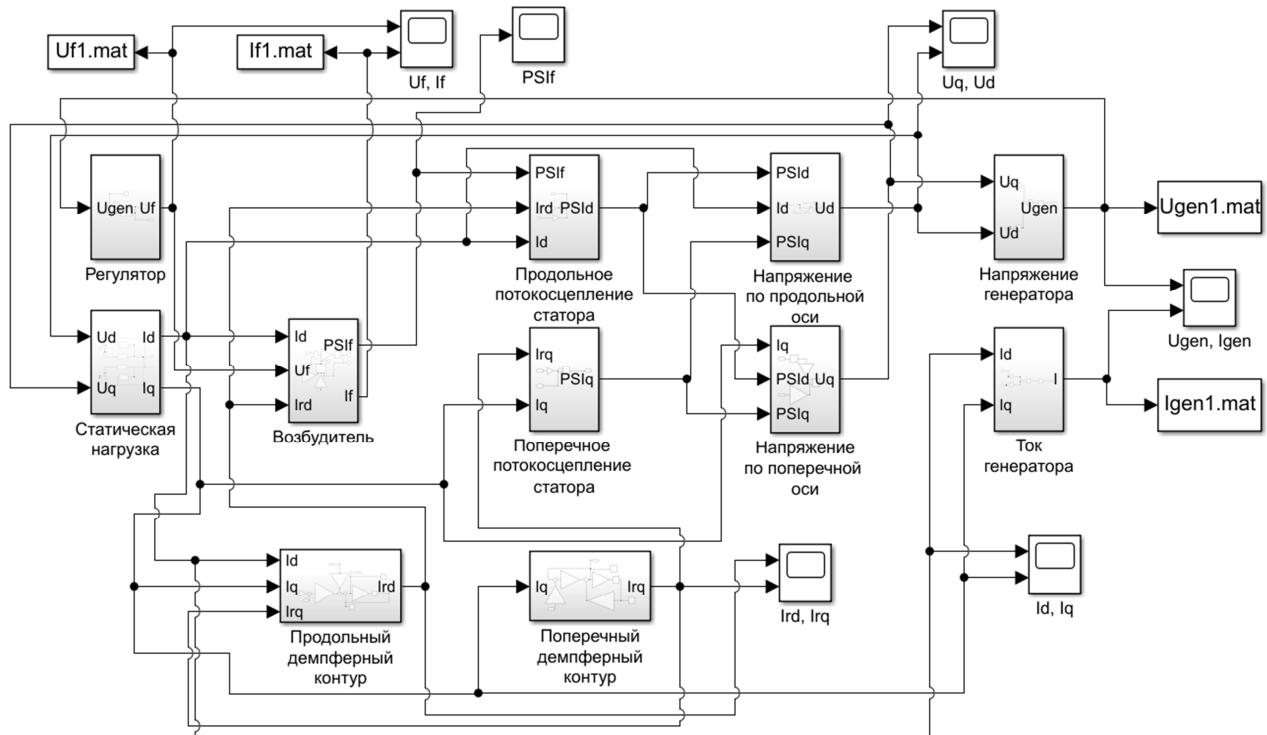


Рис. 1. Математическая модель синхронного генератора в среде Simulink

Остальные параметры СГ определялись согласно литературе [3].

В качестве регулятора возбуждения использовался пропорциональный регулятор с передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1},$$

где $k_p = 10$; $T_p = 0,02$ с.

На рис. 2 показаны осциллограммы напряжения генератора, характеризующие работу эталонной модели. Спустя две секунды с начала возбуждения генератора происходит подключение активно-индуктивной статической нагрузки. Анализ результатов моделирования с использованием разработанной модели (рис. 1) при набросах активно-индуктивной нагрузки с различными $\cos\phi$ свидетельствует об их соответствии физике электромагнитных процессов в явноплюсном СГ.

Для оценки влияния приведенных выше допущений на точность расчета переходных процессов в СГ было проведено моделирование переходных режимов, вызванных набросами активно-индуктивной нагрузки с различными коэффициентами мощности, на моделях, полученных в соответствии с выражениями (1) в среде Simulink, но с учетом принимаемых допущений (в дальнейшем упрощенные модели).

Для количественной оценки отличия графиков переходных процессов, вызванных набросами активно-индуктивной нагрузки с различными коэффициентами мощности, полученных с использованием упрощенных моделей, от «эталонной» модели принято среднеквадратичное отклонение графиков переходных процессов:

$$\sigma(U_r) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_r - U_r^{эт})^2}{n}},$$

где U_r – напряжение синхронного генератора в упрощенной модели;

$U_{Г}^{ЭТ}$ – напряжение синхронного генератора в «эталонной» модели;
 n – количество точек сравнения графиков соответствующих переходных процессов.
 Результаты моделирования представлены в табл. 1.

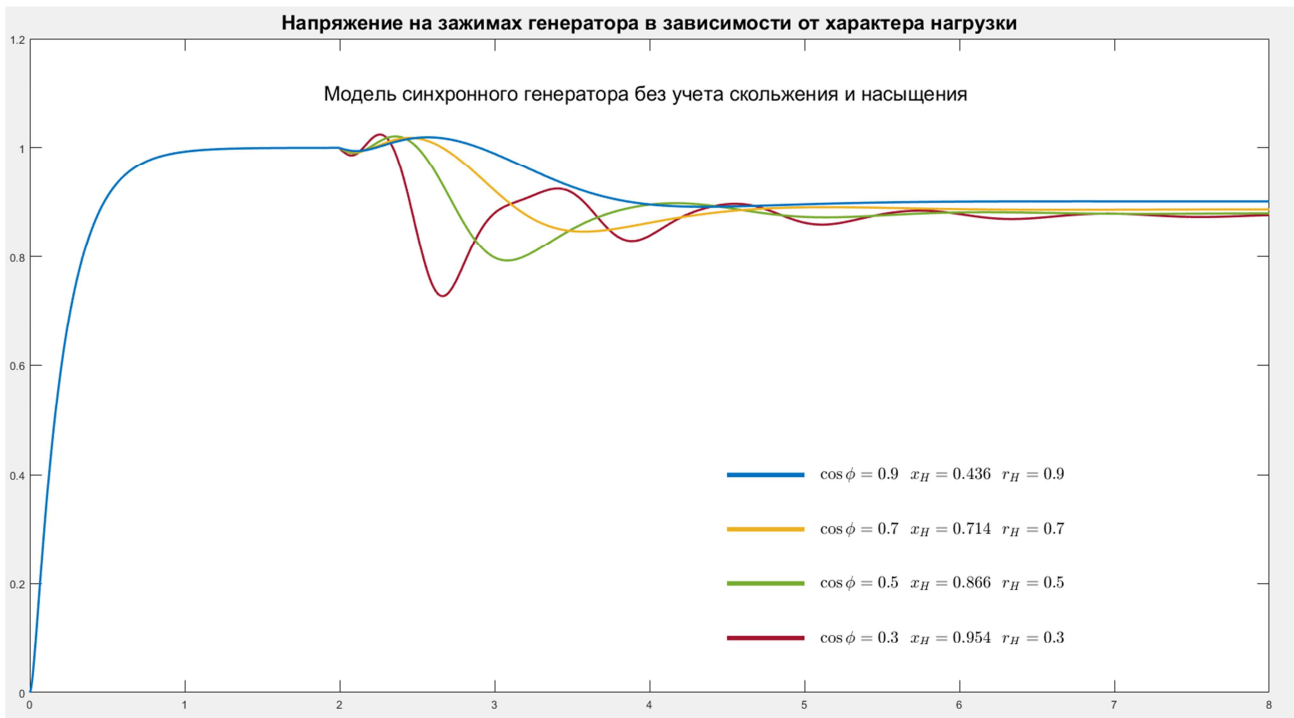


Рис. 2. Результаты моделирования, полученные с использованием эталонной модели

Таблица 1

Результаты сравнительного оценивания моделей синхронного генератора

Параметры нагрузки, о.е.			Среднеквадратичные отклонения напряжения упрощенной модели синхронного генератора от напряжения «эталонной» модели $\sigma(U_{Г})$, о.е.			
$\cos \phi$	r	x	В модели при $r = 0$	В модели при $e_{тр} = 0$	В модели без демпферных контуров	В модели при всех упрощениях
0,9	0,9	0,436	0,00058	0,00019	0,00223	0,00212
0,8	0,8	0,600	0,00065	0,00034	0,00380	0,00382
0,7	0,7	0,714	0,00079	0,00056	0,00606	0,00625
0,6	0,6	0,800	0,00099	0,00092	0,00932	0,00982
0,5	0,5	0,866	0,00122	0,00150	0,01356	0,01463
0,4	0,4	0,917	0,00148	0,00250	0,01780	0,01986
0,3	0,3	0,954	0,00181	0,00452	0,01918	0,02249
0,2	0,2	0,980	0,00175	0,00736	0,01324	0,01807
0,1	0,1	0,995	0,00043	0,00394	0,00760	0,01057

Результаты моделирования свидетельствуют о незначительном влиянии каждого из трех рассмотренных допущений на показатели установившихся и переходных процессов в СГ.

Полученные результаты полностью совпадают с результатами подобных исследований, проведенных ранее с использованием других программных средств, а также исследований, проведенных другими авторами.

Пренебрежение *активными сопротивлениями статора* [в уравнениях системы (1) необходимо положить $r = 0$] не вносит существенной погрешности в расчеты переходных процессов (см. табл. 1). Возможность пренебрежения активными сопротивлениями статора была установлена в ряде исследований [3–5].

В работах [3, 8, 9] показано, что при расчете переходных процессов СГ также допустимо не учитывать и *трансформаторные эдс*. Для этого необходимо исключить трансформаторные эдс в контурах статора, т. е. отбросить в первых двух уравнениях системы (1) слагаемые $r\psi_d/w_0$ и $r\psi_q/w_0$. Данное упрощение позволяет сократить количество дифференциальных уравнений в системе уравнений Парка – Горева, так как первые два уравнения при пренебрежении трансформаторными эдс становятся алгебраическими.

Возможность неучета трансформаторных эдс подтверждают и результаты моделирования. Максимальная погрешность при этом не превышает 1% (см. табл. 1).

Допустимость неучета *демпферных контуров* рассмотрена в [9]. В данной работе показано, что пренебрежение демпферными контурами (исключение в математической модели четвертого и пятого уравнений) на процессы в электромагнитном контуре вносит погрешность не более 3%. Аналогичный результат (погрешность не более 2%) получен и по результатам моделирования. Таким образом, влияние демпферных контуров на переходный процесс в электромагнитном контуре СГ можно не учитывать, что позволяет при этом упростить математическое описание СГ.

Анализ полученных результатов показывает, что переходные процессы, полученные при использовании упрощенных моделей СГ, незначительно отличаются от результатов моделирования при использовании «эталонной» модели. Максимальная погрешность составляет 2,25% для математической модели с учетом всех принятых допущений при подключении активно-индуктивной статической нагрузки с $\cos\varphi = 0,3$. При этом порядок системы дифференциальных уравнений снижается с пятого (для «эталонной» модели) до первого при принятии всех рассматриваемых допущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пакет моделирования Matlab Simulink предоставляет широкие возможности для построения пользовательских моделей различных систем, включая системы электроснабжения, и их различных элементов. При этом удается избежать трудностей, возникающих при использовании готовых макромодулей, имеющихся в Simulink, повысить наглядность и достоверность получаемых результатов.

Разработанная в среде Simulink по уравнениям Парка – Горева математическая модель синхронного явнополюсного генератора позволила оценить влияние принимаемых допущений на адекватность описания электромагнитных переходных процессов в СГ при набросах активно-индуктивной статической нагрузки с различными $\cos\varphi$. Результаты могут служить обоснованием возможности использования упрощенных моделей СГ при исследованиях переходных процессов синхронных машин. При этом полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее с использованием других программных средств, а также исследований, проведенных другими авторами [3, 4].

Список используемых источников

1. *Горев А.А.* Переходные процессы синхронной машины. – Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 552 с.
2. *Котова Е.Н., Паниковская Т.Ю.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб.-метод. пособие. – Екатеринбург: изд-во Урал, ун-та, 2014. – 216 с.

3. *Токарев Л.Н.* Математическое описание, расчет и моделирование физических процессов в судовых электростанциях. – Л.: Судостроение, 1980. – 119 с.
4. *Веретенников Л.П.* Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы. – Л.: Судостроение, 1975. – 375 с.
5. *Карагодин В.В., Горин В.А.* Математическая модель бесщеточного синхронного генератора для исследования динамических режимов в системах автономного электроснабжения наземных комплексов Войск ВКО // Сборник научных трудов Всеармейской военно-научной конференции «Современные проблемы применения Войск ВКО в системе операций ВС РФ». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – Ч.2. – С. 210–215.
6. *Геллер Б.Л., Сулименко Н.В.* Моделирование параллельной работы судовых синхронных генераторов в пакете VISSIM // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2010. – №18. – С. 160–166.
7. *Солонина А.И.* Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
8. *Краснов В.В., Мещанинов П.А., Мещанинов А.П.* Основы теории расчета судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1979. – 326 с.
9. *Мелешкин Г.А.* Переходные режимы судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1971. – 344 с.

О.В. Капитонов;
Ю.Е. Тупицин,
кандидат техн. наук;
Е.В. Шишкин,
кандидат техн. наук, доцент

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ НЕЧЕТКИХ ОТНОШЕНИЙ

В работе рассмотрен способ оценки технического состояния систем вентиляции и кондиционирования воздуха с помощью математического аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики. Рассмотрена нечеткая модель объекта диагностирования. Показано, что, опираясь на экспертные знания в области эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования воздуха, возможно установить первопричины отказа системы и определить отказ элемента системы. При возникновении некоторых нечетких признаков неисправностей и оценке их по максимальным значениям функций принадлежности экспертных мнений возможно сделать заключение о дальнейшей эксплуатации системы или выводе ее в ремонт. Таким образом, диагностическая модель, построенная на основе композиции нечетких отношений, содержит в себе элементы, необходимые для оценки технического состояния.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, экспертная оценка, техническое состояние, системы вентиляции и кондиционирования воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время специальные сооружения оборудуются многочисленными и сложными системами вентиляции и кондиционирования воздуха (СВ и КВ), создающими температурно-влажностный режим, необходимый для обеспечения работы технологических средств и комфортных условий пребывания в помещениях людей. Отказы, возникающие в СВ и КВ в таких сооружениях, могут привести к нарушениям технологических процессов, отказам дорогостоящего технологического оборудования и гибели людей.

Под отказом понимается событие, заключающееся в переходе системы в неработоспособное состояние, то есть событие, при котором система не способна выполнять заданные функции.

Основные функции СВ и КВ заключаются в поддержании в нормативных пределах температуры, влажности, газового состава воздуха, кратности воздухообмена в помещениях сооружения.

В работах [1–3, 6] изложены взгляды на развитие систем диагностирования на современном этапе, которое движется по пути использования новейших методов сбора и обработки информации в методологии и использования современных технологий, основанных на искусственном интеллекте в практическом применении.

Основная задача интеллектуализации электронных систем заключается в преодолении «языкового барьера» в общении человека с ЭВМ. Решение этой задачи должно быть осуществлено посредством интеллектуальной системы (модуля), при этом для ее адаптации к различным ситуациям процедуру обучения и программирования поведения интеллектуальной системы будет проводить специалист в этой области знаний – эксперт.

Необходимость использования экспертных систем обуславливается возможной ситуацией, когда получить в полном объеме результаты измерений контролируемых параметров не представляется возможным.

Актуальность задачи оценки технического состояния на основе экспертных знаний обусловлена возрастающей сложностью получения достоверной информации о техническом состоянии,

необходимой для обучения интеллектуальных систем оценки технического состояния, в то время как широкий потенциал имеющихся экспертных знаний используется не в полной мере.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

СВ и КВ представляют собой сложную техническую систему, характеризующуюся определенным количеством элементов, обширным числом и разнообразием связей между ними, наличием иерархической соподчиненности в данных связях.

Анализ иерархической структуры СВ и КВ показал очевидную связь отказов, возникающих в СВ и КВ, с отказами в подсистемах (элементах), отвечающих за поддержание в нормативных пределах соответствующих параметров системы. Таким образом, к иерархической структуре СВ и КВ (рис. 1) возможно привести структуру отказов системы, вызванных отказами подсистем или их элементов (рис. 2).

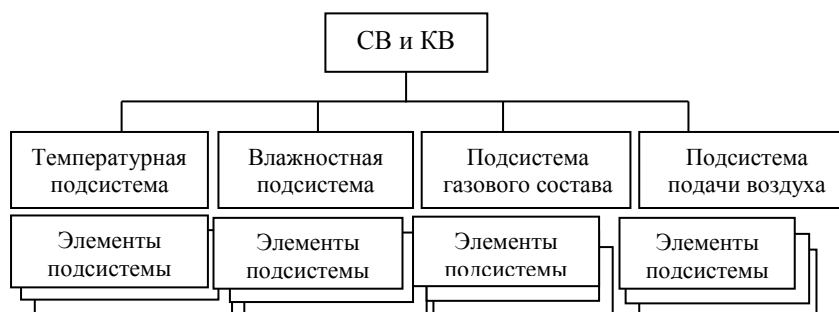


Рис. 1. Иерархическая структура СВ и КВ

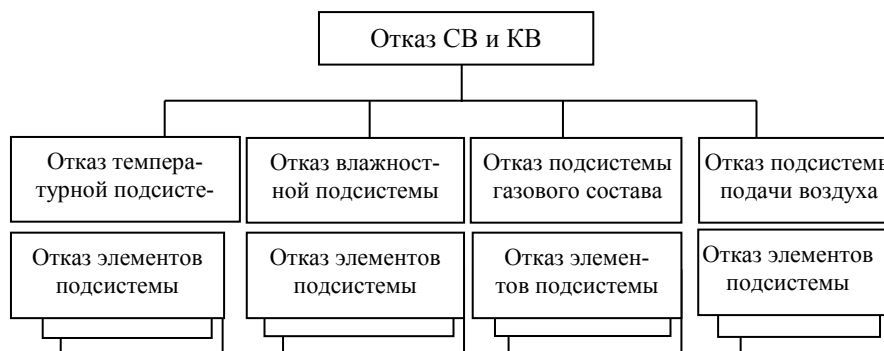


Рис. 2. Структура отказов в СВ и КВ

Однако в некоторых случаях отказы элементов одной подсистемы могут оказывать влияние и привести к отказу другой подсистемы, например загрязнение фильтров может не привести к изменению газового состава подаваемого воздуха, но при этом возникшее сопротивление приведет к изменению расхода воздуха в системе, что, в свою очередь, может привести к нарушению температурного режима в помещении.

Отношение полного пространства отказов X состоит из m факторов, а полное пространство причин этих отказов Y – из n симптомов.

На уровне подсистем сформировано пространство предпосылок отказов (табл. 1) где Y_1 – температура воздуха; Y_2 – влажность воздуха; Y_3 – концентрация CO_2 ; Y_4 – расход воздуха в

системе; X_1 – отказ калорифера; X_2 – отказ оросительной камеры кондиционера; X_3 – отказ фильтрующего элемента; X_4 – отказ вентиляционной установки.

Таблица 1

Пространство предпосылок отказов СВ и КВ

Контролируемые параметры	Возможные отказы			
	X_1	X_2	X_3	X_4
Y_1	1	0	0	1
Y_2	0	1	0	1
Y_3	0	0	1	0
Y_4	0	0	1	1

Причинно-следственные отношения между X_i и Y_j такие, что $R_{ij} = X_i \rightarrow Y_j$. При этом R можно представить в виде матрицы с элементами $R_{ij} \in [0,1]$. Тогда конкретные входы и выходы можно рассматривать как множества A и B на пространстве X и Y [4, 5].

Пусть существуют множества $\rho \subset A \times B$ и $\sigma \subset B \times C$, тогда

$$\rho\sigma = \sum = \{(a,b) : \exists b (a,b) \in \rho, (b,c) \in \sigma\}. \quad (1)$$

Композиция (1) означает, что существуют такие a, b из ρ , а b, c из σ , что путь из a в c лежит через некоторое b .

При этом если с детерминистской точки зрения наличие связи между причиной и следствием рассматривается как 1, а отсутствие связи – как 0, то нечеткие отношения следует рассматривать как промежуточные значения между 0 и 1 [5].

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Пусть даны приведенные в табл. 2 степени принадлежности причин и отказов СВ и КВ. Тогда, используя теорию причинно-следственных отношений и экспертные знания о возможных причинах отказов, составим матрицу, являющуюся отображением последствий отказа от причин:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 & 0.8 & 0.7 \\ 0.2 & 0.1 & 0.4 & 0.5 \\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.2 \\ 0.9 & 0.5 & 0.7 & 0.3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Таблица 2

Пространство предпосылок отказов СВ и КВ

Отказы	Причины отказа			
	X_1	X_2	X_3	X_4
Y_1	0,9	0,8	0,8	0,7
Y_2	0,2	0,1	0,4	0,5
Y_3	0,4	0,2	0,3	0,2
Y_4	0,9	0,5	0,7	0,3

Допустим, что эксперт оценивает техническое состояние системы по результатам анализа изменения контролируемых параметров через уравнение

$$B = 0,6 / X_1 + 0,8 / X_2 + 0,3 / X_3 + 0,4 / X_4. \quad (3)$$

На основе уравнения требуется определить возможную причину такого состояния:

$$A = a_1 / Y_1 + a_2 / Y_2 + a_3 / Y_3 + a_4 / Y_4. \quad (4)$$

Отношение нечетких множеств представим в виде следующей композиции:

$$[0,6 \quad 0,8 \quad 0,3 \quad 0,4] = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4] \cdot \begin{bmatrix} 0,9 & 0,8 & 0,8 & 0,7 \\ 0,2 & 0,1 & 0,4 & 0,5 \\ 0,4 & 0,2 & 0,3 & 0,2 \\ 0,9 & 0,5 & 0,7 & 0,3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Уравнение (5) представим в виде нечетких векторов:

$$\begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,8 \\ 0,3 \\ 0,4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,2 & 0,4 & 0,9 \\ 0,8 & 0,1 & 0,2 & 0,5 \\ 0,8 & 0,4 & 0,3 & 0,7 \\ 0,7 & 0,5 & 0,2 & 0,3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Используя максиминный подход к построению композиции нечетких отношений, соотношение (6) преобразуем к виду

$$\left. \begin{aligned} 0,6 &\geq (0,9 \wedge a_1) \vee (0,8 \wedge a_2) \vee (0,8 \wedge a_3) \vee (0,7 \wedge a_4), \\ 0,8 &\geq (0,2 \wedge a_1) \vee (0,1 \wedge a_2) \vee (0,4 \wedge a_3) \vee (0,5 \wedge a_4), \\ 0,3 &\geq (0,4 \wedge a_1) \vee (0,2 \wedge a_2) \vee (0,3 \wedge a_3) \vee (0,2 \wedge a_4), \\ 0,4 &\geq (0,9 \wedge a_1) \vee (0,5 \wedge a_2) \vee (0,7 \wedge a_3) \vee (0,3 \wedge a_4). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Из логических операций получим следующую приоритетность возможных причин отказа СВ и КВ:

$$\left. \begin{aligned} 0,6 &\geq 0,9 \wedge a_1, a_1; \\ 0,8 &\geq 0,5 \wedge a_4, a_4; \\ 0,3 &\geq 0,4 \wedge a_1, a_1; \\ 0,4 &\geq 0,9 \wedge a_1, a_1. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Из (8) очевидно, что возможными отказавшими элементами являются:

- с приоритетностью 0,8 – вентиляционная установка;
- с приоритетностью 0,3 – калорифер.

Таким образом, решение системы матричных уравнений позволяет получить численные значения степени принадлежности причин отказа СВ и КВ, при этом наибольшее из этих значений указывает на определенный отказ элемента системы, что позволяет принять необходимые решения о проведении ремонтных работ и дальнейшей эксплуатации системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при наличии изменений контролируемых параметров, указывающих на отказ СВ и КВ, а также оценки экспертов о возможных причинах неисправности возможно установить истинную причину отказа. С учетом изложенных в работе положений, была раз-

работана углубленная диагностическая модель, позволяющая производить оценку технического состояния СВ и КВ, функционирующей в нескольких режимах и состоящей из 13 функциональных элементов. Дальнейшие исследования направлены на повышение результатов определения отказа СВ и КВ путем согласования экспертных мнений, полученных от нескольких экспертов.

Список используемых источников

1. *Вахромеев О.С., Каримов Р.Т., Надеев А.И.* Современные методы диагностики электро-механических систем // Вестник АГТУ. – 2006. – Вып. № 2 (31). – С. 51–55.

2. *Булдакова Т.И., Джалолов А.Ш.* Выбор технологий Data Mining для систем обнаружения вторжений в корпоративную сеть // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 11. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/security/987.html> (дата обращения: 05.10.2020).

3. *Гируцкий О.И., Тарасик В.П.* Создание электронных систем управления и диагностирования гидромеханических передач мобильных машин: этапы, пути и перспективы // Журнал автомобильных инженеров. – 2013. – Вып. 4 (81). – С. 18–23.

4. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств: пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

5. *Манусов В.З., Ахьёев Дж.С., Орлов Д.В.* Анализ технического состояния электрооборудования систем электроснабжения на основе нечетких признаков // Сборник научных трудов НГТУ, Новосибирск, 5–9 декабря 2017 г.: в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. – С. 109–123.

6. *Матюшкова О. Ю., Тэттэр В. Ю.* Современные методы виброакустического диагностирования // Омский научный вестник. – 2013. – Вып. № 3 (123). – С. 294–299.

Д.Л. Каргу*,
кандидат техн. наук, доцент;
В.А. Кузнецов*;
А.А. Скопцов**;
В.А. Тимофеев*

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

**27-й Центральный научно-исследовательский институт МОРФ, г. Москва

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБАЛАНСА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОРЯДКА ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Представлена энергобалансная модель системы автономного электроснабжения. Проведен вариант ее апробации на основе тренажера, который представляет собой новое, полезное техническое решение в виде солнечной электроэнергетической установки (СЭУ). Осуществлен выбор основных составных частей СЭУ. Представлена структурная схема СЭУ, а также даны рекомендации по ее задействованию в учебном процессе кафедры.

Ключевые слова: модель энергетического баланса, тренажер, бортовая система электроснабжения, солнечная электроэнергетическая установка.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке математических моделей процессов, протекающих в системе автономного электроснабжения, возникает задача их апробации. Центральное место среди этих моделей занимает энергобалансная модель. Для выполнения исследовательских и расчетных задач необходимо определить, насколько адекватна разработанная модель своему реальному прототипу. На основании этого возникает требование иметь в составе учебно-материальной базы (УМБ) кафедры комплекс испытательных стендов и тренажеров, а также действующую солнечную электроэнергетическую установку (СЭУ). Кроме того, наличие данных тренажеров в составе УМБ необходимо для отработки вопросов учебных дисциплин на кафедре бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов с учетом естественного солнечного освещения.

Вариант частичной апробации разработанной модели возможен на основе тренажера, предназначенного для исследования основных технических характеристик составных частей СЭУ – первичных источников (ПИ) – солнечных батарей, накопителей энергии (НЭ) – аккумуляторных батарей, регулируемых преобразователей (РП) – зарядных контроллеров и других статических преобразователей электрической энергии (ЭЭ).

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБАЛАНСА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ПРЕДЛАГАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЕЕ АПРОБАЦИИ

В основе энергобалансной модели лежит условие равенства произведенной и израсходованной в системе электроэнергии за определенный период времени, $T = T_{\Sigma}$, связанное с цикличностью работы СЭУ. При разработке и эксплуатации системы электроснабжения (СЭС) большинства КА в качестве периода выполнения энергобаланса принимают $T_{\Sigma} = T_{\text{СУТ}} = 24$ ч. Это соответствует суточному интервалу планирования работ автономного объекта.

Цель решения проектной энергобалансной задачи – расчет установленной мощности источников и преобразователей, а также энергоемкости накопителей СЭС, обеспечивающих

выполнение всех планируемых программ работ с нагрузкой при ожидаемой степени деградации ПИ, НЭ и РП за время работы СЭУ.

В *эксплуатационной* задаче расчета энергетического баланса состав, параметры и энергетическое состояние (деградация) элементов СЭС известны на конкретный (текущий) момент эксплуатации. Необходимо для данных условий и планируемой программы работ (на сутки, неделю, месяц) подтвердить энергетическую обеспеченность (реализуемость) планируемой программы с учетом возможных вариаций циклограмм $P_H(t)$ и $P_{CB}(t)$ (потребляемой и генерируемой мощности), а также проверить отсутствие энергетических ограничений по скоростям (токам) накопления и расходования энергии, требуемым для реализации заявляемой программы работ.

Электроэнергия, произведенная первичным источником (источниками), в основной ее части расходуется бортовыми потребителями при их работе, а также частично рассеивается (теряется) в виде тепла в составных частях СЭС. Уравнение энергетического баланса, полученное с учетом основных составляющих потерь ЭЭ в системе, имеет следующий вид:

$$W_{CB}(T_{\text{Э}}) = W_P(T_{\text{Э}}) + \Delta W_{ЗУ}(T_{\text{Э}}) + \Delta W_{РУ}(T_{\text{Э}}) + \Delta W_{СН}(T_{\text{Э}}) + \Delta W_{АБ}(T_{\text{Э}}), \quad (1)$$

где W_{CB} – электрическая энергия, произведенная солнечной батареей (СБ);
 W_P – электрическая энергия, расходуемая потребителями при суточной программе работы;
 $\Delta W_{ЗУ}$ – потери энергии в зарядном устройстве (ЗУ);
 $\Delta W_{РУ}$ – потери энергии в разрядном устройстве (РУ);
 $\Delta W_{СН}$ – потери энергии в централизованном стабилизаторе напряжения (СН);
 $\Delta W_{АБ}$ – суммарные потери энергии в аккумуляторной батарее (АБ) за все циклы «заряд – разряд» в интервале $T_{\text{Э}}$.

Энергетическое состояние (степень заряженности) АБ оценивают ее текущим энергосодержанием, или, иначе говоря, полезной энергией [2]. Полезная энергия АБ представляет собой накопленную энергию химических связей, которая может быть преобразована в ЭЭ при разряде АБ. Процессы накопления и расходования химической энергии протекают неидеально, т. е. сопряжены с потерями, которые для герметичных аккумуляторов в конечном итоге переходят в тепло. Так, АБ при заряде получает от ПИ электрическую энергию $W_{АБ\text{ЗАР}}$, которая в основном преобразуется в полезную энергию W_B и частично теряется внутри АБ в виде тепловых потерь $\Delta W_{АБ\text{ЗАР}}$:

$$W_{АБ\text{ЗАР}} = W_B + \Delta W_{АБ\text{ЗАР}}. \quad (2)$$

При разряде АБ основная часть полезной энергии поступает к потребителям в виде разрядной энергии, а меньшая часть теряется внутри АБ:

$$W_B = W_{АБ\text{РАЗР}} + \Delta W_{АБ\text{РАЗР}}. \quad (3)$$

Эти соотношения содержат неотрицательные значения энергий, поскольку выражают две стороны энергетического баланса – отдельно для зарядного и разрядного процессов.

Для оценивания изменений текущего состояния периодически заряжающейся и разряжающейся АБ введем понятие текущей полезной мощности АБ $P_B(t)$, имеющей знак, как и ток АБ. Зарядную (получаемую) мощность условимся считать положительной, а разрядную – отрицательной.

Поскольку метод энергетического баланса чаще оперирует не с самим энергетическим состоянием АБ, а с его изменениями (приращениями) $\delta W_B(t)$, выбор начального состояния АБ $W_B(0)=W_0$ на данном этапе может осуществляться произвольно ($W_B(0)=W_0$ задается). Тогда текущее значение энергосодержания АБ (энергетический функционал) примет вид

$$W_B(t) = W_0 + \int_0^t P_B(t) dt = W_0 + \delta W_B(t), \quad (4)$$

где $\delta W_B(t)$ – приращение (изменение) энергосодержания АБ за время t .

Вся произведенная за время $T_3 = T_{\text{СУТ}}$ электроэнергия должна быть полностью истрачена, причем ее должно оказаться достаточно для питания потребителей. Следовательно, накопитель (АБ) к моменту $t = T_3$ должен иметь то же энергетическое состояние, что и в момент $t = 0$, т. е. $W_B(T_3) = W_B(0)$ или

$$\delta W_B(T_3) = \int_0^{T_3} P_B(t) dt = 0. \quad (5)$$

В любом другом случае АБ от периода к периоду будет либо терять, либо чрезмерно увеличивать свой энергозапас. И то и другое ускоряет ее деградацию и выход из строя. Однако ситуации дефицита ($\delta W_B(T_3) < 0$) и избытка электроэнергии ($\delta W_B(T_3) > 0$) неравноценны с точки зрения возможности выполнения целевой задачи питаемой нагрузки.

Чтобы вычислить составляющие потерь в формулах для $W_{\text{СБ}}(t)$ или $P_B(t)$, необходимо знать число и продолжительность интервалов работы (включений) соответствующих РП (ЗУ, РУ, СН). Иными словами, надо на каждом малом интервале времени $\Delta t_i \in T$ определять режим работы АБ (заряд, разряд, хранение).

Чтобы вычислять мощность и текущее количество электроэнергии на входах (или выходах) упомянутых устройств с учетом потерь в них, необходимо знать КПД всех РП и АБ. Получению точного решения этой задачи препятствует трудоемкость точного математического описания суточных циклограмм генерируемой и потребляемой мощностей, сложность функциональных зависимостей потерь в АБ и РП от их токов, напряжений и температуры, а также влияние деградации характеристик СБ, АБ и РП. Поэтому для вычисления функционала принимают ряд допущений, а именно:

1. Суточные циклограммы генерируемой мощности $P_{\text{СБ}}(t)$ и потребляемой мощности $P_{\text{Н}}(t)$ могут быть точно представлены детерминированными ступенчатыми функциями времени (рис. 1,а). Длительности освещенных участков орбиты и теневых участков известны.

2. Каждая из циклограмм может быть разделена на некоторое число n участков (интервалов времени) Δt_i , в пределах каждого из которых значение текущей мощности накопителя $P_Q(t)$, поступающей к аккумулирующей подсистеме (АПС) от ПИ или от АПС к потребителям, может быть принято постоянной величиной

$$P_{Qi} = P_{\text{СБ}i} - \frac{P_{\text{Н}i}}{\eta_{\text{СН}}}, \quad (6)$$

где $\eta_{\text{СН}}$ – КПД СН.

Анализ знака P_{Qi} позволяет для каждого интервала Δt_i определять режим работы АБ (заряд, разряд), а значит – число включений и продолжительность работы ЗУ, РУ, СН. Заметим, что при отсутствии потерь энергии в АПС $P_B(t) = P_Q(t) = P_{\text{СБ}}(t) - P_{\text{Н}}(t)$.

3. КПД СН, ЗУ и РУ не зависят от их токов и напряжений и неизменны в течение срока активного существования КА.

4. Коэффициент отдачи АБ по энергии η_W не зависит от тока, напряжения и температуры АБ и не изменяется по мере деградации АБ в течение срока активного существования КА. Деградационные изменения мощности СБ и энергоемкости АБ заданы (известны).

5. Суммарная энергия потерь в АБ при заряде и разряде полностью выделяется на интервале заряда, что существенно упрощает вычисление полезной энергии АБ.

Названные допущения позволяют выразить взаимосвязь количества энергии на входе и выходе каждого элемента СЭС через его КПД, например:

– при заряде (работает ЗУ):

$$W_{\text{ВЫХ ЗУ}} = W_{\text{ВХ ЗУ}} \eta_{\text{ЗУ}};$$

– при разряде (работает РУ):

$$W_{\text{ВЫХ РУ}} = W_{\text{ВХ РУ}} \eta_{\text{РУ}};$$

– при работе СН:

$$W_{\text{ВЫХ СН}} = W_{\text{ВХ СН}} \eta_{\text{СН}};$$

– при возврате энергии, накопленной в АБ:

$$W_{\text{АБ РАЗР}} = W_{\text{ВХ РУ}} = W_{\text{ВЫХ ЗУ}} \eta_{\text{ЗУ}} = W_{\text{АБ ЗАР}} \eta_{\text{АБ}},$$

где $\eta_{\text{ЗУ}}$, $\eta_{\text{РУ}}$, $\eta_{\text{АБ}}$ – КПД ЗУ, РУ и коэффициент отдачи (КПД) АБ по энергии.

Пользуясь принятыми допущениями, формулами (1) – (6) и рис. 1, можно получить выражение для текущего изменения энергосодержания $\delta W_{\text{Б}}(t)$. Для этого необходимо совместить начала координат суточных циклограмм генерируемой и потребляемой мощности (рис. 1,а) и вычислить мощность накопителя P_{Qi} на каждом интервале Δt_i вдоль циклограмм ($i=1 \dots n$) по данным рис. 1,б.

Если в интервале Δt_i значение $P_{Qi} > 0$ (имеет место заряд АБ), то согласно формулам (1) – (6) и рис. 1,в, изменение энергосодержания АБ с учетом потерь в ЗУ и АБ будет

$$\delta W_i = \Delta t_i P_{Qi} \eta_{\text{ЗУ}} \eta_{\text{АБ}} > 0.$$

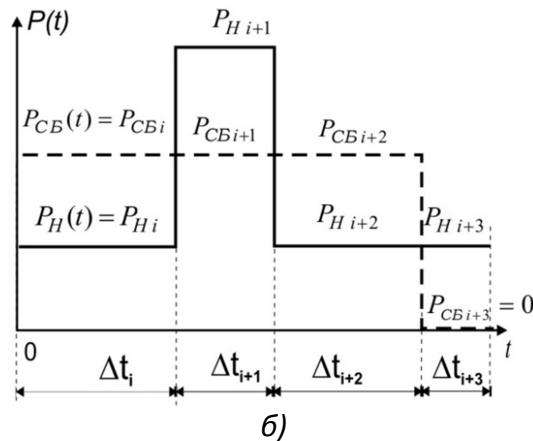
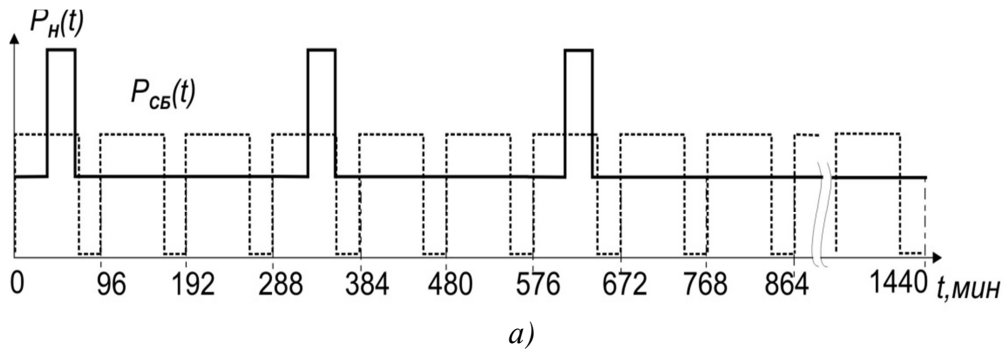


Рис.1. Совмещенные суточные циклограммы генерирования и потребления ЭЭ (а), их разбиение на интервалы Δt_i с $P_{Qi} = \text{const}$ (б) и потоки ЭЭ в СЭС (в)

Если же в интервале Δt_i значение $P_{Qi} < 0$, то имеет место разряд АБ, и изменение полезной энергии АБ будет

$$\delta W_i = \Delta t_i P_{Qi} \eta_{\text{СН}} / \eta_{\text{РУ}} < 0.$$

При $P_{Qi} = 0$ ЗУ и РУ не работают ($\delta W_i = 0$), и питание потребителей осуществляется от СБ через СН. Учитывая, таким образом, все заряды и разряды АБ на каждом из n интервалов суточной циклограммы, можно записать суточное изменение функционала в виде

$$\delta W_{\text{Б}} = \sum_{i=1}^n \delta W_i = \sum_{i=1}^n K_i \Delta t_i P_{Q_i}, \quad (7)$$

где n – число интервалов времени, для которых $P_{Q_i} = \text{const}$, а

$$K_i = \begin{cases} \eta_{\text{ЗУ}} \eta_{\text{В}}, P_{Q_i} > 0; \\ \eta_{\text{СН}} / \eta_{\text{РУ}}, P_{Q_i} \leq 0 \text{ и } P_{\text{СБ}} \neq 0; \\ 1 / \eta_{\text{РУ}}, P_{Q_i} \leq 0 \text{ и } P_{\text{СБ}} = 0 \text{ (СН не работает)}. \end{cases} \quad (8)$$

Полученное соотношение позволяет решить как проектную, так и эксплуатационную задачу расчета энергетического баланса [3–4].

Для проведения апробации представленной модели предлагается использовать тренажер, состоящий из комплекта блоков, приборов и кабелей, обеспечивающих работу СЭУ. Основу тренажера составляет СЭУ-2,4/22. Данная солнечная электростанция преобразует солнечную энергию в электрическую и вырабатывает синусоидальное напряжение 220 В. Это позволяет использовать станцию как источник электропитания 220 В для любых электроприборов. Солнечная электростанция включает в себя многофункциональный инвертор со встроенным контроллером солнечных батарей. К станции могут быть подключены дополнительные солнечные батареи и аккумуляторы, что увеличит объем производимой электроэнергии и резерв для использования в пасмурную погоду.

Основные технические характеристики составных частей тренажера приведены в табл. 1. Структурная схема тренажера показана на рис. 2.

Таблица 1

Основные технические характеристики составных частей тренажера

№ п/п	Техническая характеристика
1	СЭУ. Мощность солнечных панелей, Вт: 800 (комплект из 4 панелей). Мощность, Вт: 2400. Пиковая мощность, Вт: 4800. Напряжение выходное: переменное 220 В, 50 Гц, однофазное; постоянное 24 В. Рабочий диапазон температур: 0 °С, +40 °С. Тип исполнения: IP32, для внутренней установки
2	СБ. Тип: кремниевая. Мощность: 200 Вт. Рабочий диапазон температур: -50 °С, +50 °С. Тип исполнения: IP65, для наружной установки. Габаритные размеры: 1500×800×40 мм. Вес: 15–20 кг
3	АБ. Тип электрохимической системы: свинцово-кислотная, электролит в виде геля. Емкость: 60–100 А*час. Напряжение: 12 В (одной АБ). Рабочий диапазон температур: 0 °С, +40 °С. Тип исполнения: IP32, для внутренней установки. Габаритные размеры: 400×150×150 мм. Вес: 60 кг

Суточные или витковые циклограммы генерируемой мощности $P_{\text{СБ}}(t)$ и потребляемой мощности $P_{\text{Н}}(t)$ задаются путем подключения-отключения СБ и нагрузки (например, согласно временным интервалам, указанным на рис. 1,а).

Блок регулируемых преобразователей конструктивно объединяет в своем составе разрядное устройство, зарядное устройство и стабилизатор напряжения. Каждый из указанных РП может функционировать в режиме MPPT контроллера или экстремального регулятора мощ-

ности. МРРТ контроллер – это электронное устройство, работающее в составе комплектов солнечных электростанций, обеспечивающее режим работы системы с максимально возможным коэффициентом полезного действия на выходе первичного источника. Аббревиатура МРРТ, произошла от английских слов – maximum power point tracking, что обозначает «отслеживание точки максимально возможной мощности на выходе». Работа МРРТ контроллера заключается в том, что устройство отслеживает силу тока и напряжение на ПИ и определяет их соотношение, при котором значение мощности на выходе будет максимальным.

Амперметры $I_{СБ}$, $I_{АБ}$, $I_{И}$ необходимы для снятия значений токов в соответствующих цепях. Показания амперметра $I_{АБ}$ позволяют определить знак (направление) тока, протекающего в цепи АБ.

Встроенная индикаторная панель микропроцессорного устройства (МПУ) необходима для контроля параметров зарядных и разрядных режимов аккумуляторной батареи (величины токов, напряжений, текущей емкости и полезной энергии), а также работы стабилизатора напряжения и других РП, входящих в состав тренажера.

Персональная электронно-вычислительная машина используется для контроля и сбора статистических данных о накоплении ЭЭ и последующей обработке результатов измерений в ходе выполнения программы работы.

В качестве потребителя используется часть осветительной сети аудитории 179-2, в которой установлен тренажер. Принципиальная схема тренажера подробно описана в [2].

Все работы по монтажу наладке и техническому обслуживанию выполнены специалистами кафедры, изучившими техническую документацию, конструкцию, особенности и правила эксплуатации станции и имеющими соответствующую квалификационную группу по технике безопасности. Порядок монтажа тренажера представлен на рис. 3.

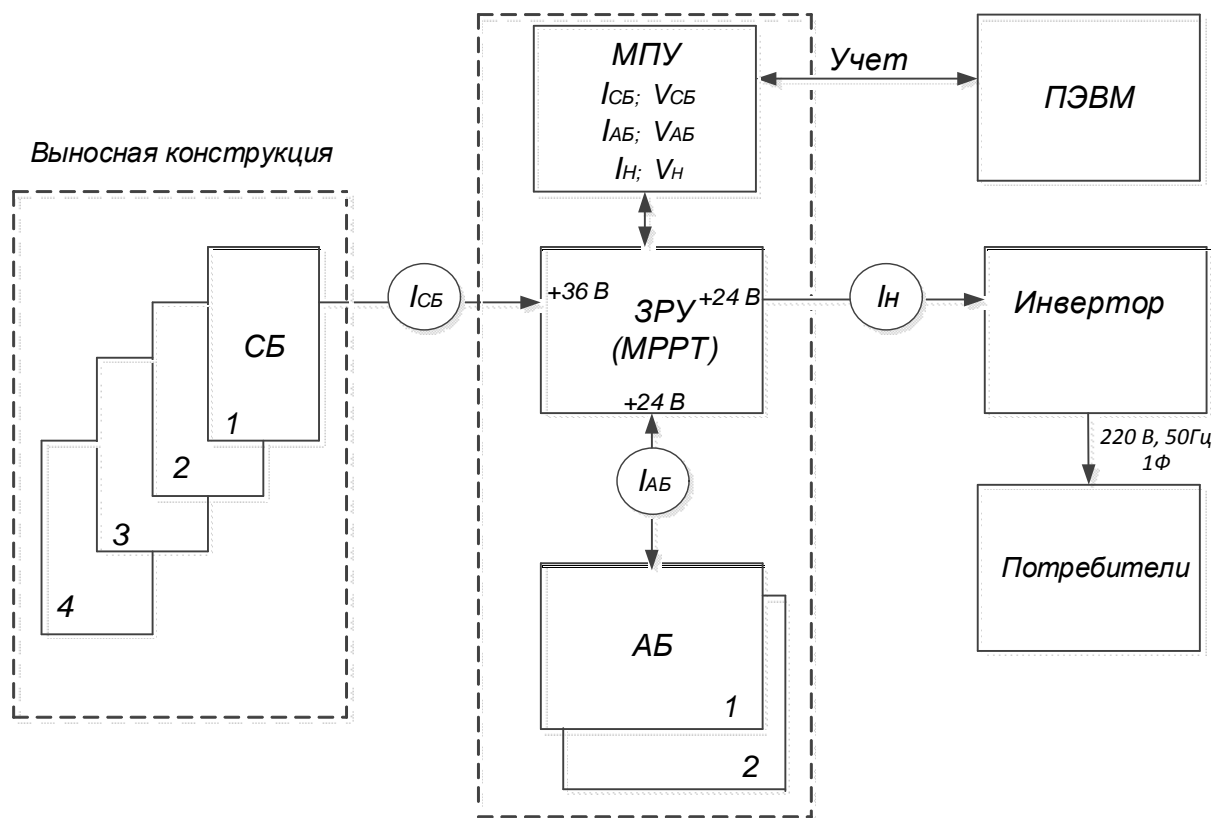


Рис. 2. Структурная схема тренажера



Рис. 3. Сборка тренажера



Рис. 4. Место установки солнечных панелей

Тренажер (кроме панелей солнечных батарей) смонтирован в аудитории 22-й кафедры. Место размещения солнечных панелей СЭУ – на юго-восточном скате кровли учебного корпуса 2-го факультета (рис. 4).

При задании суточной циклограммы контрольно-измерительная аппаратура тренажера (измерительная панель МПУ, амперметры) фиксирует состояние накопителя как непрерывно, так и в конце каждого периода T_3 . Поэтому АБ от периода к периоду будет либо терять, либо чрезмерно увеличивать свой энергозапас, о чем при фиксированной циклограмме нагрузки можно судить по значению напряжения АБ в моменты окончания каждого очередного периода. Сравнительный анализ данных, полученных при проведении расчета энергобаланса и при работе тренажера позволяет подтвердить адекватность апробируемой модели энергобаланса реальной СЭС, а также практически установить две следующие особенности нарушения энергобаланса в системе.

Во-первых, постоянный суточный дефицит электроэнергии ведет к постепенному снижению минимального выходного напряжения СЭС и, как следствие, к аварийному (защитному) отключению части бортовых энергоемких систем для уменьшения общей нагрузки СЭС и сохранения автономного объекта. Поэтому суточный дефицит электроэнергии в СЭС в конечном итоге ведет к невыполнению очередной целевой задачи в полном объеме и в планируемый срок.

Во-вторых, постоянное увеличение энергосодержания АБ ведет к автоматическому ограничению ее дальнейшего заряда и переходу в режим сохранения заряженности путем уменьшения зарядного тока или периодического отключения ЗУ. В этом случае избыточная энергия ПИ не поступает в АБ и в системе не используется. Однако в данном случае неизбежные ошибки в оценивании состояния заряженности АБ увеличивают опасность ее перезаряда и преждевременного отказа.

Проведение измерений тока на амперметре $I_{АБ}$ и напряжения СБ позволяет проверить правильность выбора текущей мощности накопителя $P_Q(t)$ (6), что необходимо для решения задачи баланса.

В ходе исследований на базе тренажера были отработаны ситуации дефицита и избытка электроэнергии. На основании полученных результатов (рис. 5 и 6) была определена точность математической модели путем оценивания совпадений значений выходных параметров реального объекта (СЭУ) и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью разработанной модели. По результатам десяти исследовательских циклов она составила 5,0–7,0 %.

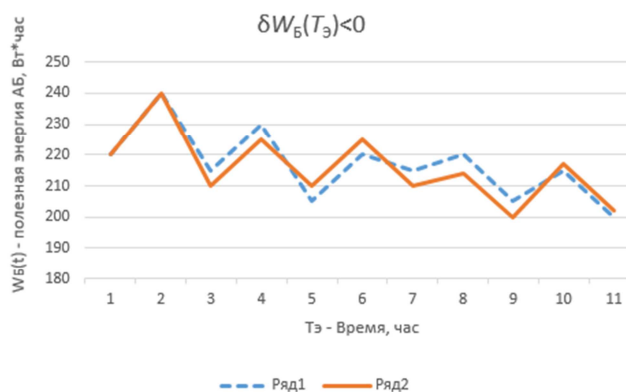


Рис. 5. Ситуация дефицита электроэнергии ($\delta W_B(TЭ) < 0$):

ряд 1 – расчетные значения полезной энергии АБ; ряд 2 – изменение среднего значения полезной энергии АБ, полученного по результатам десяти исследовательских циклов

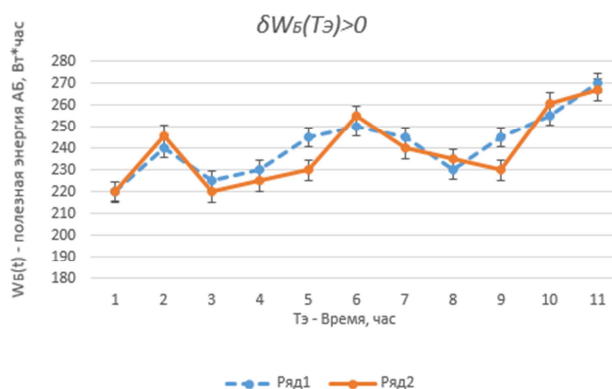


Рис. 6. Ситуация избытка электроэнергии ($\delta W_B(TЭ) > 0$):

ряд 1 – расчетные значения полезной энергии АБ; ряд 2 – изменение среднего значения полезной энергии АБ, полученного по результатам десяти исследовательских циклов

Введение в эксплуатацию и учебный процесс данного тренажера позволило расширить возможности УМБ кафедры в рамках осуществления подготовки специалистов в области эксплуатации систем автономного электроснабжения объектов различного назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследования, проведенные при помощи предлагаемого тренажера, подтверждают результаты предварительного расчета с применением данной математической модели. Сравнительный анализ данных, полученных при выполнении расчета энергобаланса и при работе тренажера с приборами класса точности 0.5 позволяет подтвердить адекватность апробируемой модели энергобаланса реальной СЭС и оценить погрешность результатов моделирования величиной 5,0–7,0 %. Это дает возможность использовать модель при решении исследовательских и расчетных задач в области автономных СЭС.

В дальнейшем на тренажере планируется провести апробацию теоретических зависимостей, определяющих величину энергопритока с учетом особенностей схемной реализации составных частей СЭС и окружающих эксплуатационных факторов (температуры, деградации и др.).

Необходимо также отметить, что с разработкой данного тренажера на кафедре реализована возможность исследования основных технических характеристик составных частей СЭУ (аккумуляторных и солнечных батарей, зарядных контроллеров и других статических преобразователей ЭЭ). Таким образом, в учебный процесс включены вопросы по отработке навыков при проведении испытаний, а также эксплуатации автономных объектов различного типа в штатных и нештатных режимах.

Список используемых источников

1. Модель энергопритока от солнечных батарей БСЭС КА стабилизированного вращением / Ю.А. Чудновский [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 164–171.

2. Системы электроснабжения космических аппаратов и ракет-носителей: учеб. пособие / Д.Л. Каргу [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 116 с.
3. Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А. Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергобаланса: учеб. пособие. – Самара: СГАУ, 2007. – 160 с.
4. Г.Б. Стеганов, А.И. Ратушняк Расчет и проектирование бортовых систем электроснабжения и их основных подсистем: учеб. пособие. – СПб.: им. А.Ф. Можайского, 2004. – 110 с.

В.И. Крыжановский,
кандидат техн. наук, доцент;
С.В. Слатов;
И.А. Трофимов,
кандидат техн. наук

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВОРОТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Разработан алгоритм расчета траектории оптимального по быстродействию разворота по двум углам для космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) при наведении аппаратуры наблюдения на одиночный объект, расположенный на земной поверхности. По окончании разворота углы и угловые скорости линии визирования аппаратуры наблюдения должны равняться углам и угловым скоростям линии направления на цель для предотвращения сдвига изображения. В общем случае по одному из углов рассчитывается оптимальная по расходу топлива траектория.

Ключевые слова: оптимальный по быстродействию разворот, оптимальный по расходу топлива разворот, космический аппарат, наведение на цель, дистанционное зондирование Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является жесткий космический аппарат (КА), на котором размещена аппаратура наблюдения за земной поверхностью, ее наведение на объект наблюдения производится путем разворота корпуса КА.

В большинстве работ [1, 2], посвященных пространственным разворотам КА ДЗЗ, задача решается при заданных начальной и конечной точках разворота. Вследствие движения КА ДЗЗ по орбите угол и угловая скорость линии направления на объект наблюдения изменяются, время разворота зависит от многих факторов и заранее неизвестно, поэтому вычислить конечную точку в момент начала разворота невозможно. Вопросы расчета оптимальной траектории для этих условий решались в работах [3, 4] исходя из предположения, что объект наблюдения располагается на трассе полета и для наведения на него аппаратуры наблюдения требуется разворот только по одному углу. Если объект наблюдения находится в стороне от трассы полета, требуется разворот КА ДЗЗ по крайней мере по двум углам. В данной публикации для решения задачи оптимального по быстродействию пространственного разворота предлагается использовать предложенный в [4] итерационный алгоритм.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ТРАЕКТОРИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВОРОТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Необходимо определить оптимальную по быстродействию траекторию пространственного разворота по двум углам на интервале времени $t \in [0, t_k]$ для КА ДЗЗ при наблюдении за одиночными объектами на земной поверхности, которые в общем случае располагаются в стороне от трассы полета. Предполагается, что поворот линии визирования аппаратуры наблюдения может осуществляться путем разворота корпуса КА по углам тангажа и крена или тангажа и рыскания. Как объект управления КА представляет собой жесткое тело, известны главные моменты инерции КА J_x, J_y, J_z и максимально возможные управляющие

моменты M_{mx}, M_{my}, M_{mz} относительно связанных осей, максимально допустимые угловые скорости разворота $\dot{\theta}_m, \dot{\psi}_m, \dot{\gamma}_m$ по углам тангажа, рыскания и крена соответственно. Известны углы и угловые скорости $\theta(0), \dot{\theta}(0), \psi(0), \dot{\psi}(0), \gamma(0), \dot{\gamma}(0)$ линии визирования в момент начала разворота, а также в общем случае известен закон изменения углов и угловых скоростей $\theta_{ц}(t), \dot{\theta}_{ц}(t), \psi_{ц}(t), \dot{\psi}_{ц}(t), \gamma_{ц}(t), \dot{\gamma}_{ц}(t)$ направления на цель и их значения в момент начала разворота.

Наибольший интерес представляет частный случай, когда КА движется по орбите на постоянной высоте от поверхности Земли h с постоянной линейной скоростью V . Известно расстояние l от проекции КА на поверхность Земли в момент времени $t=0$ до цели, расстояния l_1, l_2 от трассы полета до текущей и последующей целей. Кривизна поверхности Земли и кривизна орбиты не учитываются, что допустимо при малой длительности перенацеливания.

Необходимо осуществить разворот КА таким образом, чтобы обеспечить выполнение следующих граничных условий:

$$\theta(t_k) = \theta_{ц}(t_k), \dot{\theta}(t_k) = \dot{\theta}_{ц}(t_k), \gamma(t_k) = \gamma_{ц}(t_k), \dot{\gamma}(t_k) = \dot{\gamma}_{ц}(t_k) \quad (1)$$

или

$$\theta(t_k) = \theta_{ц}(t_k), \dot{\theta}(t_k) = \dot{\theta}_{ц}(t_k), \psi(t_k) = \psi_{ц}(t_k), \dot{\psi}(t_k) = \dot{\psi}_{ц}(t_k), \quad (1a)$$

а также минимизировать время t_k .

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ЦЕЛИ

Угловое движение жесткого КА по углу тангажа при автономном развороте описывается дифференциальным уравнением

$$J\ddot{\vartheta} = M, \quad (2)$$

где J – момент инерции КА,

M – управляющий момент.

Если в процессе разворота используется только максимальное значение момента M_m , то вышеприведенное дифференциальное уравнение может быть записано в виде

$$\ddot{\vartheta} = \pm \varepsilon_0, \quad (3)$$

где $\varepsilon_0 = \frac{M_m}{J}$.

В этом случае угловое движение КА описывается уравнениями:

– во временной области:

$$\vartheta(t) = \vartheta(t_0) + \dot{\vartheta}(t_0)(t-t_0) \pm 0,5\varepsilon_0(t-t_0)^2, \quad (4)$$

$$\dot{\vartheta}(t) = \dot{\vartheta}(t_0) \pm \varepsilon_0(t-t_0); \quad (5)$$

– на фазовой плоскости:

$$0,5\dot{\vartheta}^2 \mp \varepsilon_0\vartheta = C_1, \quad (6)$$

где C_1 – постоянная величина, зависящая от начальных условий.

Если управляющий момент равен нулю, фазовая траектория – прямая линия, параллельная оси абсцисс, ее уравнение имеет вид

$$\dot{\vartheta} = C_2. \quad (7)$$

Таковыми же уравнениями описывается движение КА по углам крена и рыскания. Геометрическая схема для получения уравнений движения направления на цель при развороте по углам тангажа и крена приведена на рис. 1.

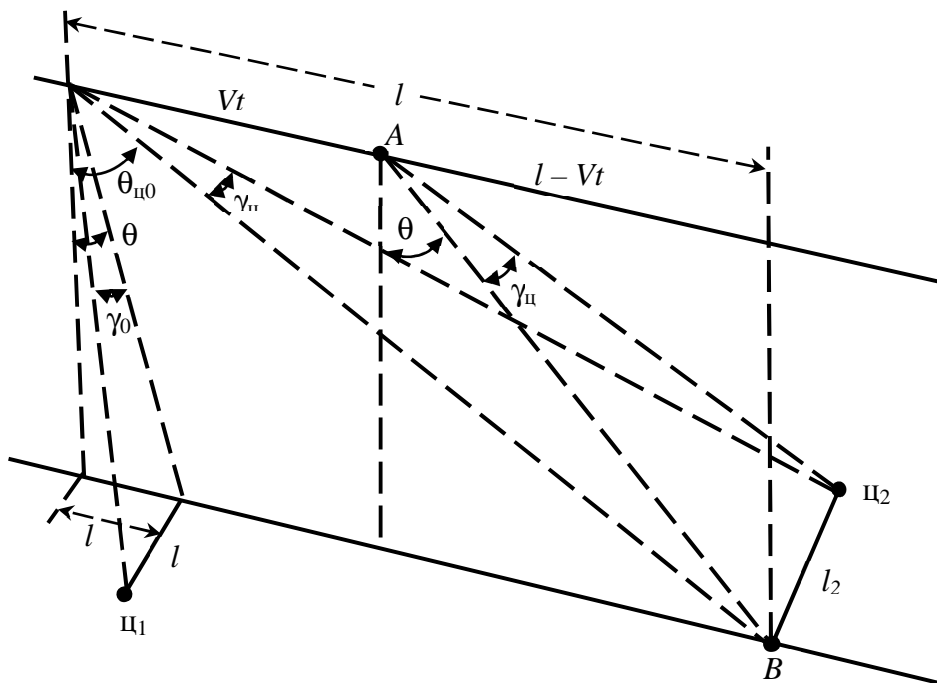


Рис. 1. Геометрическая схема при развороте по углам тангажа и крена

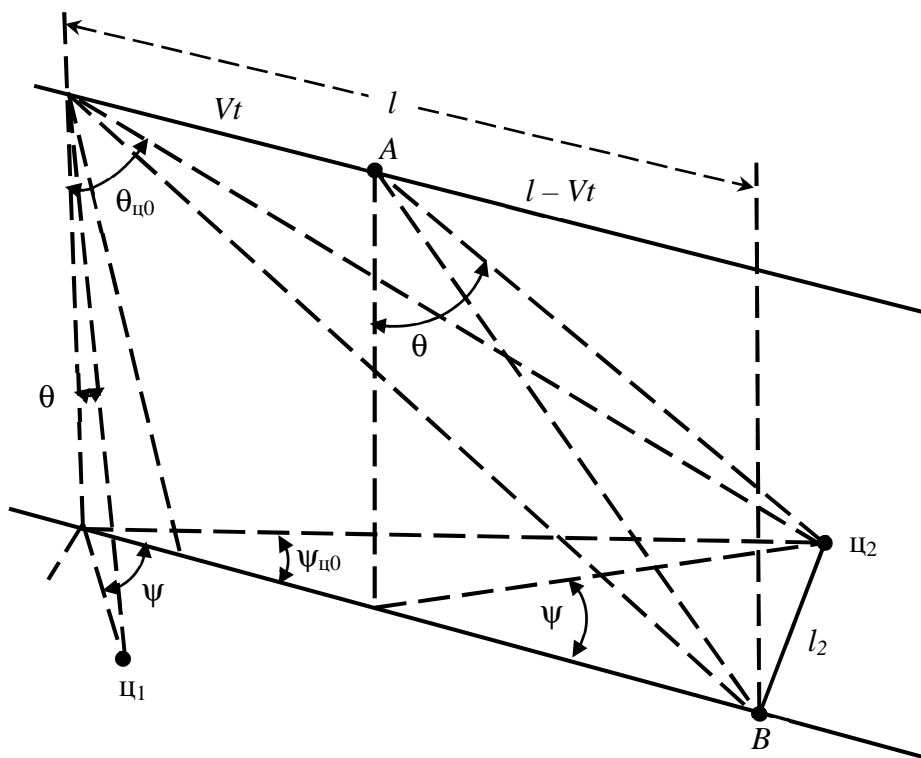


Рис. 2. Геометрическая схема при развороте по углам рыскания и тангажа

Уравнения движения линии направления на цель получаем путем тригонометрических преобразований:

$$\vartheta_{\text{ц}}(t) = \arctg \frac{l-Vt}{h}, \quad \dot{\vartheta}_{\text{ц}}(t) = \frac{-Vh}{h^2 + (l-Vt)^2}, \tag{8}$$

$$\gamma_{\text{ц}}(t) = \arctg \left[\frac{l_2}{h} \cos \left(\arctg \frac{l-Vt}{h} \right) \right]. \tag{9}$$

Вводим обозначения:

$$u = \frac{l-Vt}{h}, u_1 = \arctg(u), u_2 = \left[\frac{l_2}{h} \cos u_1 \right]^2,$$

получаем

$$\dot{\gamma}_{\text{ц}} = \frac{l_2 V \sin u_1}{h^2 (1+u_2)(1+u^2)}. \tag{10}$$

Геометрическая схема для получения уравнений движения направления на цель при развороте по углам рыскания и тангажа приведена на рис. 2.

Расчетные соотношения приведены ниже:

$$\begin{aligned} \psi_{\text{ц}} &= \arctg \frac{l_2}{l-Vt}, \\ \dot{\psi}_{\text{ц}} &= \frac{l_2 V}{(l-Vt)^2 + l_2^2}, \\ \theta_{\text{ц}} &= \arctg \frac{\sqrt{l_2^2 + (l-Vt)^2}}{h}, \\ \dot{\theta}_{\text{ц}} &= \frac{hV(Vt-l)}{\left[h^2 + l_2^2 + (l-Vt)^2 \right] \sqrt{l_2^2 + (l-Vt)^2}}. \end{aligned} \tag{11}$$

Выражения (8) – (11) получены без учета вращения Земли и могут использоваться только при кратковременных разворотах, в противном случае движение цели относительно плоскости орбиты из-за вращения Земли следует учитывать. Геометрия движения цели в этом случае при развороте тангаж-крен приведена на рис. 3.

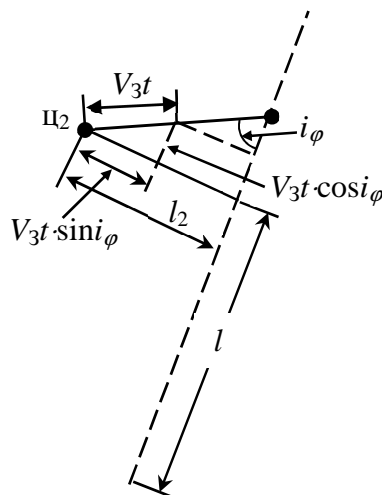


Рис. 3. Геометрия движения цели для учета движения Земли

На рис. 3 введены следующие обозначения: V_3 – линейная скорость вращения Земли на широте φ , определяемая в соответствии с выражением $V_3 = V_0 \cos \varphi$ (V_0 – линейная скорость вращения Земли на экваторе); i_φ – угол между направлением вращения Земли и плоскостью орбиты, определяемый выражением $\cos i_\varphi = \cos i / \cos \varphi$ (i – угол наклона орбиты).

Путем геометрических вычислений с учетом выражений (8) – (10) определяем:

$$\begin{aligned}\theta_u(t) &= \operatorname{arctg} \frac{l - V_3 t}{h}, \\ \dot{\theta}_u(t) &= \frac{-V_3 h}{h^2 + (l - V_3 t)^2}, \\ \gamma_u(t) &= \operatorname{arctg} \frac{u_1}{u_2}, \\ \dot{\gamma}_u(t) &= \frac{-V_{31} u_2^2 + V_3 (V_3 t - l)}{u_2 (u_1^2 + u_2^2)},\end{aligned}\tag{12}$$

где

$$\begin{aligned}V_3 &= V_0 \cos i_\varphi, \\ V_{31} &= V_3 \sin i_\varphi, \\ u_1 &= l_2 - V_{31} t, \\ u_2 &= \sqrt{h^2 + (l - V_3 t)^2}.\end{aligned}$$

Полученные аналогично выражения для углов и угловых скоростей линии направления на цель при развороте рыскание-тангаж приведены ниже:

$$\begin{aligned}\psi_u(t) &= \operatorname{arctg} \frac{u_1}{u_2}, \\ \dot{\psi}_u(t) &= \frac{-V_{31} u_2 + V_3 u_1}{u_1^2 + u_2^2}, \\ u_1 &= l_2 - V_{31} t, \\ u_2 &= l - V_3 t, \\ \theta_u(t) &= \operatorname{arctg} \frac{u_1}{h}, \\ \dot{\theta}_u(t) &= \frac{h \left[(V_3^2 + V_{31}^2) t - l V_3 - l_2 V_{31} \right]}{u_1 (u_1^2 + h^2)}, \\ u_1 &= \sqrt{(l - V_3 t)^2 + (l_2 - V_{31} t)^2}.\end{aligned}\tag{13}$$

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

В работе [4] получено решение вышеприведенной задачи для одноканального разворота по углу тангажа. Путем использования разработанных алгоритмов можно определить минимальное время разворота для каждого из каналов в отдельности при пространственном развороте. Для пространственного разворота тангаж-крен в общем случае будет выполняться условие

$$T_{\min\theta} \neq T_{\min\gamma},$$

где $T_{\min\theta}, T_{\min\gamma}$ – минимальное время разворота по тангажу и крену соответственно.

Если минимальное время разворота по тангажу меньше времени минимального разворота по крену, разворот по углу крена целесообразно осуществлять за минимальное время $t_k = T_{\min\gamma}$, а разворот по углу тангажа – оптимальным по расходу топлива за время t_k . В соответствии с принципом максимума Понтрягина разворот жесткого КА в этом случае должен выполняться в три этапа. На первом этапе выполняется разгон КА в нужном направлении с максимальным ускорением, на втором – движение по инерции, на третьем – торможение с максимальным ускорением для достижения в момент времени t_k заданных краевых условий. Возможны четыре варианта движения КА. Первый вариант приведен на рис. 4, где изображены фазовые траектории углового движения КА и цели, а также соответствующее управление.

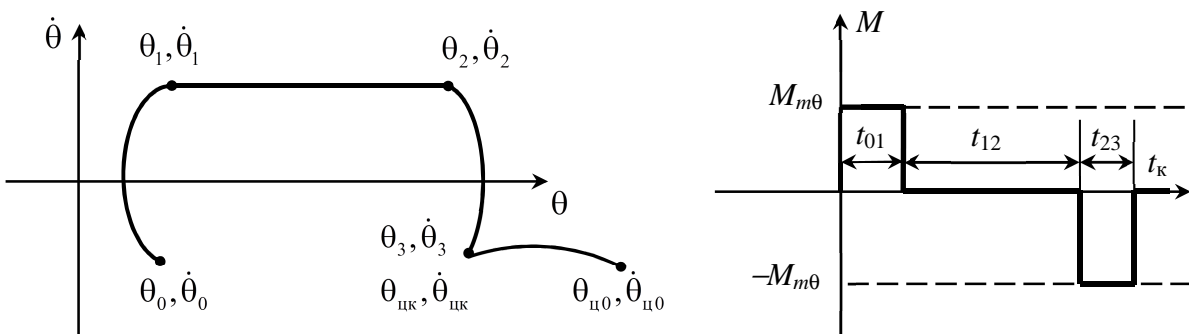


Рис. 4. Первый вариант оптимального по расходу топлива управления

На рис. 4 в течение времени t_{01} производится разгон КА в заданном направлении, в течение времени t_{12} – движение по инерции, затем в течение времени t_{23} – торможение.

Вводим обозначение

$$\varepsilon_\theta = \frac{M_{m\theta}}{J_\theta},$$

тогда уравнение для параболы разгона имеет вид

$$0,5\dot{\theta}_1^2 - \varepsilon_\theta\theta_1 = 0,5\dot{\theta}_0^2 - \varepsilon_\theta\theta_0, \tag{14}$$

а уравнение для параболы торможения –

$$0,5\dot{\theta}_1^2 - \varepsilon_\theta\theta_2 = 0,5\dot{\theta}_{цк}^2 + \varepsilon_\theta\theta_{цк}. \tag{15}$$

В соответствии с выражением (5) время разгона определяется соотношением

$$t_{01} = \frac{\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_0}{\varepsilon_\theta} = k_\theta(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_0), \tag{16}$$

где

$$k_\theta = \frac{1}{\varepsilon_\theta}.$$

Время торможения и движения по инерции в соответствии с выражениями (5), (7) находим по формулам:

$$t_{23} = k_\theta(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{цк}), \quad t_{12} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\dot{\theta}_1}. \tag{17}$$

С учетом выражений (14) и (15) соотношение

$$t_{01} + t_{12} + t_{23} = t_k$$

принимает вид

$$k_\theta (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_0) + k_\theta (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{\text{цк}}) + \frac{\theta_2 - \theta_1}{\dot{\theta}_1} = t_k. \quad (18)$$

Путем математических преобразований уравнений (14), (15) и (18) можно получить обычное квадратное уравнение:

$$a\dot{\theta}_1^2 + b\dot{\theta}_1 + c = 0,$$

где

$$a = k_\theta,$$

$$b = -t_k - k_\theta \dot{\theta}_0 - k_\theta \dot{\theta}_{\text{цк}},$$

$$c = 0,5k_\theta (\dot{\theta}_0^2 + \dot{\theta}_{\text{цк}}^2) + \theta_{\text{цк}} - \theta_0.$$

По известной из математики формуле определяем

$$\dot{\theta}_{1,12} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}, \quad (19)$$

где

$$D = b^2 - 4ac. \quad (20)$$

Способ выбора правильной угловой скорости $\dot{\theta}_1$ из двух полученных значений будет рассмотрен ниже. По известному $\dot{\theta}_1$ с помощью формул (16) и (17) определяем t_{01} и t_{23} . Время движения по инерции определяем по формуле

$$t_{12} = t_k - t_{01} - t_{23}. \quad (21)$$

Расчетные соотношения для остальных вариантов могут быть получены аналогично и приведены ниже. Второй вариант разворота показан на рис. 5.

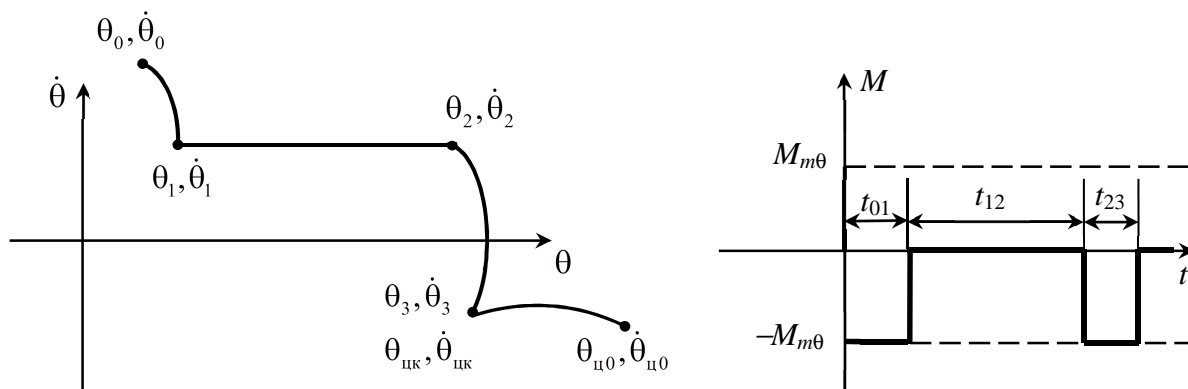


Рис. 5. Второй вариант оптимального по расходу топлива управления

Расчетные соотношения для второго варианта:

$$\dot{\theta}_1 = \frac{0,5k_\theta (\dot{\theta}_0^2 - \dot{\theta}_{\text{цк}}^2) + \theta_0 - \theta_{\text{цк}}}{k_\theta (\dot{\theta}_0 - \dot{\theta}_{\text{цк}}) - t_k}, \quad (22)$$

$$t_{01} = k_\theta (\dot{\theta}_0 - \dot{\theta}_1), \quad t_{23} = k_\theta (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{\text{цк}}).$$

Третий вариант разворота приведен на рис. 6.

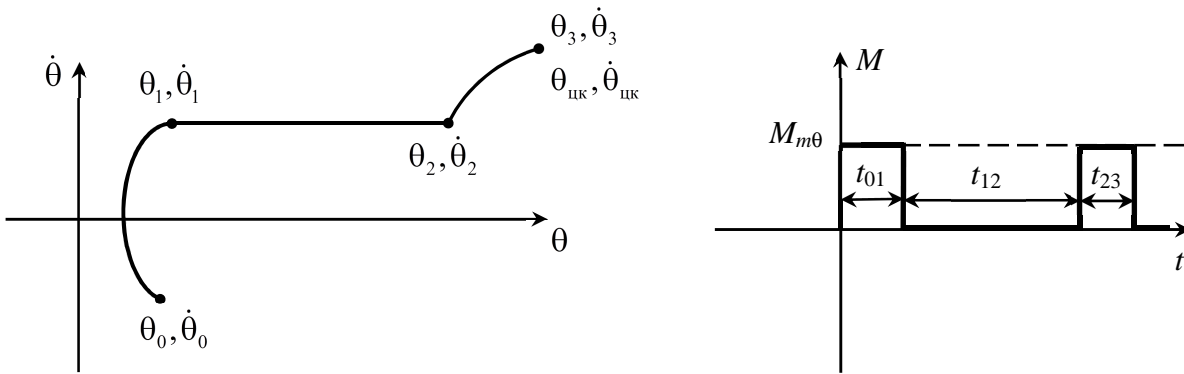


Рис. 6. Третий вариант оптимального по расходу топлива управления

Расчетные соотношения для третьего варианта имеют следующий вид:

$$\dot{\theta}_1 = \frac{0,5k_{\theta}(\dot{\theta}_0^2 - \dot{\theta}_{цк}^2) + \theta_{цк} - \theta_0}{k_{\theta}(\dot{\theta}_0 - \dot{\theta}_{цк}) + t_{к}}, \tag{23}$$

$$t_{01} = k_{\theta}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_0), \quad t_{23} = k_{\theta}(\dot{\theta}_{цк} - \dot{\theta}_1).$$

Четвертый вариант разворота приведен на рис. 7.

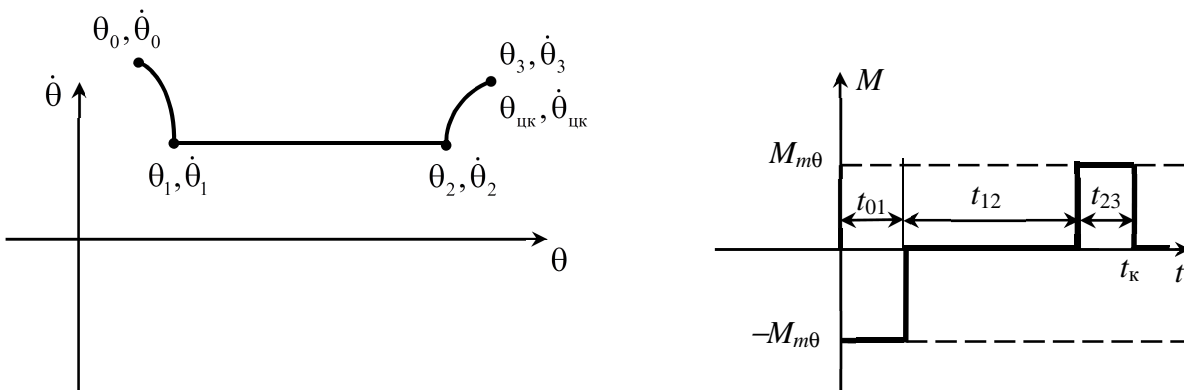


Рис. 7. Четвертый вариант оптимального по расходу топлива управления

Расчет t_{01} и t_{23} для четвертого варианта проводится по формулам (19) и (20) с учетом следующих отличий:

$$a = k_{\theta},$$

$$b = t_{к} - k_{\theta}(\dot{\theta}_0 - \dot{\theta}_{цк}),$$

$$c = k_{\theta}(\dot{\theta}_0^2 + \dot{\theta}_{цк}^2) - \theta_{цк} + \theta_0, \tag{24}$$

$$t_{01} = k_{\theta}(\dot{\theta}_0 - \dot{\theta}_1), \quad t_{23} = k_{\theta}(\dot{\theta}_{цк} - \dot{\theta}_1).$$

Расчет скорости $\dot{\theta}_1$ для всех возможных вариантов дает шесть решений. Анализ вышеприведенных расчетных формул и результаты моделирования показали, что при любых значениях начального положения линии визирования $(\theta_0, \dot{\theta}_0)$ и конечного положения $(\theta_{цк}, \dot{\theta}_{цк})$ только в одном из шести решений все значения t_{01}, t_{12}, t_{23} являются неотрицательными, именно это решение дает верный результат, а также вариант разворота.

Алгоритм расчета оптимальных траекторий для разворота тангаж-крен выглядит следующим образом:

1. С помощью алгоритма, изложенного в работе [4], определяется время оптимального по быстродействию разворота по каждому каналу $(T_{\min\theta}, T_{\min\gamma})$.

2. Определяется $t_k = \max(T_{\min\theta}, T_{\min\gamma})$.

3. Для канала с меньшим временем оптимального по быстродействию разворота по вышеизложенной методике рассчитывается оптимальный по расходу топлива разворот, а именно:

- вычисляются $\theta_{\text{ц}}(t_k), \dot{\theta}_{\text{ц}}(t_k)$;
- определяются шесть решений триады t_{01}, t_{12}, t_{23} ;
- в качестве окончательного решения выбирается триада, для которой все значения неотрицательны.

ПРИМЕР ДВУХКАНАЛЬНОГО РАЗВОРОТА ПО УГЛАМ ТАНГАЖА И КРЕНА

Рассмотрим двухканальный разворот по углам тангажа и крена. Начальное состояние КА: угол наклона по тангажу – $13,134^\circ$, по крену – $-3,715^\circ$, угловая скорость по тангажу – $-1,293^\circ/\text{с}$, по крену – $-0,006^\circ/\text{с}$, высота орбиты – $h = 300$ км, линейная скорость движения по орбите – $V = 7,3$ км/с, максимально возможное угловое ускорение – $2^\circ/\text{с}^2$. Параметры текущей и следующей цели: $l_0 = 70$ км, $l_1 = 20$ км, $l_2 = 15$ км, $l = 200$ км.

Итерационным методом, изложенным в [1], находим траектории оптимальных по быстродействию разворотов. Для канала тангажа: $t_{01} = 3,449$ с, $t_{12} = 3,551$ с, $t_{23} = 3,307$ с, соответственно, $t_k = 10,307$ с. Для канала крена: $t_{01} = 2,101$ с, $t_{12} = 1,111$ с, $t_{23} = 2,107$ с, соответственно, $t_k = 5,119$ с. Поскольку разворот по крену осуществляется быстрее, с использованием вышеприведенного алгоритма находим траекторию оптимального по расходу топлива разворота по каналу крена для $t_k = 10,307$ с: $t_{01} = 0,669$ с, $t_{12} = 8,963$ с, $t_{23} = 0,674$ с, вариант разворота – первый, приведенный на рис. 4. Фазовые траектории и процессы во временной области для канала тангажа приведены на рис. 8 и 9, для канала крена эти кривые носят идентичный характер.

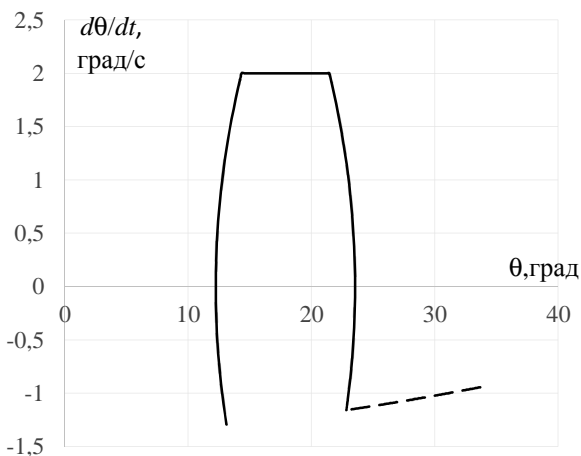


Рис. 8. Фазовые траектории для канала тангажа

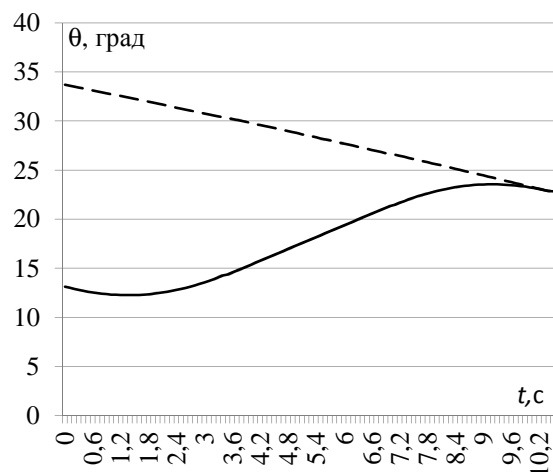


Рис. 9. Временные характеристики для канала тангажа

На рис. 8 и 9 сплошной линией показано движение линии визирования, штриховой – движение линии направления на цель.

При расчете оптимальных траекторий для разворота рыскание-тангаж было определено, что оптимальный по быстродействию разворот по каналу рыскания достигается при $t_{01} = 0,961$ с, $t_{12} = 10,923$ с, $t_{23} = 0,437$ с, соответственно, $t_k = 12,332$ с, а по каналу тангажа – $t_{01} = 3,382$ с, $t_{12} = 3,425$ с, $t_{23} = 3,298$ с, соответственно, $t_k = 10,105$ с. Оптимальный по расходу топлива разворот по каналу тангажа достигается при $t_{01} = 2,855$ с, $t_{12} = 6,721$ с, $t_{23} = 2,745$ с.

Сравнение двух типов разворотов для рассмотренного примера позволяет сделать вывод, что разворот типа тангаж-крен дает преимущество по быстродействию 19,6%, однако для разворота типа рыскание-тангаж расход топлива на 16,8% меньше. Естественно, при других начальных условиях эти соотношения будут другие, поэтому в зависимости от конкретных условий и приоритетов по быстродействию и расходу топлива могут выбираться тот или иной тип разворота. Вместе с тем моделирование показало, что разворот типа тангаж-крен следует считать основным, поскольку угол и скорость направления на цель по углу рыскания меняется в широких пределах, а скорость может превышать максимально допустимую. Особенно это проявляется при малых расстояниях между текущей и последующей целью, а также при их расположении по разные стороны от трассы полета.

Рассмотренные в статье алгоритмы формирования оптимальных траекторий получены для случая автономных разворотов КА по одному из каналов. Известно, что при одновременных разворотах возникают гироскопические связи между каналами, поэтому было проведено моделирование для учета их влияния. Моделирование проводилось численными методами с использованием известных [4] систем дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} J_x \dot{p} + (J_z - J_y) qr &= M_x, \\ J_y \dot{q} &= M_y, \\ J_z \dot{r} + (J_y - J_x) pq &= M_z. \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= p - q \operatorname{tg} \theta \cos \gamma + r \operatorname{tg} \theta \sin \gamma, \\ \dot{\theta} &= q \sin \gamma + r \cos \gamma, \\ \dot{\psi} &= q \frac{\cos \gamma}{\cos \theta} - r \frac{\sin \gamma}{\cos \theta}. \end{aligned} \quad (26)$$

Соответствующая система координат и привязка к связанным осям КА приведены на рис. 10.

Моделирование при различных начальных условиях для КА с вышеприведенными параметрами показало, что из-за влияния гироскопических моментов отклонения по углам не превышают $0,4^\circ$, а по угловым скоростям – $0,1$ град/с. В частности, для вышеприведенного примера отклонения по углам составили $0,15^\circ$ по каналу тангажа и $0,36^\circ$ по каналу крена, отклонения по угловым скоростям – $0,03$ град/с и $0,063$ град/с соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы позволяют решить задачу определения траектории оптимального по быстродействию пространственного разворота КА ДЗЗ по двум углам, обеспечивающую в конечной точке равенство углов и угловых скоростей линии визирования аппаратуры наблюдения и линии направления на цель, а также минимизировать расход топлива по одному из углов.

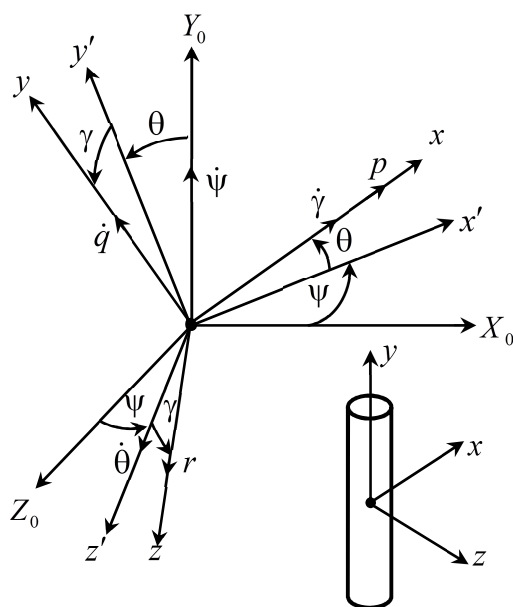


Рис. 10. Система координат

Перенацеливание может осуществляться путем разворота по тангажу и крену, либо по рысканию и тангажу. В зависимости от начальных условий эти способы отличаются по быстродействию и расходу топлива, что позволяет в каждом конкретном случае выбрать лучший способ. Для работы алгоритмов требуется выполнение элементарных математических и логических операций, поэтому необходимые расчеты просто реализовать стандартными бортовыми вычислительными устройствами.

Алгоритмы разработаны для случаев одновременного разворота по двум углам, однако их можно модифицировать и для расчета оптимальных траекторий разворота одновременно по трем углам. Результат расчетов позволяет сформировать управление по разомкнутой схеме. Особый интерес представляет разработка алгоритма и устройства для управления по замкнутой схеме, обеспечивающих разворот КА в условиях действия возмущений, влияния перекрестных связей при одновременном развороте по двум и трем углам, а также отклонения фактических параметров КА от их расчетных значений. Однако это предмет отдельного исследования и выходит за рамки настоящей статьи. Результаты расчетов с помощью предложенных алгоритмов могут быть использованы для расчета оптимального плана наблюдения за несколькими объектами в процессе полета КА.

Список используемых источников

1. Управление космическими аппаратами зондирования Земли / Д.И. Козлов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1998. – 366 с.
2. Управление угловым движением КА ДЗЗ / Г.П. Аншаков [и др.]// Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2006. – № 6. – С.12–18.
3. Власов В.А., Горбулин В.И., Зозуля Л.П. Расчет оптимального по быстродействию перенацеливания оптико-электронной аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. – 2009. – № 1. – С. 71–81.
4. Крыжановский В.И., Горбулин В.И., Трофимов И.А. Алгоритм оптимального по быстродействию перенацеливания космического аппарата при наблюдении объектов различного типа // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 237–249.

Н.А. Куприянов*,

кандидат техн. наук;

В.В. Подъячев*,

кандидат техн. наук;

Ю.А. Шишов**,

доктор техн. наук, профессор

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

**Санкт-Петербургский институт войск национальной гвардии Российской Федерации, г. Санкт-Петербург

МЕТОДИКА НЕЗАВИСИМОЙ КАЛИБРОВКИ КАНАЛОВ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

В статье изучены подходы к калибровке активных фазированных антенных решеток и показаны их недостатки, снижающие качество калибровки и ограничивающие проведение калибровки отдельно на передающих антенных решетках. По результатам проведенного анализа авторами предложена методика независимой калибровки каналов приемно-передающих модулей активной фазированной антенной решетки, основанная на использовании параметров контрольного сигнала, проходящего через опорный приемно-передающий модуль, размещенный в центре антенной решетки. Описаны основные операции, предусмотренные при выполнении методики. Проведен сравнительный анализ предложенной методики и исследованных подходов.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, калибровка, приемно-передающий модуль, разность фаз, отношения амплитуд, контрольный сигнал.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активные фазированные антенные решетки (АФАР) используются при создании разнообразных радиотехнических систем, применяемых для решения задач радиолокации, радионавигации, дистанционного зондирования, телевидения и связи. Независимо от предназначения радиотехнической системы входящая в ее состав АФАР представляет собой совокупность приемно-передающих модулей (ППМ), состоящих из устройств генерирования, формирования, приема и обработки сигнала [1]. Опыт эксплуатации показал, что параметры данных устройств различаются вследствие длительности и условий эксплуатации. В результате амплитудно-фазовое распределение АФАР деформируется, происходит снижение величины коэффициента направленного действия антенны и увеличение уровня боковых лепестков ее диаграммы направленности. Это ведет к снижению тактико-технических характеристик как самой АФАР, так и радиотехнической системы в целом. Например, в радиолокационных системах наблюдается рост ошибок измерений местоположения целей [2].

На практике для устранения последствий данного негативного явления проводится калибровка антенны [3]. Исследование предметной области показало, что применяемые в настоящее время подходы к калибровке АФАР имеют ряд недостатков, которые кратко рассмотрены ниже.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К КАЛИБРОВКЕ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК И ИХ НЕДОСТАТКОВ

В [4] предложен способ встроенного контроля характеристик АФАР, основанный на последовательной коммутации фазовращателей и приеме излучаемого сигнала вспомогательной антенной. Основным недостатком данного способа является необходимость использования вспомогательной антенны, находящейся в дальней зоне контролируемой

АФАР, что сложно реализуемо при установке АФАР на подвижных носителях, а также при калибровке крупноапертурных АФАР [5]. Этот недостаток характерен также для способа встроенного контроля характеристик АФАР, предложенного в [6] и предполагающего последовательную коммутацию фазовращателей и прием излучаемого вспомогательной антенной сигнала.

В [7] описывается способ калибровки АФАР со следующей последовательностью действий для калибровки передающего канала каждого ППМ:

- поочередная подача КС на вход передающего канала каждого отдельного ППМ;
- измерение сигнала, передаваемого каждым передающим каналом;
- формирование корректирующих коэффициентов для передающего канала каждого ППМ на основе результатов измерений;
- использование корректирующих коэффициентов для регулировки амплитуды A^{tm} и фазы φ^{tm} передаваемых сигналов.

Для калибровки приемного канала каждого ППМ предлагаются следующие операции:

- поочередная подача контрольного сигнала (КС) на вход приемного канала каждого ППМ;
- измерение сигнала на выходе приемного канала каждого ППМ;
- формирование корректирующих коэффициентов на основе результатов измерений;
- регулировка амплитуды A^{rcv} и фазы сигналов φ^{rcv} на выходах соответствующих приемных каналов ППМ.

Основным недостатком данного способа калибровки АФАР является необходимость использования сложной высокоточной измерительной аппаратуры, поскольку в процессе калибровки необходимо измерять абсолютные значения A^{tm} , A^{rcv} и φ^{tm} , φ^{rcv} на выходах калибруемых каналов ППМ, что в конечном счете снижает точность калибровки АФАР. Этого недостатка отчасти лишен способ, рассмотренный в [8]. Авторами предлагается проведение калибровки приемных каналов ППМ парами в режиме приема, а калибровки передающих каналов – парами в режиме передачи. В процессе калибровки проводится измерение разности фаз и амплитуд на выходах приемных и передающих каналов калибруемых ППМ относительно амплитуды и фазы сигнала на выходе соответственно приемного и передающего канала опорного ППМ, в качестве которого для калибровки всех ППМ применяется один и тот же ППМ, например первый. Сначала проводится калибровка приемного канала ППМ, затем – передающего, при этом для калибровки передающего канала используется КС, прошедший через приемный канал ППМ. Предполагается, что поскольку приемный канал уже откалиброван, A^{tm} и φ^{tm} на выходе передающего канала будет определяться только его параметрами. Однако КС при калибровке передающего канала калибруемого ППМ проходит через элементы приемного канала, минуя малошумящий усилитель.

Описанный подход имеет ряд недостатков. Первым недостатком является то, что он обеспечивает низкую точность калибровки передающего канала ППМ. Это происходит по причине того, что при его калибровке КС не проходит через малошумящий усилитель, а поступает непосредственно на последовательно соединенные второй аттенюатор и второй фазовращатель. Данные элементы при калибровке приемного канала устанавливаются в положения, компенсирующие отличия модуля и аргумента комплексного коэффициента усиления малошумящего усилителя калибруемого ППМ от соответствующих значений комплексного коэффициента усиления малошумящего усилителя опорного ППМ. Предлагаемое авторами устранение этого недостатка путем подачи КС с выхода усилителя мощности на вход малошумящего усилителя даже при затухании в направленном ответвителе в 40–60 дБ практически нереализуемо, так как мощность сигнала на выходе усилителя мощности может составлять десятки и даже сотни ватт, в то время как мощность сигнала на

входе МШУ составляет $10^{-20} \dots 100^{-18}$ Вт [9], что приведет к ограничению КС в малошумящем усилителе и сделает невозможной калибровку передающего канала ППМ.

Вторым недостатком является возможность использования любого ППМ в качестве опорного. Так, в описании авторами опорным принят первый ППМ, что предполагает создание равноамплитудного распределения поля на раскрыве антенны, которое обеспечивает максимальное значение коэффициента направленного действия антенны в режиме передачи и максимальное значение эффективной площади в режиме приема. Однако в этом случае имеет место и максимальное значение уровня боковых лепестков диаграммы направленности, что приводит к снижению скрытности и помехозащищенности радиотехнической системы. Поэтому на практике применяются спадающее к краям апертуры амплитудное распределение, что обеспечивает минимум боковых лепестков диаграммы направленности при допустимом снижении коэффициента направленного действия либо допустимый уровень боковых лепестков диаграммы направленности при максимальном значении коэффициента направленного действия [10].

Третьим недостатком подхода является то, что область его применения ограничена только возможностью использования в приемно-передающих АФАР, что характерно в основном для систем радиолокации и радиосвязи, так как калибровка передающих и приемных каналов ППМ осуществляется совместно. В то же время широко применяются радиотехнические системы с АФАР, функционирующие либо только в режиме излучения (например, системы навигации или радиоэлектронного подавления), либо только в режиме приема (например, системы дистанционного зондирования). Также данный подход не учитывает, что в некоторых радиотехнических системах функции излучения и приема могут быть разделены между соответствующими пространственно разнесенными ФАР.

Таким образом, актуальной научно-практической задачей является разработка подхода к калибровке АФАР, лишённого обозначенных выше недостатков и позволяющего решить такие задачи, как:

- повышение точности калибровки передающего канала ППМ АФАР;
- обеспечение необходимого закона амплитудного распределения поля на апертуре АФАР для достижения оптимального соотношения между коэффициентом направленного действия антенны и уровнем боковых лепестков диаграммы направленности;
- применение для калибровки передающих и приемных АФАР.

Для решения данной задачи авторами статьи проведен ряд исследований, позволивших получить патент на изобретение «Способ и устройство для калибровки приемно-передающей фазированной антенной решеткой» [12]. Продолжение исследований данного актуального вопроса предопределило разработку методики независимой калибровки каналов ППМ АФАР, которая рассмотрена далее.

МЕТОДИКА НЕЗАВИСИМОЙ КАЛИБРОВКИ КАНАЛОВ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Методика предусматривает проведение следующих основных операций:

- 1) выбор ППМ, расположенного в центре АФАР, в качестве опорного;
- 2) прохождение КС через опорный ППМ. Результатом операции являются значения сдвига по фазе φ_c^{tm} , φ_c^{rcv} и амплитуды A_c^{rcv} , A_c^{tm} в передающих и приемных каналах соответственно;
- 3) проведение калибровки приемных каналов i -го ППМ парами в режиме приема со снятием КС с выходов приемных каналов ППМ. Результатом операции являются значения сдвига по фазе φ_i^{rcv} и амплитуды A_i^{rcv} приемного канала i -го ППМ;

4) проведение калибровки передающих каналов i -го ППМ парами в режиме передачи со снятием КС с выходов передающих каналов ППМ. Результатом операции являются значения сдвига по фазе φ_i^{tm} и амплитуды A_i^{tm} передающего канала i -го ППМ;

5) измерение сдвига по фазе и сравнение амплитуды сигналов с выходов калибруемых ППМ относительно амплитуды и фазы сигнала на выходе опорного ППМ. Результатом операции являются значения разности фаз между сигналами на выходах приемных и передающих каналов i -го ППМ $\Delta\varphi_i^{rcv}$, $\Delta\varphi_i^{tm}$ и отношения амплитуд ΔA_c^{rcv} , ΔA_c^{tm} , рассчитываемые по выражениям:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_i^{rcv} &= \varphi_i^{rcv} - \varphi_c^{rcv}, \\ \Delta A_c^{rcv} &= 20\lg\left(\frac{A_i^{rcv}}{A_c^{rcv}}\delta A_i^{rcv}\right), \\ \Delta\varphi_i^{tm} &= \varphi_i^{tm} - \varphi_c^{tm}, \\ \Delta A_c^{tm} &= 20\lg\left(\frac{A_i^{tm}}{A_c^{tm}}\delta A_i^{tm}\right),\end{aligned}\tag{1}$$

где δA_i^{rcv} – коэффициент амплитудного распределения поля на апертуре АФАР в режиме передачи;

δA_i^{tm} – коэффициент амплитудного распределения поля на апертуре АФАР в режиме приема;

6) формирование корректирующих сигналов;

7) использование корректирующих сигналов для регулировки параметров соответственно приемных и передающих каналов калибруемых ППМ АФАР. На практике это может быть реализовано, например, путем изменения параметров фазовращателей и аттенуаторов ППМ.

Основным достоинством предлагаемой методики является то, что калибровка приемных и передающих каналов ППМ АФАР осуществляется отдельно. Таким образом, при калибровке приемного канала КС проходит только через элементы приемного канала соответствующего калибруемого ППМ, а при калибровке передающего канала КС проходит только через элементы передающего канала соответствующего калибруемого ППМ АФАР. При этом исключается влияние параметров приемного канала на результаты калибровки передающего канала калибруемого ППМ, что приводит к повышению точности калибровки передающих каналов калибруемых ППМ по сравнению со способами калибровки, предложенными иными авторами.

Проведенный сравнительный анализ предложенной методики и описанных выше подходов показал следующее.

1. Ранее предлагалось проводить калибровку передающего канала каждого ППМ АФАР с условием прохождения КС через элементы приемного канала, минуя малошумящий усилитель, при этом элементы регулировки комплексного коэффициента передачи приемного канала вносили погрешность в результаты калибровки передающего канала, что неизбежно вело к снижению точности калибровки передающих каналов калибруемых ППМ АФАР. Предложенная методика предполагает калибровку приемных и передающих каналов ППМ независимо друг от друга. Таким образом, при калибровке приемного канала КС проходит только через элементы соответствующего приемного канала, а при калибровке передающего канала КС проходит только через элементы передающего канала, что исключает влияние элементов регулировки приемного канала на регулировку параметров передающего канала. Кроме того, независимая калибровка передающих и приемных каналов ППМ АФАР позволяет применить предложенную методику не только для калибровки приемно-передающих АФАР, но и для калибровки как передающих, так и приемных АФАР.

2. Предлагаемая другими авторами возможность выбора любого ППМ в качестве опорного требовала обеспечения одинаковых значений комплексных коэффициентов передачи передающих и приемных каналов всех ППМ. Это решение в идеальных условиях позволило бы сформировать равномерное амплитудно-фазовое распределение поля на апертуре антенны как в режиме передачи, так и в режиме приема. В результате коэффициент использования площади апертуры антенны становится равным единице, что обеспечивает максимальное значение эффективной площади антенны, важное при работе антенны в режиме приема. Также достигает максимального значения коэффициент направленного действия, важный при работе антенны в режиме передачи. Однако при этом максимального значения достигает уровень боковых лепестков диаграммы направленности. Так, уровень первого бокового лепестка составляет $-3,3$ дБ. Поэтому для снижения уровня боковых лепестков диаграммы направленности применяют спадающее по определенному закону симметричное относительно центра апертуры амплитудное распределение поля. В [10] приведены законы амплитудного распределения поля на апертуре антенны, обеспечивающие различные соотношения между уровнем боковых лепестков и коэффициентом использования площади апертуры антенны. В предложенной методике использование центрального ППМ в качестве опорного позволяет задать любой симметричный закон амплитудного распределения поля на апертуре и обеспечить оптимальное, для конкретной сигнальной и помеховой радиоэлектронной обстановки [11], соотношение между коэффициентом направленного действия антенны и уровнем боковых лепестков диаграммы направленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный авторами статьи анализ различных подходов к калибровке АФАР показал, что их применение не позволяет обеспечить необходимого закона амплитудного распределения поля на апертуре АФАР для достижения оптимального соотношения между коэффициентом направленного действия антенны и уровнем боковых лепестков диаграммы направленности. Кроме того, рассмотренные подходы не позволяют повысить точность калибровки передающего канала ППМ, а область их применения ограничена только приемно-передающими АФАР.

Предложенная в публикации методика независимой калибровки каналов ППМ АФАР лишена данных недостатков и позволяет использовать параметры КС с выходов опорного ППМ, находящегося в центре АФАР, для повышения точности калибровки как приемного, так и передающего каналов калибруемого ППМ. Это позволит установить симметричный относительно центра апертуры АФАР закон амплитудного распределения поля на апертуре для обеспечения требуемого соотношения между коэффициентом направленного действия и уровнем боковых лепестков диаграммы направленности, что благоприятно скажется на тактико-технических характеристиках радиотехнической системы. При этом практическая реализация методики предполагает только доработку функционального программного обеспечения радиотехнической системы, что может быть осуществлено во время проведения технического обслуживания.

Список используемых источников

1. *Паршуткин А.В.* Радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 211 с.
2. *Никифоров С.В.* Актуальные направления научных исследований по повышению эффективности оценки параметров движения целей в радиолокационных системах дальнего

обнаружения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – №2 (643). С. 63–68.

3. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справочник / Я.Д. Ширман [и др.]. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

4. Коммутационный способ измерения характеристик фазированных антенных решеток / Г.Г. Бубнов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 120 с.

5. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения: разработка, испытания, функционирование: монография / А.Ф. Автушенко [и др.]. – М., 2013. – 168 с.

6. Способ встроенного контроля характеристик фазированной антенной решетки: патент РФ №2169376, G01R 29/10 / А.М. Голик, Д.Н. Заговенков, Ю.А. Клейменов, В.А. Кондрашин, Ф.И. Рябокобыла. – №99126339/09; заявл. 16.12.1999, опубл. 20.06.2001.

7. Способ калибровки антенной решетки: патент РФ №2147753, G01S 7/40 / Б.Г. Йоханиссон, У. Фарссен. – №97100131/09; заявл. 01.06.1995, опубл. 20.04.2000.

8. Способ калибровки активной фазированной антенной решетки: патент РФ №2467346, G01S 7/40 / В.В. Задорожный, А.Ю. Ларин. – №2011127436/08; заявл. 04.07.2011, опубл. 20.11.2012.

9. *Ворошилов В.А., Шишов Ю.А., Ясенков Т.В.* Особенности калибровки приемных антенных решеток РЛС дальнего обнаружения // Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – Т. 2. – С. 127–135.

10. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.Н. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1994. – 592 с.

11. *Григорьев Л.Н.* Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках: монография. – М., 2010. – 141 с.

12. Способ и устройство для калибровки приемно-передающей фазированной антенной решетки: патент RU №2647514, H01Q 21/00, G01S 7/40 / М.Г. Вахлов, Д.В. Губанов, И.С. Луцько, В.В. Подольцев, В.В. Подъячев, Ю.А. Шишов. – №2016117568; заявл. 04.05.2016, опубл. 16.03.2018.

Н.Б. Литвинова,
доктор педагогических наук;
Ю.Е. Тупицин,
кандидат техн. наук;
Е.В. Шишкин,
кандидат техн. наук, доцент

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОДОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГИБКИХ СТРАТЕГИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Представлена математическая модель и алгоритм планирования технической эксплуатации технических систем специальных объектов при условии использования гибких стратегий. С учетом отличий и особенностей технических систем по сравнению с технологическим оборудованием специальных объектов разработана математическая модель годового планирования. В качестве критерия оптимизации приняты комплексные показатели надежности элементов. В качестве ограничений приняты заданные сроки и продолжительность проведения профилактических работ.

При планировании технической эксплуатации определяются не только объемы профилактических работ, но и интенсивность использования резервируемых элементов при использовании по назначению. Для решения оптимизационной задачи разработан алгоритм на основе метода случайного поиска.

Ключевые слова: математическая модель, техническое обслуживание, гибкие стратегии, комплексные показатели надежности, интенсивность использования по назначению, алгоритм оптимизации.

ВВЕДЕНИЕ

Технические системы (ТС) сооружений специальных объектов, предназначенные для формирования и поддержания параметров микроклимата в помещениях, играют важную роль в обеспечении выполнения целевых задач вооружением, военной техникой и технологическими системами объектов [1].

Важное значение в обеспечении требуемых показателей повышения надежности имеет система технической эксплуатации [2, 3]. Многочисленные исследования и практический опыт показывают эффективность применения гибких стратегий эксплуатации [4]. Стратегии эксплуатации по фактическому техническому состоянию предусматривают изменение как сроков проведения, так и объемов проводимых профилактических работ, что вызывает необходимость разработки математических моделей и алгоритмов планирования технической эксплуатации [5].

Сроки проведения профилактических работ назначаются на основании результатов контроля параметров, характеризующих техническое состояние элементов либо по статистическим данным об отказах и повреждениях за период эксплуатации идентичных элементов.

Обеспечивать все элементы ТС датчиками, контролирующими значения определяющих параметров экономически нецелесообразно, поэтому при разработке математической модели предусматривается, что группа элементов эксплуатируется по стратегии с контролем параметров, элементы, не оснащенные датчиками контроля параметров, – по статистическим данным.

Для каждого из элементов рассчитываются сроки проведения профилактических работ, при которых достигаются максимальные значения показателей надежности.

В качестве таких показателей в модели используются комплексные показатели: коэффициент готовности и коэффициент оперативной готовности.

ТС специальных объектов имеют ряд специфических особенностей по сравнению с технологическими системами:

1. ТС выполняют обеспечивающие функции и являются системами нижнего иерархического уровня по сравнению с технологическими системами. Сроки и продолжительность проведения технического обслуживания (ТО) ТС директивно задаются с учетом решения целевых задач технологическими системами.

2. ТС преимущественно состоят из механического оборудования, которое, как известно, расходует ресурс в период функционирования.

3. ТС характеризуются наличием структурного ненагруженного резервирования элементов.

Перечисленные особенности, во-первых, должны быть учтены в математической модели планирования, во-вторых, при долгосрочном планировании технической эксплуатации, помимо определения оптимальных сроков и объемов выполнения профилактических работ, появляется возможность предусматривать интенсивность использования по назначению резервированных элементов с целью проведения технического обслуживания при таком значении текущей наработки, когда обеспечивается достижение максимального значения показателей надежности элемента ТС.

Следует отметить, что работы по техническому обслуживанию оказывают различное влияние на восстановление ресурса элемента ТС: отдельные виды профилактических работ восстанавливают ресурс элемента посредством замены изношенных деталей, другие виды работ носят обеспечивающий характер и связаны с заменой смазочных материалов, восстановлением лакокрасочных покрытий и т. п. Периодичность проведения обеспечивающих работ жестко регламентирована эксплуатационной документацией. Поэтому для формального описания процессов технического обслуживания все предусмотренные профилактические работы по критерию восстановления ресурса элементов ТС разделены на две группы.

Разработанный план технической эксплуатации должен обеспечивать выполнение профилактических работ элементов в сроки, при которых обеспечиваются максимально возможные показатели надежности каждого элемента и ТС в целом.

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Учитывая отмеченные во введении особенности и отличия ТС от технологического оборудования, задачу готового планирования технической эксплуатации на вербальном уровне можно сформулировать следующим образом: необходимо составить план, включающий в себя перечень работ по ТО элементов ТС в каждом из месяцев на интервале планирования и интенсивность использования резервированных элементов по назначению при заданных сроках и продолжительности проведения ТО, требуемой суммарной продолжительности работы элементов в каждом из планируемых месяцев, заданной периодичности проведения работ по ТО 2-й группы, при котором суммарные потери показателей готовности элементов были бы минимальны.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ГОДОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Введем следующие обозначения:

Z_{ik} – требуемая суммарная наработка элементов i -го участка структурной схемы надежности (СН) системы в k -м месяце планирования (ч);

$C_i^{(1)}$ – трудоемкость работ по ТО 1-й группы элементов i -го участка структурной схемы надежности (СН) системы (чел.- ч);

$C_i^{(2)}$ – трудоемкость работ по ТО 2-й группы элементов i -го участка ССН системы (чел.-ч);

τ_{ij0} – текущая суммарная наработка j -го элемента i -го участка ССН системы к началу планирования, отсчитываемая от момента проведения работ по ТО 1-й группы (ч);

U – количество обслуживающего персонала (чел.);

t_{3k} – продолжительность ТО технологических (основных) систем в k -м месте (ч);

$t_i^{(2)}$ – периодичность проведения работ по ТО 2-й группы элементов i -го участка ССН системы (ч);

a_{ij} – переменная, принимающая значение номера месяца, в котором планируется проведение работ по ТО 1-й группы j -го элемента i -го участка ССН ТС;

$x_{ijk}^{(1)}$ – переменная, принимающая значение 1, если в k -м месяце проводятся работы по ТО 1-й группы j -го элемента i -го участка ССН системы, либо 0 в противном случае;

$x_{ijk}^{(2)}$ – переменная, принимающая значение 1, если в k -м месяце проводятся работы по ТО 2-й группы j -го элемента i -го участка ССН системы, либо 0 в противном случае;

d_{ijk} – переменная, принимающая значение от 0 до 1 и характеризующая интенсивность использования j -го элемента i -го резервированного участка ССН в k -м месяце планирования.

С учетом введенных обозначений для каждого из элементов системы значение планируемой суммарной наработки в любом k -м месяце можно представить в виде выражения

$$\tau_{ijk} = \tau_{ij0} + \sum_{r=1}^k Z_r d_{ijr}. \tag{1}$$

Тогда целевую функцию можно записать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{I_1} \sum_{j=1}^{(n+m)_1} (K_{orij}^0 - K_{orij}(\tau_{ij} + \sum_{k=1}^{a_{ij}} Z_{ik} d_{ijk})) + \sum_{i=1}^{I_2} \sum_{j=1}^{(n+m)_i} (K_{rij}^0 - K_{rij}(\tau_{ij} + \sum_{k=1}^{a_{ij}} Z_{ik} d_{ijk})) \rightarrow \min. \tag{2}$$

Ограничения по продолжительности выполнения ТО и требуемое время для использования по назначению каждого элемента ТС можно представить следующим образом:

$$\frac{1}{U} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{(n+m)_i} (C_i^{(1)} X_{ijk}^{(1)} + C_i^{(2)} X_{ijk}^{(2)} + C_i^{(3)}) \leq t_{3k}, \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{(n+m)_i} d_{ijk} = n_i, \tag{4}$$

$$\frac{\tau_{ijk} + Z_{ik+1} \cdot d_{ijk+1}}{t_i^{(2)} (\sum_{r=1}^{a_{ij}} X_{ijr}^{(2)} + 1)} \leq 1 \text{ при } k \leq a_{ij}, \tag{5}$$

$$\frac{\tau_{ijk} + Z_{ik+1} \cdot d_{ijk+1}}{t_1^{(2)} (\sum_{r=a_{ij}}^L X_{ijr}^{(2)} + 1)} \leq 1 \text{ при } k > a_{ij}. \tag{6}$$

Области допустимых значений оптимизируемых переменных представим в виде следующих выражений:

$$0 \leq d_{ijk} \leq 1, \tag{7}$$

$$a_{ij} = 0, 1 \dots L, \tag{8}$$

$$X_{ijk}^{(1)} = \begin{cases} 1, \text{ если работы по ТО 1 – й группы проводятся,} \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \tag{9}$$

$$X_{ijk}^{(2)} = \begin{cases} 1, \text{ если работы по ТО 2 – й группы проводятся,} \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \tag{10}$$

для всех $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, (n+m)}, k = \overline{0, L}$.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГОДОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Задача оптимального годового планирования технической эксплуатации в формализованном виде (1) – (10) представляет собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией сепарабельного вида, в которой одна часть оптимизируемых переменных имеет дискретный характер, а другая часть – непрерывный характер.

Анализ чувствительности целевой функции к изменению переменных показал, что данная функция является многоэкстремальной в области их допустимых значений, что обуславливает необходимость применения сочетания методов глобальной и локальной оптимизации при разработке алгоритма решения поставленной оптимизационной задачи.

Проведенный анализ методов поиска глобального экстремума при решении задач, в которых оптимизируемые переменные имеют как непрерывный, так и дискретный характер, показал, что в основе многих алгоритмов лежит метод случайного поиска [6, 7].

В основу разработанного алгоритма решения задачи годового планирования технической эксплуатации ТС положен метод случайного поиска на неравномерной сетке. Сущность поиска на неравномерной сетке состоит в чередовании с некоторой частотой пробных точек на всем множестве области поиска с пробными точками в достаточно близкой окрестности «лучших» точек, полученных на предыдущих итерациях.

При решении данной задачи оптимизации организация глобального и локального поиска связывается с масштабом исследования множества целочисленных переменных a_{ij} и действительных d_{ijk} переменных.

Локальный поиск подразумевает наличие некоторой реализации векторов A_i и матриц D_{ij} и генерирование дополнительных матриц D_{ij} в окрестности «лучшей» точки при неизменных значениях компонентов векторов A_i . Это означает, что локальный поиск отождествляется с изменением значений интенсивностей использования по назначению d_{ijk} резервированных элементов системы при фиксированных значениях номеров месяцев a_{ij} , в которые планируется провести работы по ТО 1-й группы.

Программная реализация приведенного подхода к решению задачи оптимального планирования технической эксплуатации показала достаточную для практического применения сходимость результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют:

- осуществлять годовое планирование ТС с учетом их особенностей и ограничений, накладываемых системами более высокого иерархического уровня в составе специальных объектов;
- реализация математической модели и алгоритма оптимального планирования в практике эксплуатации позволит использовать гибкие стратегии обслуживания.

Список используемых источников

1. Росляков Е.М. Специальные технические системы: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. – 330 с.
2. Эксплуатация космических средств: учебник / Г.Д. Петров [и др.]; под ред. А.П. Вышинского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 455 с.
3. Авсюкевич Д.А. Технология применения технических систем РКК по назначению: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 74 с.

4. *Блинов Э.К., Розенберг Г.Ш.* Техническое обслуживание и ремонт судов по состоянию. – СПб.: Судостроение, 1998. – 192 с.
5. *Волков Л.И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М.: Высшая школа, 1987. – 400 с.
6. *Ермаков С.М., Жиглявский А.А.* Математическая теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
7. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. – Л.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
8. *Шалыгин А.С.* Прикладные методы статистического моделирования. – Л.: Машиностроение, 1986. – 320 с.

Е.Б. Самойлов,
кандидат техн. наук;
В.В. Шмелев,
доктор техн. наук

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ВНЕШНЕТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ УЧАСТКА РЕАЛИЗАЦИИ МАНЕВРА GEMS

Рассматривается методика оценивания максимально достижимой дальности полета летательного аппарата (ЛА) по результатам обработки фрагментарных внешнетраекторных измерений участка реализации маневра GEMS (generalized energy management steering) – маневра по обеспечению окончания запаса характеристической скорости к требуемой точке траектории. В качестве объекта наблюдения использована трехступенчатая ракета с твердотопливными двигательными установками без отсечки тяги. Предлагаемая методика базируется на восстановлении параметров активного участка траектории ЛА для случая отсутствия маневра и прогнозировании пассивного участка траектории полезной нагрузки. Она может найти применение при оценивании и контроле летно-технических характеристик объектов в случае отсутствия или низкого качества результатов телеизмерений. Приводится пример применения методики.

Ключевые слова: маневр GEMS, внешнетраекторные измерения, оценивание летно-технических характеристик, летательный аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

Национальные технические средства контроля являются важнейшим источником информации о характеристиках ЛА, доступ к семантическому содержанию телеизмерений которых в полном объеме невозможен [1, 2]. Причинами этого могут быть неисправности бортовой или наземной телеметрической аппаратуры, значительная зашумленность результатов телеизмерений, объективная недоступность сопровождающих обработку телеизмерений исходных данных.

В таких случаях становятся востребованными подходы к приближенному оцениванию основных летно-технических характеристик (в частности, максимально возможной дальности полета) ЛА по результатам обработки фрагментарных внешнетраекторных измерений (ВТИ) с привлечением априорных данных об объекте наблюдения [3, 4]. В данной публикации таким объектом является твердотопливная трехступенчатая ракета без отсечки тяги.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ВНЕШНЕТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Традиционная задача наведения баллистических ракет (как наиболее распространенного вида ЛА) определяется как задача формирования программы управления движением ракеты, в завершении которого будет обеспечено попадание ее полезной нагрузки в точку на поверхности Земли или, другими словами, обеспечено равенство текущих и расчетных значений дальности полета и бокового отклонения [5]. Величины этих отклонений определяются значениями кинематических параметров траектории в точке окончания управления полетом. По результатам сравнения прогноза координат точки падения полезной нагрузки с расчет-

ными координатами точки прицеливания формируется программа управления полетом баллистической ракеты.

При отсутствии отсечки тяги ракетного двигателя для попадания в точку прицеливания программа изменения углов тангажа и рыскания должна быть сформирована следующим образом. К моменту достижения параметров попадающей траектории должно быть обеспечено окончание полного запаса характеристической скорости (запаса топлива) последней ступени. Другими словами, алгоритмы наведения должны строиться с учетом необходимости окончания избытка скорости при пусках на дальности, меньшие максимальной дальности, обеспечиваемой маршевыми ступенями. Данный маневр в зарубежной литературе получил название GEMS.

Траекторию полета ракеты можно условно разделить на два основных участка: участок наведения по гибкой траектории (участок выведения) и участок терминального наведения. Первый участок характеризуется только компенсацией возмущений, возникших на участке полета. Анализ практики испытаний однотипных ЛА показывает незначительную вариацию параметров траектории на данном участке выведения. Второй участок содержит маневр по израсходованию полного запаса характеристической скорости к требуемой точке отделения полезной нагрузки.

Оценивание, систематизация и статистический анализ характеристик маневра позволит определить степень совершенствования ЛА в условиях ограниченности исходных данных. Важнейшим результатом оценивания является возможность расчета некоторых энергетических характеристик ЛА. Таким образом, вербально решаемая в статье задача состоит в необходимости по результатам ВТИ определить характеристики маневра и оценить максимально достижимую дальность полета полезной нагрузки в условиях отсутствия маневра.

Исходные данные:

- объект наблюдения является трехступенчатой баллистической ракетой;
- результаты B обработки ВТИ представлены, как правило, в следующем виде:

$$B = \langle T, v_{X_НГрСК}, v_{Y_НГрСК}, v_{Z_НГрСК}, X_{НГрСК}, Y_{НГрСК}, Z_{НГрСК} \rangle,$$

где T – время измерений;
 $v_{X_НГрСК}, v_{Y_НГрСК}, v_{Z_НГрСК}$ – проекции кажущейся скорости ЛА на оси X, Y и Z неподвижной гринвичской системы координат (НГрСК), зафиксированной в некоторый момент времени;
 $X_{НГрСК}, Y_{НГрСК}, Z_{НГрСК}$ – проекции координат ЛА.

Найти:

- моменты времени начала и окончания маневра;
- характеристику маневра, определяющую компенсируемый запас характеристической скорости ЛА;
- максимально возможную дальность полета полезной нагрузки ЛА в условиях отсутствия маневра;
- массовые характеристики полезной нагрузки ЛА.

Допущения и ограничения:

1. Двигательная установка ЛА работает без отсечки тяги, т. е. она использует весь запас топлива независимо от реализуемой траектории полета.
2. Результаты ВТИ включают момент окончания активного участка траектории полета ЛА.
3. После окончания работы третьей ступени полезная нагрузка осуществляет полет по баллистической траектории только под действием силы притяжения Земли. Влияние атмосферы на характеристики конечного участка полета не учитывается.

ФОРМИРОВАНИЕ КОМАНДНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Для математического описания маневра рассмотрим вспомогательную систему координат, в которой будут проводиться расчеты, – командную систему координат (КСК). Начало КСК – точка начала реализации маневра. Ось $OX_{КСК}$ направлена на точку окончания маневра. Ось $OZ_{КСК}$ перпендикулярна оси $OX_{КСК}$ и проходит в плоскости, перпендикулярной поверхности Земли. Ось $OY_{КСК}$ дополняет систему до правой.

На рис. 1 представлен порядок реализации маневра ЛА.

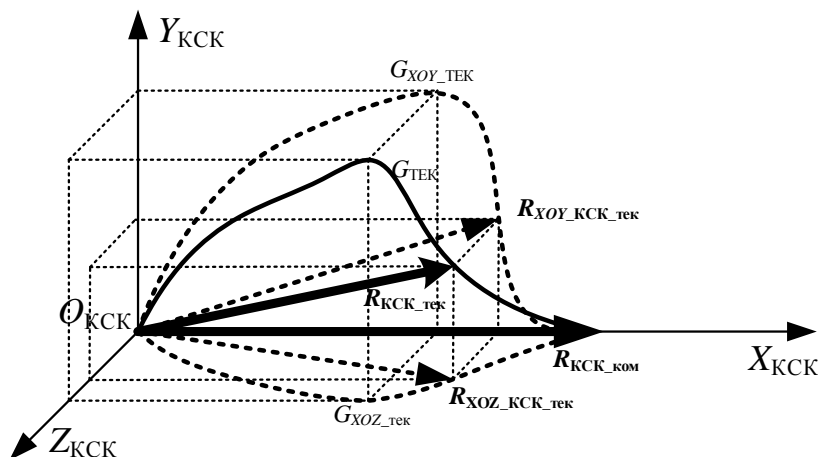


Рис. 1. Векторное разложение реализации маневра GEMS в КСК

На рисунке применены следующие обозначения:

1. Сплошной толстой линией обозначены:

$R_{КСК_тек}$ – текущий вектор перемещения ЛА в КСК, начало вектора находится в начале КСК, окончание – в точке текущего положения ЛА в КСК;

$R_{КСК_ком}$ – командный вектор перемещения ракеты в КСК, начало вектора находится в начале КСК, окончание – в точке положения ЛА в КСК в момент окончания маневра GEMS;

2. Пунктирной линией обозначены:

$R_{XOY_КСК_тек}$ – проекция вектора $R_{КСК_тек}$ на плоскость XOY КСК;

$R_{XOZ_КСК_тек}$ – проекция вектора $R_{КСК_тек}$ на плоскость XOZ КСК;

3. Сплошной тонкой линией обозначен $G_{тек}$ – годограф вектора $R_{КСК_тек}$.

4. Пунктирной тонкой линией обозначены:

$G_{XOY_тек}$ – проекция годографа $G_{тек}$ на плоскость XOY КСК;

$G_{XOZ_тек}$ – проекция годографа $G_{тек}$ на плоскость XOZ КСК.

При полете ЛА на максимальную дальность, т. е. без реализации маневра годограф $G_{тек}$ находился бы на оси $OX_{КСК}$, вектора $R_{КСК_тек}$ и $R_{КСК_ком}$ совпали бы.

Переход между НГрСК и КСК осуществляется в четыре шага [5]: 1) перенос начала системы координат из центра Земли в точку начала реализации маневра GEMS: формирование из НГрСК системы координат $X'Y'Z'$; 2) поворот вокруг оси OY' на угол α : формирование системы координат $X''Y''Z''$; 3) поворот вокруг оси OZ'' на угол β : формирование системы координат $X'''Y'''Z'''$; 4) поворот вокруг оси OZ''' на угол γ : формирование системы координат КСК. Четвертый шаг предназначен для доворота плоскости $X'''O_{КСК}Z'''$ так, чтобы центр Земли находился в данной плоскости.

На рис. 2 представлена этапность реализации перехода между указанными системами координат.

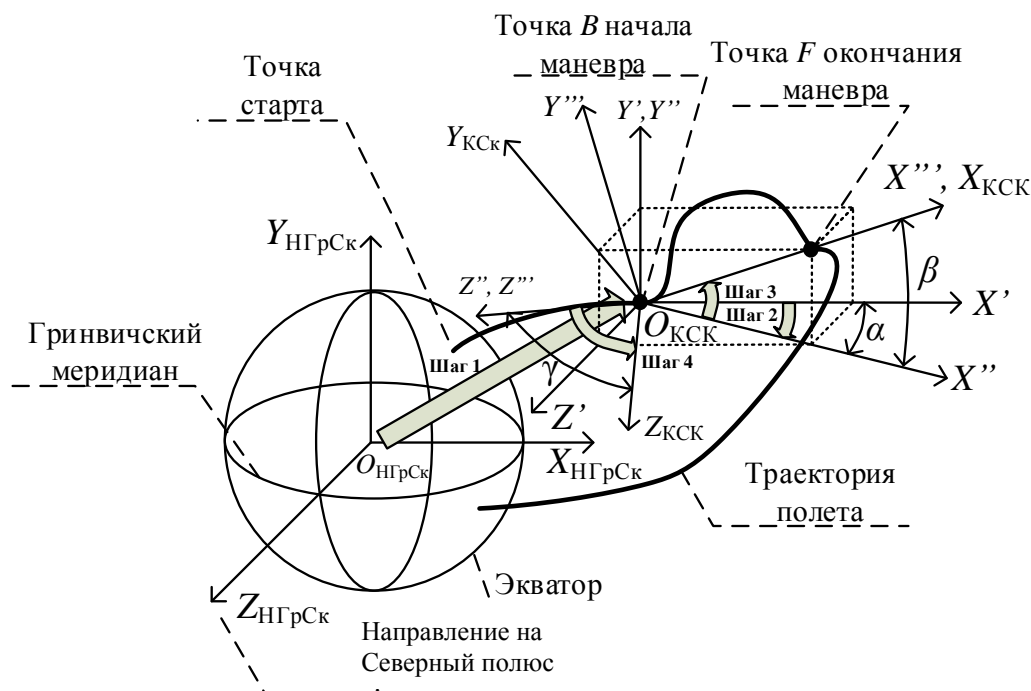


Рис. 2. Порядок перехода из НГрСК в КСК

На рис. 2 ось $O_{НГрСК}X_{НГрСК}$ соединяет центр Земли с точкой пересечения Гринвичского меридиана и экватора, $O_{НГрСК}Y_{НГрСК}$ соединяет центр Земли с точкой пересечения экватора и меридиана 90° восточной долготы, $O_{НГрСК}Z_{НГрСК}$ направлена на Северный полюс.

Аналитические выражения перехода не приводятся для экономии объема статьи.

ПРОЦЕДУРА ОЦЕНИВАНИЯ ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Определение моментов времени начала и окончания маневра. Для идентификации момента начала маневра в случае отсутствия результатов телеизмерений возможно использовать признак существенного (скачкообразного) изменения угловых параметров полета ЛА на интервале работы второй и третьей ступеней [5].

Дифференциальное уравнение, описывающее движение ЛА на активном участке траектории, примет следующий вид [6]:

$$\mathbf{g} = -\frac{k}{R^3} \mathfrak{R} + \mathbf{a}, \tag{1}$$

где \mathbf{g} – вектор силы тяжести в НГрСК, $\mathbf{g} = [g_x, g_y, g_z]^T$;

\mathfrak{R} – радиус-вектор объекта наблюдения в НГрСК, $\mathfrak{R} = [x, y, z]^T$;

k – геоцентрическая гравитационная постоянная, $k = 3,986 \cdot 10^{14} \frac{m^3}{c^2}$;

R – расстояние от центра масс ЛА до гравитационного центра, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$;

\mathbf{a} – вектор ускорения ЛА в НГрСК, обусловленного тягой двигательных установок, $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$.

Из уравнения (1) могут быть найдены составляющие a_x, a_y, a_z , а также сам модуль вектора $|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$. С учетом этого можно записать:

$$\begin{cases} a_x = |a| \cos \alpha_x; \\ a_y = |a| \cos \alpha_y; \\ a_z = |a| \cos \alpha_z. \end{cases} \quad (2)$$

В формуле (2) $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ обозначены углы между направлением на ЛА и соответствующими осями НГрСК.

С помощью признака существенного изменения углов $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ на интервале работы второй ступени оценивается момент времени начала маневра. Момент времени окончания маневра соответствует моменту выключения двигательной установки третьей ступени. Данный момент идентифицируется по характерному спаду модуля ускорения ЛА, полученному из формулы (1).

Расчет величины компенсируемого запаса характеристической скорости. Для этого оцениваются следующие параметры траектории ЛА в КСК:

– рассчитывается длина командного вектора $R_{\text{КСК ком}}$ перемещения ЛА в КСК, начало вектора соответствует началу КСК, окончание – положению центра масс ракеты в КСК в момент окончания маневра GEMS;

– рассчитывается длина годографа $G_{\text{тек}}$ вектора $R_{\text{КСК тек}}$;

– строится проекция годографа $G_{\text{тек}}$ на плоскости $X_{\text{КСК}}OY_{\text{КСК}}$ и $X_{\text{КСК}}OZ_{\text{КСК}}$.

Длина вектора $R_{\text{КСК ком}}$ находится по формуле

$$|R_{\text{КСК ком}}| = x_{\text{GEMS}_f\text{КСК}} = \sqrt{\begin{aligned} & (x_{\text{GEMS}_f\text{НГрСК}} - x_{\text{GEMS}_b\text{НГрСК}})^2 + \\ & + (y_{\text{GEMS}_f\text{НГрСК}} - y_{\text{GEMS}_b\text{НГрСК}})^2 + \\ & + (z_{\text{GEMS}_f\text{НГрСК}} - z_{\text{GEMS}_b\text{НГрСК}})^2. \end{aligned}}$$

Длина $D_{G_{\text{тек}}}$ годографа $G_{\text{тек}}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$D_{G_{\text{тек}}} = \sum_{i=0}^{N-2} \sqrt{\begin{aligned} & (x_{\text{GEMS_КСК } i+1} - x_{\text{GEMS_КСК } i})^2 + \\ & + (y_{\text{GEMS_КСК } i+1} - y_{\text{GEMS_КСК } i})^2 + \\ & + (z_{\text{GEMS_КСК } i+1} - z_{\text{GEMS_КСК } i})^2, \end{aligned}} \quad (3)$$

где $x_{\text{GEMS_КСК } i}, x_{\text{GEMS_КСК } i+1}$ – проекции координат объекта наблюдения на ось $OX_{\text{КСК}}$ в соседние i -й и $(i+1)$ -й моменты времени. Аналогичные обозначения введены для проекций на остальные оси КСК.

Расчет максимально возможной дальности полета полезной нагрузки ЛА при условии отсутствия маневра. С использованием полученного значения $D_{G_{\text{тек}}}$ возможно оценить параметры траектории носителя в условиях отсутствия маневра. То есть может быть рассчитана дальность полета, которую обеспечил бы ЛА при условии отсутствия маневра GEMS. Данное значение является максимальной дальностью полета при движении ЛА только вдоль оси $OX_{\text{КСК}}$.

Оценивание параметров маневра GEMS может быть осуществлено с помощью годографов как вектора скорости в рассматриваемой системе координат КСК, так и радиуса-вектора положения носителя. Для расчета максимально возможной дальности полета полезной нагрузки

ки ЛА при условии отсутствия маневра необходимо рассматривать годограф радиуса-вектора.

При условии реализации маневра к окончанию работы двигательной установки третьей ступени будет осуществлен переход из точки B (рис. 3) начала маневра в точку F окончания маневра, расстояние между точками равно $|\mathbf{R}_{\text{КСК_ком}}|$.

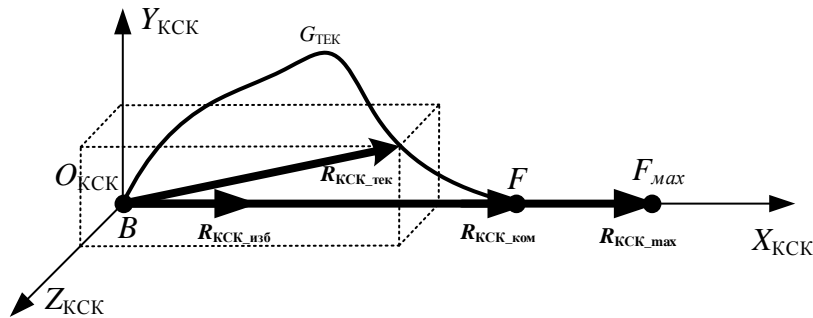


Рис. 3. Формирование командного вектора $\mathbf{R}_{\text{КСК_max}}$

В точке F будет достигнута скорость

$$v_{\text{GEMS_f_КСК}} = \sqrt{v_{X_GEMS_f_КСК}^2 + v_{Y_GEMS_f_КСК}^2 + v_{Z_GEMS_f_КСК}^2}.$$

При отсутствии маневра GEMS указанная величина скорости $v_{\text{GEMS_f_КСК}}$ будет достигнута к точке F_{max} , отстоящей от текущей точки окончания маневра на расстояние $|\mathbf{R}_{\text{КСК_изб}}|$, которое может быть оценено по следующей формуле:

$$|\mathbf{R}_{\text{КСК_изб}}| = D_{\text{Гтек}} - |\mathbf{R}_{\text{КСК_ком}}|.$$

Для расчета максимальной дальности полета необходимо построить командный вектор $\mathbf{R}_{\text{КСК_max}}$ из точки B в направлении точки F длиной $|\mathbf{R}_{\text{КСК_max}}| = |\mathbf{R}_{\text{КСК_изб}}| + |\mathbf{R}_{\text{КСК_ком}}| = D_{\text{Гтек}}$ с окончанием в точке F_{max} .

Максимально достижимая дальность полета для текущей массы полезной нагрузки ЛА, которая является априорно неизвестной величиной, оценивается по расчету баллистической траектории из точки F_{max} . Порядок прогноза представлен, например, в [3]. Эти расчеты будут обоснованными в случае допущения о повторении программы тангажа полета ЛА на интервале от старта до момента начала маневра.

Для определения максимальной дальности полета проводится моделирование баллистической траектории полета ЛА. Условия моделирования представлены на рис. 4.

На рис. 4 представлены два варианта баллистической траектории полета полезной нагрузки: траектория, реализованная из точки F , и траектория максимальной дальности из точки F_{max} .

Достоверность полученных данных будет определяться:

- вариацией массы полезной нагрузки ЛА. Получаемые результаты будут отличаться при изменении полезной нагрузки, тем самым будет снижаться достоверность результатов;
- вариацией программы тангажа до момента начала реализации маневра GEMS. Допущение об неизменности программы до момента начала маневра снижает достоверность результатов.

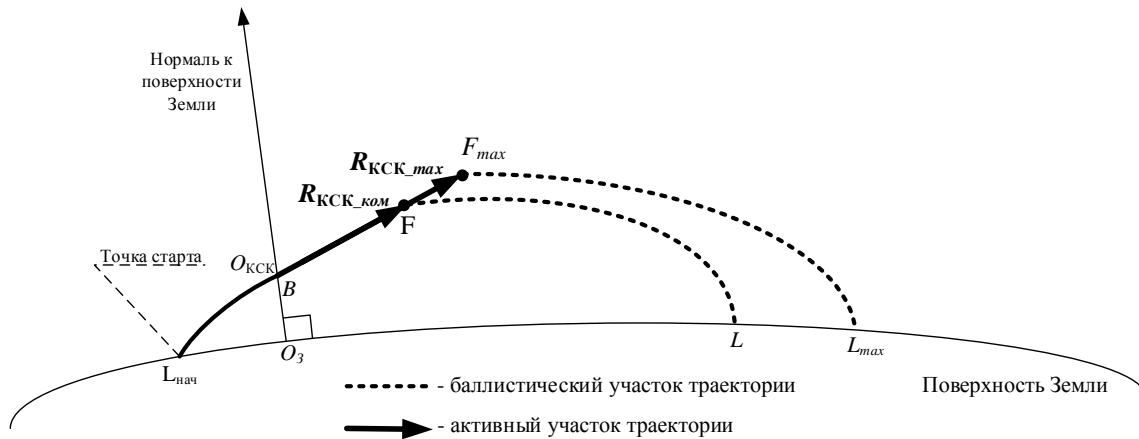


Рис. 4. Схема моделирования полета на максимальную дальность

Оценивание массовых характеристик ЛА. С использованием полученных характеристик маневра GEMS возможно оценить массовые характеристики ЛА, а именно, наиболее важные из них: массы полезной нагрузки ЛА или забрасываемого веса.

Базовым соотношением для оценивания является обратная пропорциональность между массой полезной нагрузки и значением максимальной дальности полета при реализованной программе тангажа. То есть при аналогичной траектории полета ЛА с меньшей массой полезной нагрузки способен обеспечить большее значение максимальной дальности полета.

Разработка аналитического выражения для расчета массы полезной нагрузки как функции значения максимальной дальности является трудно выполнимой задачей. Однако осуществить такую оценку возможно с помощью классификационной процедуры при наличии обучающей выборки. Для формирования процедуры необходимо по обучающей выборке сформировать функцию, значением которой будет являться интервал значений массы полезной нагрузки, а аргументом – соответствующий интервал значений максимальной дальности. Такая обучающая выборка может быть сформирована с использованием результатов обработки и анализа телеметрических измерений.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Представленные в данной части данные позволяют получить общее представление о характеристиках маневра при испытаниях ЛА в северной части Атлантического океана. При формировании КСК реализуются следующие преобразования НГрСК, зафиксированной в момент старта ЛА (см. рис. 2):

1. Сдвиг центра системы координат на 8000 км со следующими значениями по осям НГрСК: по оси $O_{НГрСК}X_{НГрСК}$ – на 1500 км, по оси $O_{НГрСК}Y_{НГрСК}$ – на -5500 км, по оси $O_{НГрСК}Z_{НГрСК}$ – на 3100 км.

2. Поворот на угол $\alpha = 25^\circ$.

3. Поворот на угол $\beta = -40^\circ$.

4. Поворот на угол $\gamma = 50^\circ$.

Правильность перехода к КСК контролируется по обязательной принадлежности точек B и F к оси $O_{КСК}$. Анализ графиков проекции вектора кажущейся скорости носителя на плоскости $X_{КСК}O_{КСК}Y_{КСК}$ и $X_{КСК}O_{КСК}Z_{КСК}$ позволит сделать вывод о реализации маневра в вертикальной или горизонтальной плоскости.

Проведенное имитационное моделирование траектории полета ЛА позволило сформировать (рис. 5) фигуру проекции годографа $G_{\text{тек}}$ на плоскость $Y_{\text{КСК}}O_{\text{КСК}}Z_{\text{КСК}}$.

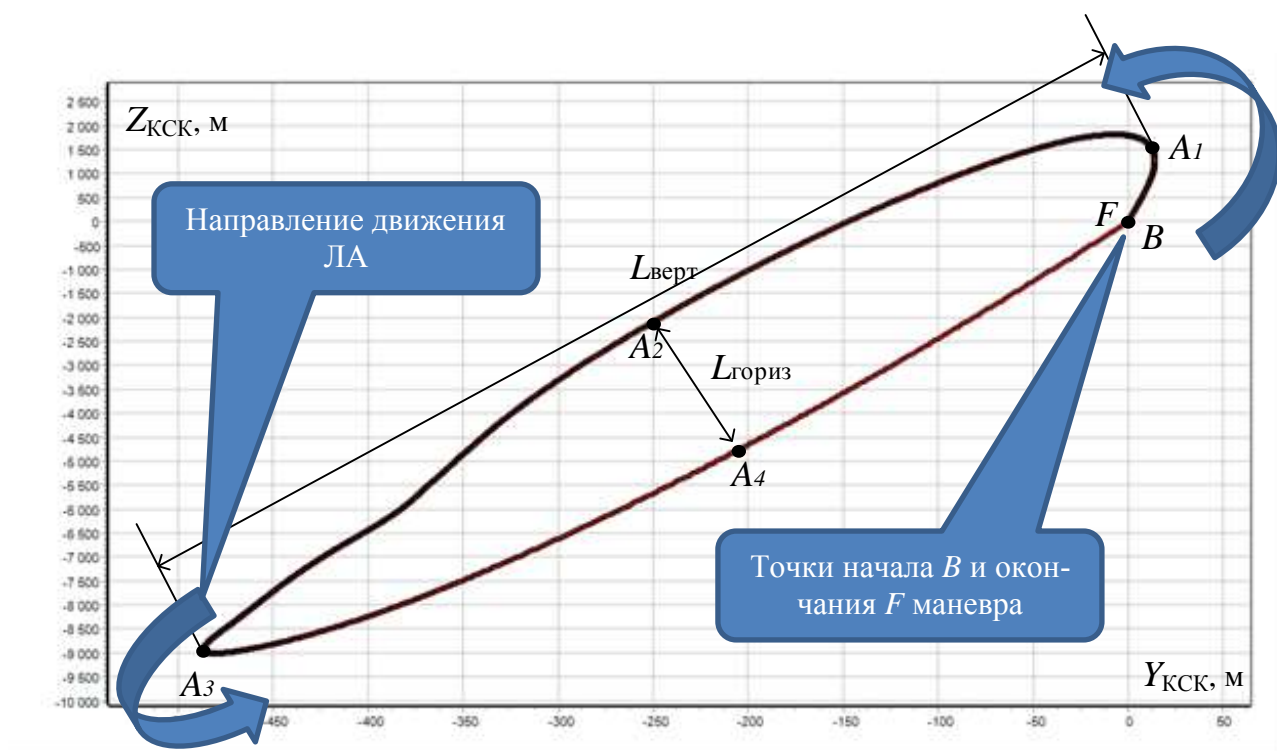


Рис. 5. Проекция годографа $G_{\text{тек}}$ на плоскость $Y_{\text{КСК}}O_{\text{КСК}}Z_{\text{КСК}}$

Угол между нормалью к поверхности Земли и отрезком A_3A_1 составляет $6,8^\circ$. При этом ширина реализованной фигуры $L_{\text{гориз}}$ (расстояние между точками A_2 и A_4) составляет величину порядка 80 м, а высота $L_{\text{верт}}$ (расстояние между точками A_1 и A_3) – 11 км. Это позволяет сделать вывод о реализации маневра GEMS в вертикальной плоскости и подтверждает возможность оценивания его параметров по ВТИ.

Максимально достижимая дальность полета полезной нагрузки составила величину порядка 6000 км. Дальность траектории с учетом реализации маневра составила величину, равную 5500 км.

Решение задачи оценивания летно-технических характеристик ЛА должно обязательно сопровождаться методическим обеспечением расчета точности получаемых оценок. Для получения приемлемой точности не более чем в 500 км в прогнозировании дальности полета необходимо обеспечить точность ВТИ скорости ЛА не хуже 100 м/с [3]. При этом данное требование практически не меняется при двукратном изменении высоты начала прогноза от 1000 до 2000 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика к анализу результатов ВТИ позволяет оценивать:

- характеристики маневра по обеспечению окончания запаса характеристической скорости ЛА к требуемой точке траектории полета;
- максимально возможную дальность полета и массу полезной нагрузки.

Дальнейшие исследования должны быть проведены по направлениям разработки:

- специального программного обеспечения автоматизации построения КСК, определения характеристик маневра GEMS и расчета достижимой дальности полета;
- методического обеспечения «обратного» прогноза траектории ЛА до точки старта с целью уточнения значений дальности полета;
- методического обеспечения повторной обработки телеметрической информации по пускам ЛА для создания допусковых границ контроля стабильности энергетических характеристик двигателей ЛА.

Список используемых источников

1. *Евсюков А.В., Сосновский М.Е., Хазов А.Е.* С опорой на ядерное оружие // Национальная оборона. – 2018 – №6. – URL: <https://oborona.ru/includes/periodics/geopolitics/2018/0627/121324419/detail.shtml> (дата обращения: 21.08.2020).
2. *Клименко И.В.* Научно-методические основы идентификации параметров движения телеметрируемых объектов в условиях структурно-параметрической неопределенности // Двойные технологии. – 2008 – №1 (42). – С. 55–59.
3. *Шмелёв В.В., Самойлов Е.Б.* Оценивание энергетических характеристик ракетно-космической техники по результатам внешнетраекторных измерений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – № 675.
4. *Гончаров А.М., Самойлов Е.Б., Шмелёв В.В.* Синтез оптимальной по достоверности программы классификации телеметрируемых параметров при идентификации бортовых систем ракетно-космической техники // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – № 673. – С. 18–35.
5. *Лебедев А.А., Герасюта Н.Ф.* Баллистика ракет. – М.: Машиностроение, 1970. – 244 с.
6. *Сихарулидзе Ю.Г.* Баллистика летательных аппаратов. – М.: Наука, 1982. – 352 с.

С.М. Беседин,
кандидат военных наук, доцент;
А.В. Ерофеев,
кандидат военных наук, доцент;
В.О. Кацик,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ КУРСАНТОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ ТАКТИКО-СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН

Рассматриваются особенности применения компьютерного тестирования для оценки знаний курсантов в процессе проведения занятий практической направленности по тактико-специальной дисциплине. Показано, что использование компьютерного тестирования перед началом каждого занятия позволяет повысить уровень знаний курсантов и обеспечить объективность оценок результатов обучения.

Ключевые слова: обучение, информационные технологии, текущий контроль, компьютерное тестирование, специализированный учебный комплекс, учебный командный пункт.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей вузов МО по подготовке высококвалифицированных военных кадров является повышение качества и эффективности учебного процесса. В решении этой задачи важнейшая роль принадлежит контролю знаний обучающихся в течение всего срока обучения.

Обучение не может быть полноценным и качественным без регулярной и объективной информации о том, как курсанты в процессе учебы усваивают учебный материал. Оценивание уровня знаний обучающихся – весьма ответственная педагогическая функция, требующая от педагога определенного искусства, объективности, педагогических этики и такта. Именно поэтому для повышения качества контроля уровня знаний и устранения субъективизма в оценке знаний обучающихся используется компьютерное тестирование.

Современное положение в сфере тестового контроля характеризуется не только особенностью его применения при изучении тактико-специальных дисциплин, но и тем, что у большинства преподавателей нет специальных знаний по подготовке и проведению тестового контроля с помощью ЭВМ.

Новизна предлагаемого подхода состоит в том, что перед каждым занятием практической направленности курсантам предлагается выполнить специальный тест, вопросы которого отражают содержание учебных вопросов предстоящего занятия. Результаты проведенного тестирования позволяют преподавателю оперативно сделать выводы о готовности отдельных курсантов и учебной группы в целом к выполнению практического занятия. У преподавателя появляются веские основания проводить занятия по заранее запланированной методике или оперативно внести в нее соответствующие корректировки для достижения поставленных учебных целей.

КОМПЬЮТЕРНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ КУРСАНТОВ

В соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) [1] оценка качества усвоения рабочих программ обучающимися включает:

- текущий контроль успеваемости;
- промежуточную аттестацию обучающихся;
- государственную итоговую аттестацию.

Практика учебного процесса показывает, что если промежуточной и государственной аттестациям уделяется серьезное внимание, то текущему контролю такое внимание уделяется недостаточно. Как правило, полнота и качество проведения текущего контроля зависят от компетенции и добросовестности преподавателя, ведущего учебную дисциплину.

Для проверки хода и качества усвоения изучаемого материала рабочая программа учебной дисциплины предусматривает проведение текущего контроля знаний и навыков в виде рубежного контроля и контрольных работ [2].

Особенность проведения рубежного контроля состоит в том, что его выполнение запланировано в рабочей программе и связано с завершением изучения отдельных тем или разделов программы.

Все рубежные контроли подлежат обязательному выполнению каждым курсантом, и их результат является основанием для допуска обучающегося к экзамену по учебной дисциплине (промежуточная аттестация).

Одним из проблемных вопросов при организации контроля результатов обучения является выбор соответствующего метода контроля. Всем известным методам контроля уровня знаний присущи свои достоинства и недостатки, поэтому при организации контроля необходимо знать и учитывать их теоретические и методологические особенности.

Современная дидактика выделяет довольно большое число методов контроля, но наиболее часто в процессе изучения тактико-специальных дисциплин используются следующие:

- устный контроль;
- письменный контроль;
- тестирование.

Периодически используя в процессе занятий устные и письменные методы контроля, педагоги кафедры пришли к выводу о целесообразности для повышения качества контроля знаний курсантов использовать перспективные методы контроля.

Среди существующих технологий оценки качества подготовки будущих военных специалистов следует выделить тестирование как наиболее технологический инструмент, позволяющий объективно оценивать качество усвоения учебного материала. При этом к числу наиболее признанных в педагогике методов контроля качества знаний обучающихся относится тестирование с помощью ЭВМ [3]. Использование компьютерного тестирования позволяет повысить объективность, детальность и точность оценивания результатов обучения. Кроме того, компьютерное тестирование также позволяет снизить неоднородность предъявляемых к обучающемуся требований и повысить производительность труда преподавателя [4].

Преимуществами компьютерного тестирования являются:

1. Объективность.
2. Простота.
3. Демократичность.
4. Массовость и кратковременность.
5. Технологичность.
6. Достоверность информации об объеме усвоенного материала и об уровне его усвоения.
7. Надежность.

Наряду с преимуществами у компьютерных методов тестирования есть и свои недостатки.

1. Общение человека с компьютером имеет свою специфику, и не все одинаково спокойно относятся к компьютерному тестированию. При компьютерном тестировании преподаватель имеет дело только с полученными результатами. Он не общается с тестирующимся, а значит, не владеет о нем дополнительной информацией, не может объективно выявить его действительный объем знаний.

2. Тестовый контроль не способствует развитию устной речи курсантов, а это, в свою очередь, отрицательно сказывается на развитии их командирских качеств.

3. Широта охвата тем в тестировании имеет и обратную сторону. Обучающийся при тестировании, в отличие от устного или письменного опроса, не имеет достаточно времени для сколько-нибудь глубокого анализа темы.

4. В тестировании присутствует элемент случайности. Например, обучающийся, не ответивший на простой вопрос, может дать правильный ответ на более сложный. Причиной этого может быть как случайная ошибка в первом вопросе, так и угадывание ответа во втором. Это искажает результаты теста и может привести к получению необъективной оценки знаний обучающегося.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА УЧЕБНОГО КОМАНДНОГО ПУНКТА КАФЕДРЫ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ КУРСАНТОВ

Для осуществления образовательного процесса на кафедре оборудована специализированная аудитория учебно-лабораторной базы (учебно-командный пункт) на 22 рабочих места, оснащенная 12 ПЭВМ, специализированным программным обеспечением, мультимедийной доской и проектором.

При проведении тестирования на начальном этапе проведения практического занятия у преподавателя появляется возможность оценить подготовку к занятию как всей учебной группы, так и отдельных курсантов и оперативно внести корректировку в методику проведения занятия.

Кроме того, компьютерное тестирование позволяет определить знания и навыки курсантов нескольких учебных групп, сгруппированных в одном потоке, сравнить их уровень и в случае необходимости вовремя принять соответствующие меры по устранению обнаруженных пробелов в обучении.

Разработанная на кафедре тестирующая программа первоначально предназначалась для осуществления контроля знаний курсантов в процессе рубежного контроля.

Вся процедура проведения рубежного контроля с использованием компьютерного тестирования изложена в работе [5].

Применение компьютерного тестирования для рубежного контроля при изучении учебной дисциплины «Тактика сил запуска и управления КА» дало положительные результаты, и это послужило основанием для использования компьютерного тестирования при проведении текущего контроля знаний курсантов перед проведением всех видов занятий практической направленности.

В ходе разработки тестирующей компьютерной программы учитывались следующие требования:

- до начала тестирования обучающийся должен знать количество тестов, число вопросов в каждом тесте и время, отводимое на ответ;
- до начала тестирования обучающийся должен ознакомиться со способами выполнения задания теста;
- во время тестирования на экране монитора должно располагаться только одно тестовое задание;
- после завершения ввода ответов обучающийся должен подтвердить окончание их выполнения и при наличии времени вернуться к невыполненным заданиям и продолжить их выполнение;
- если время, отведенное на выполнение теста, закончилось, то все оставшиеся задания считаются невыполненными;

– обучающийся по окончании тестирования должен иметь возможность ознакомиться с результатами тестирования: какую он получил оценку, длительность выполнения тестирования, количество заданий с правильными и неверными ответами.

Для проведения компьютерного тестирования перед проведением всех видов занятий практической направленности во вновь разработанной программе каждому курсанту предлагается выполнить четыре тестовых задания, в каждом из которых приводятся четыре варианта ответа и только один из них – правильный. Вопросы тестового задания сформулированы исключительно по тематике проводимого занятия и должны подтвердить знания курсанта, необходимые ему для успешного решения практической задачи.

Ввиду сокращения числа тестовых заданий (относительно тестовых заданий для рубежного контроля) время на их выполнение уменьшилось до четырех минут.

В оценочный блок программы были внесены корректирующие изменения, которые сводились к следующему: оценкой «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно» оценивались знания курсанта, если правильные ответы были соответственно на четыре, три, два и менее двух тестовых заданий.

Вся процедура проверки знаний курсантов с применением компьютерного контроля проводится в следующей последовательности:

– по прибытии учебной группы на учебный командный пункт и после доклада командира группы о готовности курсантов к практическому занятию преподаватель делит учебную группу на две равные части, и одна подгруппа занимает места за компьютерами;

– преподаватель включает тестовую программу для данного практического занятия, и курсанты приступают к решению тестовых заданий;

– для второй подгруппы курсантов преподаватель включает слайды презентации и объявляет тему занятия, учебные вопросы, актуальность изучаемой темы для практической деятельности будущих офицеров и указывает учебную литературу;

– по истечении установленного времени на выполнение тестовых заданий подгруппы курсантов меняются рабочими местами и выполняют соответствующие задания;

– по завершении выполнения тестовых заданий второй подгруппой курсантов преподаватель анализирует результаты тестового контроля, объявляет результаты курсантам и делает выводы о готовности учебной группы к практическому занятию;

– в отдельных случаях, когда в результате тестового контроля большая часть курсантов получила неудовлетворительные оценки, преподаватель принимает решение о выделении времени (примерно 15–20 мин) для самостоятельной работы с учебной литературой и подготовки к данному практическому занятию;

– в конце занятия преподаватель оценивает работу каждого курсанта и выставляет окончательную оценку, которая складывается из двух оценок: одна за компонент «знать» по результатам тестового контроля, и вторая за компонент «уметь» и «владеть» по результатам выполнения практической задачи. Завершая занятие, преподаватель делает выводы о достижении поставленных учебных целей и записывает результаты контроля в журнал учета учебных занятий учебной группы.

Для подтверждения эффективности методики оценки знаний курсантов с использованием компьютерного тестирования на кафедре в течение 2018 и 2019 годов был проведен педагогический эксперимент. К эксперименту были привлечены шесть учебных групп курсантов 3-го факультета, изучающих учебную дисциплину «Тактика сил запуска и управления КА». Учебные группы были разделены произвольным образом на три экспериментальные группы по две в каждой. В первой группе оценка знаний курсантов проводилась традиционным методом с использованием письменных контрольных работ. Во второй группе оценка знаний курсантов осуществлялась с использованием компьютерного тестирования только на занятиях, на которых учебной программой было предусмотрено проведение рубежного контроля. И в третьей группе компьютерное тестирование выполнялось перед началом всех занятий практической направленности.

Эффективность предлагаемой методики проведения занятий оценивалась путем сравнения полученных результатов знаний курсантов во всех трех экспериментальных группах за время проведения эксперимента.

Результаты успеваемости курсантов всех учебных групп были обобщены и после математической обработки данных была построена гистограмма, которая приведена на рис. 1. Кроме того, был выведен средний балл для каждой группы: в первой группе средний балл знаний курсантов был равен 4,02, во второй – 4,11 и в третьей – 4,28.

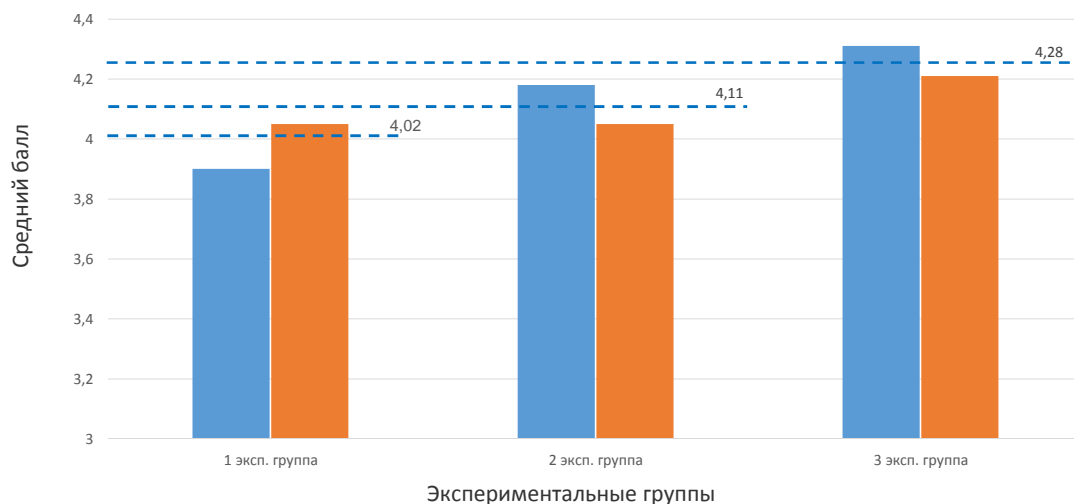


Рис. 1. Результаты успеваемости обучающихся

Таким образом, результаты педагогического эксперимента свидетельствуют о том, что использование компьютерного тестирования для проверки знаний курсантов перед началом занятий практической направленности наглядно показало свою эффективность, а предложенная методика может стать составной частью учебного процесса при изучении тактико-специальных дисциплин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты контроля знаний обучающихся позволяют сделать вывод, что использование компьютерного тестового контроля с самого первого практического занятия приучает курсантов к мысли, что проверка знаний является обязательной составной частью учебного процесса и благоприятно влияет на приобретение ими соответствующих умений и навыков. Внедрение компьютерного тестирования в постоянную педагогическую практику изучения тактико-специальных дисциплин способствует выявлению на ранних стадиях изучения дисциплины наиболее сложных для усвоения учебных вопросов и тем самым позволяет своевременно принять меры для устранения обнаруженных недостатков.

Список используемых источников

1. О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона от 29 декабря 2012 г № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»: приказ Минобрнауки России от 15 сентября 2014 г № 670. – М., 2014. – 85 с.

2. Тактика сил запуска и управления КА: рабочая программа учебной дисциплины. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 38 с.
3. *Полат Е.С., Бухаркина М.Ю.* Новые педагогические и информационные технологии в системе образования: учеб. пособие. – М.: Академия, 2010. – 368 с.
4. *Сиренко С.Н.* Компьютерное тестирование в вузе: преимущества, особенности, опыт внедрения // Педагогические измерения. – 2007. – № 4. – С. 66–73.
5. Разработка оценочных средств для проведения текущего контроля знаний курсантов при изучении ими тактико-специальных дисциплин / В.О. Кацик [и др.] // Вестник Академии военных наук. – 2019. – № 1. – С. 82–87.

Ю.М. Богук,
кандидат военных наук;
М.А. Голубев,
кандидат военных наук, доцент

МЕТОДИКА ОРГАНИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ АКАДЕМИИ В УСЛОВИЯХ САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Изложены результаты исследования порядка и особенностей реализации дополнительных профессиональных программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников академии в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений в связи с распространением и угрозой заражения коронавирусной инфекцией (COVID-19).

Ключевые слова: дополнительная профессиональная программа, индивидуальный план, календарный учебный график, методика, учебно-методические материалы, фонд контрольных заданий.

Прошедший 2020 год стал годом испытания системы военного образования России на дееспособность в условиях усложнившейся санитарно-эпидемиологической обстановки в связи с распространением и угрозой заражения коронавирусной инфекцией (COVID-19).

В частности, данная проблема сказалась и на организации профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников академии на кафедре подготовки и повышения квалификации педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации (далее – кафедра). Для реализации санитарно-эпидемиологических требований занятия в учебных группах повышения квалификации были отменены, а в учебных группах профессиональной переподготовки, в которых обучение достигло середины срока, слушатели учебных групп, как и преподаватели, в апреле-мае были переведены на удаленный режим работы. Своевременная выдача электронных учебно-методических материалов (УММ) по дисциплинам кафедры и заданий слушателям позволила организовать их самостоятельную работу в рамках дополнительных профессиональных программ (ДПП).

Освоение военными специалистами ДПП может осуществляться с отрывом, с частичным отрывом или без отрыва от служебной деятельности (очная, очно-заочная и заочная форма обучения) [1, 2].

Очная форма освоения слушателями ДПП является в академии основной. Введение санитарно-эпидемиологических ограничений в организацию образовательного процесса привело к переходу на очно-заочную или заочную формы обучения слушателей. Переход на эти формы обучения потребовал внесения изменений в организацию образовательного процесса.

Для реализации ДПП в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений была разработана соответствующая этой ситуации методика организации дополнительного профессионального образования (ДПО) преподавателей академии (далее – Методика), которая была применена при реализации программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации [2].

Структурная схема реализации мероприятий, определенных в Методике, представлена на рис. 1 [3]. В ней работа должностных лиц, преподавателей и слушателей распределена на следующие три этапа [4]:

1) этап планирования – разработка планирующих документов, связанных с организацией обучения по ДПП;

- 2) этап обучения – освоение слушателями дисциплин ДПП;
- 3) этап аттестаций – сдача слушателями зачетов и итоговой аттестации.

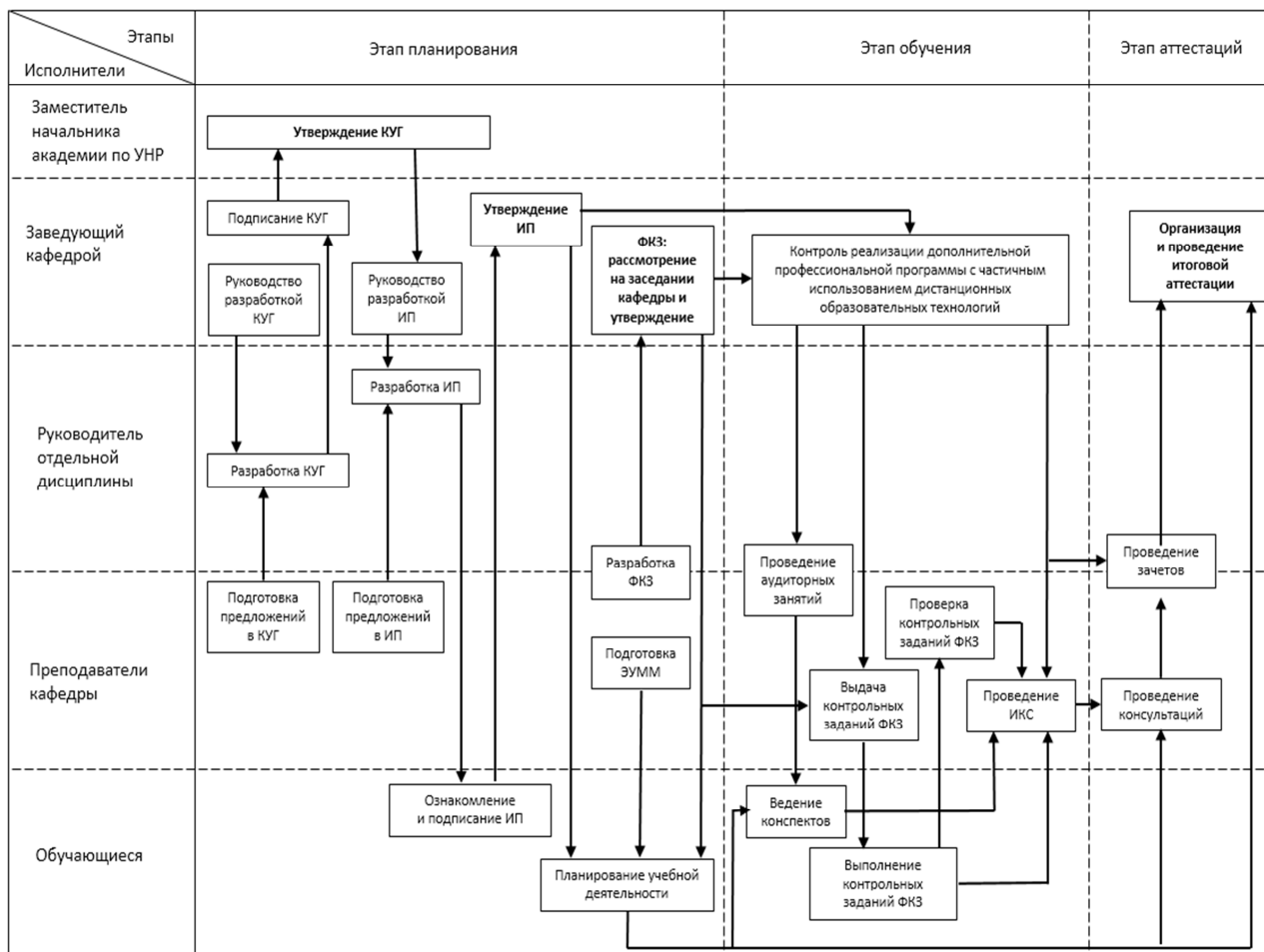


Рис. 1. Структурная схема реализации дополнительного профессионального образования педагогических работников академии в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений

На рисунке приняты следующие сокращения:

- ИКС – индивидуальное контрольное собеседование;
- ИП – индивидуальный план;
- КУГ – календарный учебный график;
- УНР – учебно-научная работа;
- ФКЗ – фонд контрольных заданий;
- ЭУММ – электронные учебно-методические материалы.

После принятия решения начальником академии о реализации ДПП с учетом санитарно-эпидемиологических ограничений выполнение задач по планированию, учебно-методическому обеспечению и проведению данного вида обучения возлагается на кафедру.

На этапе разработки планирующих документов по организации обучения на кафедре дополнительно к утвержденной ДПП [1] разрабатываются:

- календарный учебный график освоения ДПП в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений;
- индивидуальные планы обучения слушателей;
- фонд контрольных заданий.

Главным требованием при реализации ДПП является сохранение полного освоения про-

граммы с перераспределением части учебного времени аудиторных занятий на самостоятельную работу слушателей. Количество аудиторных часов занятий по дисциплинам ДПП планируется исходя из количества дней аудиторных занятий пропорционально трудоемкости дисциплин. В течение всего периода изучения дисциплин учебные занятия с преподавателем назначаются не чаще одного дня в неделю. Обязательными для планирования контактной работы слушателей с преподавателями являются лекции, индивидуальные контрольные собеседования (ИКС), консультации, промежуточная и итоговая аттестации [5]. Оставшиеся учебные часы дисциплин перераспределяются на самостоятельную работу слушателей. При этом самостоятельная работа слушателей обеспечивается электронными версиями учебно-методических материалов дисциплин ДПП, разработанных для очного обучения, а также электронными версиями основной и дополнительной литературы.

Календарный учебный график (КУГ) освоения ДПП в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений разрабатывается на каждую ДПП в соответствии с установленными сроками обучения по ней. Разрабатывает КУГ по ДПП под руководством заведующего кафедрой руководитель отдельной дисциплины (РОД), курирующий обучение по ДПП, совместно с преподавателями, планируемыми к проведению учебных занятий. Календарный учебный график подписывается заведующим кафедрой и утверждается заместителем начальника академии по учебной и научной работе.

В первый день обучения планируется проведение установочного совещания со слушателями и входной контроль их знаний. На установочном совещании до слушателей доводятся сроки, порядок и особенности обучения по ДПП, требования по организации их самостоятельной работы, обеспеченность учебно-методическими материалами и литературой, а также иные вопросы, касающиеся организации взаимодействия слушателей и преподавателей. Входной контроль проводится с целью дифференцирования сложности заданий для слушателей при изучении дисциплин в форме тестирования по знанию основ военной педагогики и психологии, требований законодательства и нормативных правовых актов в области подготовки военных кадров для Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ).

Аудиторные занятия в виде лекций планируются один день в неделю. Учебная нагрузка слушателей аудиторными занятиями в учебный день не должна превышать восьми учебных часов (один учебный час – 45 минут). В зависимости от сложности изучаемой темы на лекцию может выделяться от одного до двух учебных часов.

В завершении изучения каждой дисциплины с целью подведения итогов по достижению планируемых результатов выполнения слушателями заданий на самостоятельную работу в соответствии с фондом контрольных заданий планируется проведение индивидуальных контрольных собеседований (ИКС).

Проведение промежуточной и итоговой аттестации планируется в соответствии с ДПП: промежуточная аттестация – в виде зачетов и зачетов с оценкой; итоговая аттестация – в виде итогового междисциплинарного экзамена. Каждый вид испытаний предваряется консультацией.

Для каждого слушателя разрабатывается индивидуальный план обучения (ИП), который предназначен для организации его учебной деятельности в сроки, установленные КУГ.

Типовой ИП по ДПП разрабатывается РОД, курирующим обучение по ней, под руководством заведующего кафедрой совместно с преподавателями, планируемыми к проведению учебных занятий. ИП подписывается слушателем и утверждается заведующим кафедрой.

Структура типового ИП состоит из титульного листа и следующих разделов:

1. Выписка из КУГ.
2. План изучения учебной дисциплины.
3. Методические указания слушателям по освоению ДПП.

Титульный лист содержит информацию об утверждении ИП, а также о слушателе, цели и сроке освоения им ДПП.

Выписка из КУГ предназначена для определения слушателем порядка изучения дисциплины.

план ДПП, план изучения учебной дисциплины (ПИУД) – для планирования и контроля изучения слушателем дисциплин ДПП.

В ПИУД по каждой дисциплине содержится следующая информация:

- приводится перечень учебных тем;
- осуществляется распределение учебного времени на аудиторские занятия и самостоятельную работу слушателей;
- определяются срок и вид отчетности изучения учебных тем;
- отводится раздел для отметки преподавателями хода выполнения слушателями заданий на самостоятельную работу.

Перечень учебных тем составляется в соответствии с рабочими программами дисциплин ДПП. Распределение учебного времени на аудиторские занятия и самостоятельную работу слушателей осуществляется в соответствии со следующими требованиями:

- общая трудоемкость дисциплин и общее учебное время, выделяемое на изучение учебных тем, должны отвечать соответствующим значениям, указанным в рабочих программах дисциплин;
- учебное время, выделяемое на аудиторские занятия и промежуточную аттестацию, определяется утвержденным КУГ. Оставшееся от общей трудоемкости учебное время отводится на самостоятельную работу слушателей.

Адресованные слушателям методические указания по освоению ДПП определяют основные требования, предъявляемые к изучению ими дисциплин, организации самостоятельной работы и отчетности по дисциплинам и ДПП в целом.

Фонд контрольных заданий (ФКЗ) предназначен для организации контроля усвоения слушателями учебного материала дисциплин ДПП. ФКЗ по ДПП разрабатывается преподавателями, планируемыми к проведению учебных занятий, под руководством заведующего кафедрой, рассматривается на заседании кафедры, подписывается разработчиками и утверждается заведующим кафедрой [6].

ФКЗ по каждой дисциплине включает в себя методические указания слушателям и перечни заданий по теоретической и практической отработке учебного материала изучаемых дисциплин. Методические указания определяют порядок, планируемые сроки и формы выполнения заданий. Перечни заданий должны охватывать учебный материал всех учебных тем, быть конкретными, понятными слушателям и рассчитаны на количество часов, отводимых на самостоятельную работу. При необходимости преподаватель к заданиям может разработать раздаточный материал.

Электронные версии УММ дисциплин ДПП должны соответствовать утвержденным печатным версиям. Электронные УММ выдаются слушателям в первый день обучения по ДПП. Комплекуются электронные УММ преподавателями, участвующими в реализации дисциплин ДПП, в объеме согласно следующему перечню:

- рабочая программа дисциплины;
- тематический план изучения дисциплины;
- лекции (при необходимости с мультимедийными презентациями);
- материалы промежуточной аттестации по дисциплине;
- электронные версии основной и дополнительной литературы.

При планировании изучения дисциплин ДПП целесообразно определить порядок взаимодействия слушателей с преподавателями кафедры. Основной формой установления такого взаимодействия является контактная работа слушателей с преподавателями при проведении аудиторных занятий и консультаций в соответствии с КУГ, а также при необходимости в часы, индивидуально определяемые преподавателями. При осложнении санитарно-эпидемиологической обстановки и принятии решения об удаленном режиме работы каждый преподаватель самостоятельно устанавливает порядок взаимодействия со слушателями и их индивидуального консультирования.

На втором этапе – этапе обучения выполняются следующие мероприятия:

– преподаватели проводят аудиторные занятия, выдают и проверяют выполнение слушателями контрольных заданий;

– слушатели самостоятельно по выданным электронным УММ изучают учебный материал дисциплин, ведут конспекты, выполняют и сдают контрольные задания.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций, на которых преподаватели дают оценку выполненным контрольным заданиям, доводят до слушателей основные положения изучаемой темы, объясняют особенности организации самостоятельной работы при выполнении контрольных заданий.

Самостоятельная работа осуществляется слушателями с использованием выданных электронных УММ и ФКЗ. Контрольные задания выполняются в печатном (рукописном) виде и сдаются на проверку в сроки, установленные в ИУП. Для контроля своевременности сдачи слушателями выполненных заданий преподавателям целесообразно вести график их сдачи.

На третьем этапе выполняются мероприятия промежуточной и итоговой аттестации. Зачеты и зачеты с оценкой проводятся в соответствии с рабочими программами дисциплин в очной форме, итоговая аттестация (итоговый междисциплинарный экзамен – ИМЭ) также осуществляется в очной форме в соответствии с требованиями ДПП. Перед промежуточной аттестацией по дисциплинам преподаватели проводят ИКС, на которых подводят итоги изучения дисциплины и выполнения контрольных заданий каждым слушателем. Перед зачетами и ИМЭ в соответствии с КУГ преподаватели проводят консультации.

В случае усиления санитарно-эпидемиологических ограничений организация обучения по ДПП возможна в следующем порядке:

– изучение дисциплин слушателями осуществляется без аудиторных занятий, самостоятельно с использованием выданных электронных УММ;

– сдача выполненных заданий слушателями выполняется в порядке, установленном преподавателем, в печатном или электронном виде;

– промежуточная аттестация по дисциплинам проводится по оценке всех выполненных контрольных заданий;

– итоговая оценка освоения ДПП каждому слушателю определяется по оценке выполнения им индивидуального задания – разработки реферата, учебных документов и т. п.

Слушателям, успешно прошедшим обучение по ДПП, выдается документ установленного образца – удостоверение о повышении квалификации или диплом о профессиональной переподготовке [7].

Таким образом, по результатам проведенного исследования и апробации разработанной Методики можно сделать следующие выводы:

– апробация разработанной Методики реализации ДПП педагогических работников в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений подтвердила ее актуальность и эффективность в организации ДПО в условиях распространения и угрозы заражения коронавирусной инфекцией (COVID-19);

– результаты исследования могут быть использованы при реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования – программ подготовки научно-педагогических кадров и программ магистратуры.

Список используемых источников

1. Методические рекомендации по организации и осуществлению дополнительного профессионального образования в организациях Министерства обороны Российской Федерации, осуществляющих образовательную деятельность: утверждены статс-секретарем – заместителем Министра обороны Российской Федерации. – МО РФ, 2015.

2. Общие положения по организации реализации дополнительных профессиональных программ с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного

обучения: утверждены статс-секретарем – заместителем Министра обороны Российской Федерации. – МО РФ, 2020.

3. *Заболотский В.П., Оводенко А.А., Степанов А.Г.* Математические модели в управлении: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУАП, 2001. – 196 с.

4. *Андреев А.А.* Дидактические основы дистанционного обучения. – М.: РАО, 1999. – 120 с.

5. Российская Федерация. Министерство обороны Российской Федерации. О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»: приказ Министра обороны Российской Федерации от 15 сентября 2014 г. № 670 // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_170951/ (дата обращения: 30.09.2020).

6. *Голубев М.А., Казаков В.П., Хрустова А.Н.* Технологии профессионально-ориентированного обучения: учеб. пособие / под ред. Н.С. Кужекина. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2019. – 136 с.

7. Об образовании в Российской Федерации: федеральный закон № 273 от 29.12.2012 (ред. от 31.12.2014). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174 (дата обращения: 20.06.2019).

М.А. Горшков,
кандидат педагогических наук;
С.Ю. Окунев,
кандидат исторических наук, доцент

ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ВОЕННОЙ ИСТОРИИ КАК ПОКАЗАТЕЛЯ ЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ

На основе анализа существующих подходов предложена авторская методика формирования эффективного педагогического мышления преподавателей военной академии, подход конкретизирован для формирования эффективного педагогического мышления преподавателей военной истории в целях формирования их профессиональной компетентности.

Ключевые слова: педагогическое мышление, ситуационный подход, предметно-методическая комиссия, ситуативное мышление, надситуативное мышление, профессиональная компетентность преподавателя.

Проблема формирования педагогического мышления преподавателей является одной из фундаментальных в педагогике. Н.В. Ключева [1] подчеркивает, что на втором месте из пяти профессионально важных качеств, необходимых для осуществления педагогической деятельности и позволяющих оценивать степень профессиональной компетентности преподавателя, находится педагогическое мышление. Значительная часть исследований в указанной области основывается на подходе М.М. Кашапова [2]. Однако специфика формирования педагогического мышления преподавателей в военных вузах изучена недостаточно.

Процесс целенаправленного формирования педагогического мышления, как у студентов, так и у воспитателей дошкольных образовательных учреждений, преподавателей школ, вузов, являлся предметом изучения ряда исследователей [1–7].

В то же время многообразие подходов к изучению данного понятия не приближает к пониманию его сущности. Достаточно сложно систематизировать и сформулировать единые признаки, которые позволили бы отличить педагогическое мышление от других видов мышления.

К примеру, Е.К. Осипова предлагает рассматривать педагогическое мышление как «процесс решения педагогических задач, который характеризуют полифункциональность, иерархизированность, эвристичность поисковых структур, многокомпонентность» [5].

Е.Ю. Куони рассматривает педагогическое мышление как «интегративное личностное образование, проявляющееся в способности осознанно использовать педагогические идеи, знания и умения в конкретных ситуациях профессиональной деятельности, видеть в определенных явлениях профессиональной деятельности педагогическую сущность и выбирать адекватные способы педагогического взаимодействия» [4].

По мнению О.Н. Ракитской, профессиональное педагогическое мышление является «высшим познавательным процессом обнаружения и разрешения педагогической проблемности, характеризующимся личностной включенностью преподавателя в преобразования в ходе профессиональной деятельности» [6]. Исследование указанным автором, как и целым рядом других, проводилось в русле концепции развития педагогического мышления М.М. Кашапова. Совокупность этих исследований относительно системно раскрывает сущность рассматриваемого нами понятия, особенности его формирования в различных условиях. Поэтому мы будем придерживаться данной концепции, однако будем учитывать и специфику преподава-

тельской деятельности в военном вузе вообще и преподавания военной истории в военном вузе в особенности.

Концепция М.М. Кашапова в качестве основы использует в том числе ситуационный подход. Реальный педагогический процесс протекает не изолированно, а в конкретных условиях, уникальная совокупность которых составляет педагогическую ситуацию. «Решение педагогической проблемной ситуации является средством управления учебно-воспитательным процессом.... Осознание преподавателем своей деятельности, средств и методов ее осуществления составляет основу развития профессионального педагогического мышления» [2]. Таким образом, автор предлагает рассматривать профессиональную деятельность педагога как совокупность педагогических ситуаций, а педагогическое мышление, основанное на рефлексии, как средство решения проблемных педагогических ситуаций. Указанный подход мы и будем использовать в качестве основы.

В вышеуказанной концепции особенности познания, оценивания (выявления ситуативной либо надситуативной проблемности) и преобразования сложной педагогической ситуации служат критериями для дифференциации двух категорий педагогов – с преобладающим ситуативным либо надситуативным педагогическим мышлением.

Надситуативность педагогического мышления М.М. Кашапов понимает как «базовое качество профессионального мышления, характеризующееся умением подниматься над уровнем сиюминутных требований ситуации, обнаруживать надситуативную проблемность, ставить цели, избыточные с точки зрения исходной задачи» [2].

«Педагоги, имеющие надситуативный уровень мышления, способны наметить стратегию своей профессиональной деятельности, увидеть ее отсроченный результат и за счет внутреннего локуса контроля оценить свои как успехи, так и неудачи, рассматривая последние в качестве своеобразной ступени на пути повышения педагогического мастерства. Педагогов с ситуативным уровнем мышления отличает неумение видеть дальнюю перспективу, поэтому расхождение между ожидаемым и полученным результатом кроме отрицательных эмоций ничего педагогу не дает. Внешний локус контроля такого педагога мешает ему объективно и полно проанализировать причины собственных неудач» [3].

Таким образом, очевидно, что преподаватели, обладающие не только ситуативным, но и надситуативным педагогическим мышлением, являются более эффективными, более компетентными. Целенаправленное формирование педагогического мышления должно способствовать умению обнаруживать надситуативную проблемность, а также построению системы практически ориентированных умственных действий преподавателя по эффективному разрешению выявленной проблемности.

Однако М.М. Кашапов рассматривает формирование педагогического мышления, опираясь на концепцию системогенеза профессиональной деятельности В.Д. Шадрикова, в которой ключевым выступает понятие психологической системы деятельности, что, на наш взгляд, более целесообразно именно в рамках психологического исследования. Для педагогических теории и практики, по мнению авторов, более релевантным представляется подход, в котором содержанием педагогического мышления является совокупность следующих видов педагогической деятельности:

- прогностическая – предвидение и прогнозирование результата педагогической деятельности, моделирование педагогического процесса;
- проектировочная и конструктивная – проектирование и планирование педагогического процесса;
- организаторская – организация своих педагогических действий и деятельности учащихся;
- коммуникативная – построение межличностного взаимодействия и отношений, создающих условия для организации эффективного педагогического процесса;
- рефлексивная – анализ и оценка своей педагогической деятельности, определение направлений ее коррекции [7].

Осуществление перечисленных видов деятельности будет в большей степени способствовать развитию надситуативности педагогического мышления, если дополнить их специальным содержанием. Задействование механизма рефлексии позволяет придать этому процессу целенаправленный характер.

Педагогическое мышление возможно формировать как путем целенаправленных педагогических воздействий в условиях вузовской и организованной послевузовской подготовки, так и в ходе осуществления педагогом непосредственно образовательной деятельности. В данной статье акцент сделан на двух последних направлениях.

Исходя из сказанного выше, к формированию эффективного педагогического мышления у преподавателя конкретной учебной дисциплины, в том числе военной истории, целесообразно подходить с позиций общего, особенного, единичного.

В качестве общего мы предлагаем рассматривать осуществление целенаправленного начального формирования эффективного педагогического мышления на курсах переподготовки и повышения квалификации профессорско-преподавательского состава (КПиПК) (в случае, если группы не формируются по преподаваемым учебным дисциплинам), в рамках психолого-педагогического блока. В результате у преподавателей различных учебных дисциплин должны быть сформированы теоретические знания сущности и содержания педагогического мышления и, как минимум, в начальной степени навыки рефлексии в отношении педагогического мышления.

Особенным является формирование педагогического мышления преподавателя на уровне предметно-методической комиссии преподаваемой дисциплины (ПМК) в ходе целенаправленного обсуждения его подготовки и проведения учебного занятия.

На наш взгляд, сама методика преподавания военной истории, содержание учебного материала, обусловленные ее предметом, способствуют надситуативности педагогического мышления. На учебных занятиях военно-исторические события рассматриваются не изолированно, всегда есть более широкий контекст, есть предыстория, причинно-следственные связи; рассмотрение событий происходит в прямом смысле надситуативно.

Для педагога важно осознавать указанные объективно существующие особенности преподавания военной истории, то есть задействовать психологический механизм рефлексии. Члены ПМК на учебном материале конкретных занятий взаимно помогают отрефлексировать – как необходимо изменить методику проведения занятия, каким образом необходимо переработать содержание занятия, как учебное занятие в целом переосмыслить с целью придания педагогическому мышлению большей степени надситуативности. При этом важно не постоянное сопровождение преподавателя, а предоставление возможности осознанно перестраивать свою деятельность. Поэтому как единичное мы в первую очередь рассматриваем самостоятельную рефлексия, но в случае формирования педагогического мышления у начинающего преподавателя вспомогательную роль может выполнять методический руководитель педагогической практики или профессионального становления.

Общее в предлагаемой методике в то же время является по-своему и особенным, учитывая ведомственный характер учебного заведения. Несмотря на то, что, как было сказано ранее, проблеме педагогического мышления в гражданских вузах уделялось достаточно внимания, простой «перенос» теоретических и практических наработок в военно-педагогическую систему зачастую невозможен.

В частности, важно обратить внимание на особенности осуществления коммуникативной деятельности. В военном вузе ряд ситуаций, которые описываются в существующих опросниках, носят исключительный характер и подлежат решению в установленном законодательством порядке привлечения обучающегося к дисциплинарной ответственности. Например, два опросника – опросник-определитель доминирующего уровня проблемности при решении педагогических задач [2] и опросник выявления ситуативного/надситуативного уровня педагогического мышления [2] выясняют порядок действий

преподавателя в случае объявления преподавателю бойкота или при самовольном покидании аудитории одним из обучающихся.

В то же время, по мнению авторов, содержание опросника на определение доминирующего уровня проблемности при решении педагогических проблемных ситуаций [2] позволяет использовать его в военном вузе – и для рефлексии, и как схему наблюдений для председателя ПМК или иного лица, осуществляющего контроль учебного занятия.

В целом взаимодействие КПиПК и ПМК по формированию педагогического мышления преподавателей целесообразно осуществлять, используя возможности электронной информационно-образовательной среды (ЭИОС) военного вуза, в разделе «Методическая деятельность». Потенциал ЭИОС как платформы педагогического развития, в том числе формирования педагогического мышления, всех категорий педагогических работников военного вуза, места дискуссий и обратной связи начинающих и опытных педагогов, велик.

Следует подчеркнуть, что использование ЭИОС становится особенно актуальным в условиях самоизоляции.

Эффективному развитию надситуативности педагогического мышления преподавателя военной истории служит следующее осуществление указанных выше видов деятельности. На прогностическом этапе речь идет в большей степени о прогнозе возникновения педагогических ситуаций, эффективное разрешение которых предполагает «выход» на надситуативный уровень. Учитывая, что для воспитательных педагогических ситуаций «выходы» в большей степени носят спонтанный характер, чем для дидактических, в данной статье мы уделим большее внимание последнему типу ситуаций.

Во-первых, преподавателю необходимо прогнозировать развитие формируемой педагогической ситуации с точки зрения возможности создания надситуативной проблемности с учетом целей и задач учебной дисциплины «Военная история», учебных возможностей обучающихся, собственных педагогических способностей.

Во-вторых, следует выдвигать педагогические цели, увязывая определенное учебное занятие с другими занятиями раздела, всей учебной дисциплины, оперативно-тактических учебных дисциплин, для которых «Военная история» носит предваряющий, вводный характер, а также с предстоящей профессиональной деятельностью выпускника вуза.

На наш взгляд, перечисленные положения должны учитываться при определении – каким образом структура учебной дисциплины должна быть выстроена, каким образом будут проектироваться и конструироваться содержание и методика учебных занятий в целях придания образовательному процессу надситуативного характера.

Элемент надситуативности, в том числе и на прогностическом этапе, заложен в компетентностном подходе, потому что формирование компетенции, как правило, происходит в результате освоения нескольких учебных дисциплин.

Во многом в проектировочной и конструктивной деятельности происходит конкретизация и детализация результата прогностической деятельности – целей, методик, содержания учебных занятий, которые предстоит проводить с учетом выявленных ранее особенностей. Надситуативность здесь будет обусловлена и заблаговременным формулированием вопросов, которые будут задаваться обучающимся на лекциях, в ходе объяснения материала, и при обсуждении темы на семинарах. Общим будет рассмотрение военно-исторических событий не изолированно, а в более широком контексте – как с учетом ранее изученных событий, так и во взаимосвязи с их последствиями.

В организаторской деятельности надситуативность педагогического мышления, на наш взгляд, будет проявляться в умении педагогом оперативно, в ходе изложения и обсуждения учебного материала, интегрировать возможные факты участия предков курсантов в рассматриваемых военно-исторических событиях, находить аналогии в современной военно-политической обстановке. Это будет придавать ситуации мобилизирующий, вовлекающий характер. Также важно умение показать, каким образом знания, полученные при изучении

военной истории, могут быть использованы при изучении специальных дисциплин, в дальнейшей послевузовской служебной деятельности.

Непосредственно в ходе учебных занятий осуществляется и коммуникативная деятельность. Надситуативности педагогического мышления преподавателя здесь способствует понимание возможного стереотипного восприятия им обучающихся и того, что внешние проявления их психики могут быть связаны не с текущей ситуацией, а например, с предстоящим зачетом по другой учебной дисциплине.

Надситуативность при построении межличностного взаимодействия и отношений предполагает рассмотрение военно-исторических событий в психологически значимом для обучающихся контексте, что способствует установлению психологического контакта.

Порядок разрешения ряда экстремальных для военного вуза социально-педагогических ситуаций был указан ранее. Преподаватель не вовлекается в конфликтную ситуацию, а «поднимается над ней», так же как это происходило во время многих военно-исторических событий, когда победы одерживались в том числе благодаря выдержке и хладнокровию.

Очевидно, что рефлексивная деятельность преподавателя в силу рассмотрения педагогического процесса как системы осуществляется не только после проведения учебного занятия, а содержится в каждом из рассмотренных выше видов деятельности, проявляется в умении объяснить сформулированные цели учебной дисциплины, подход к проектированию учебного курса, отбору содержания учебного материала и релевантных методик проведения учебных занятий. Важным в нашем случае является адекватность оценки преподавателем степени развития надситуативности своего педагогического мышления.

Общими критериями сформированности эффективного педагогического мышления являются степень гибкости, системность, креативность, оперативность всех его видов. Их высокий уровень позволяет выявить надситуативную проблемность и найти пути ее решения.

Таким образом, формирование эффективного педагогического мышления преподавателя как показателя его профессиональной компетентности есть целенаправленный процесс самосовершенствования преподавателя, он имеет особенности, обусловленные содержанием и методикой преподавания учебных дисциплин, что и показано на примере военной истории.

Формированию надситуативного педагогического мышления способствует согласованная деятельность курсов переподготовки и повышения квалификации педагогических кадров, предметно-методических комиссий, всех педагогических работников.

Указанное взаимодействие целесообразно осуществлять, используя потенциал раздела «Методическая деятельность» электронной информационно-образовательной среды военного вуза.

В условиях самоизоляции использование такой платформы развития педагогического мышления в качестве пространства для дискуссий и обратной связи, как опытных, так и начинающих педагогов и их методических руководителей, становится особенно актуальным.

Список используемых источников

1. Педагогическая психология: учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. Н.В. Ключевой. – М.: ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – 400 с.
2. *Кашанов М.М.* Психология профессионального педагогического мышления: дис.... д-ра психол. наук. – Ярославль, 2000. – 444 с.
3. *Коточигова Е.В.* Психологические особенности творческого педагогического мышления: дис.... канд. психол. наук. – Ярославль, 2002. – 122 с.
4. *Куони Е.Ю.* Формирование педагогического мышления у студентов классического университета: дис. ... канд педагог. наук. – Калуга, 2009. – 267 с.
5. *Осипова Е.К.* Психологические основы формирования профессионального мышления учителя: дис. ... д-ра психол. наук. – М., 1988. – 302 с.

6. *Ракитская О.Н.* Социально-психологические характеристики педагогического мышления преподавателя высшей школы: дис. ...канд. психол. наук. – Ярославль, 2007. – 181 с.

7. *Никитина Н.Н., Кислинская Н.В.* Введение в педагогическую деятельность: теория и практика. – М.: Академия, 2004. – 214 с.

Л.Я. Козлова,
кандидат филологических наук

ПРАКТИКУМ ПО ВНЕАУДИТОРНОМУ ЧТЕНИЮ КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ВОЕННО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ

В статье представлен инновационный подход, который заключается в том, что вся работа с «Практикумом по внеаудиторному чтению» на старших курсах проводится в русле инновационной методики обучения профессионально-ориентированному чтению в военном вузе. Данный подход применен в рамках педагогического эксперимента «Инновационная методика интегрированного обучения иностранному языку на старших курсах ВКА им. А.Ф. Можайского» на кафедре иностранных языков. Описан поэтапный алгоритм работы преподавателя иностранного языка с целью формирования военно-профессиональной компетенции курсантов в условиях критически малой учебной нагрузки.

Ключевые слова: военно-профессиональная компетенция, инновационная методика, профессионально-ориентированный, аутентичный текст, практикум по внеаудиторному чтению, терминологический глоссарий, ментальная карта.

Внешние и внутренние вызовы и тенденции развития современного постиндустриального общества предъявляют соответствующие требования к повышению конкурентоспособности личности, образовательных институтов и в конечном итоге экономики и государства. Этому во многом способствует личностно-ориентированная модель профессионального образования.

В «Концепции Федеральной целевой программы развития образования на 2016–2020 годы» делается акцент на актуальности и целесообразности «нового облика системы образования как системы, создающей условия и возможности для личностного и профессионального развития при гарантии их качества». Здесь указывается ряд актуальных задач, стоящих на настоящий момент перед российским образованием, таких как:

- реализация «перспективных прорывных разработок по созданию и внедрению передовых моделей, программ, технологий и решений в области образования»;
- достижение «высокого стандарта качества содержания и технологий для всех видов образования», в том числе профессионального (включая высшее);
- «обеспечение реализации индивидуальных траекторий обучающихся»;
- «повышение конкурентоспособности российского образования» [1].

В приказе № 95 Министерства образования и науки РФ от 09.02.2018 «Об утверждении федерального государственного стандарта высшего образования – специалитет по специальности 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы» указано, что программа специалитета должна способствовать формированию общепрофессиональной компетенции (ОПК-8), которая выражается в следующем: «способен анализировать, систематизировать и применять в сфере профессиональной деятельности научно-техническую информацию, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии» [2].

В Рабочей программе по иностранному языку ВКА им. А.Ф. Можайского указано, что владение иностранным языком должно способствовать формированию военно-профессиональной компетенции ВПК.ПК-20, которая выражается в следующем: «способен применять иностранный язык в военно-профессиональной деятельности для получения и анализа информации о современных достижениях науки и техники в конкретной предметной области» [3].

Обзор литературы по теме нашего исследования позволяет констатировать следующие положения.

1. «Преобладающие сегодня в высшей военной школе методы традиционного обучения уже не в полной мере способствуют развитию социально-личностных качеств будущих офицеров и не обеспечивают формирование военно-профессиональных компетенций в соответствии с квалификационными требованиями, изложенными в руководящих документах» [4].

2. «В современных условиях немаловажной компетенцией военнослужащих является информационная. Представляется, что важнейшим показателем их информационной образованности является успешность выполнения функциональных задач» [5].

3. «Опыт работы в вузе показал, что самостоятельная работа формирует культуру ответственного труда, развивает навыки работы со словарно-справочной литературой, что способствует формированию общекультурных и общепрофессиональных компетенций. Внеаудиторное чтение – важное звено в организации всей работы по обучению курсантов чтению аутентичных иноязычных текстов» [6].

4. «Чтение как самостоятельный вид речевой деятельности и как средство формирования и контроля речевых умений и навыков приобретает наибольшее значение в условиях небольшого количества аудиторных часов» [7].

5. «... Внеаудиторный практикум, включающий огромное разнообразие направлений и видов работы по самостоятельному освоению курсантами языкового материала, является несомненным шагом вперед в методике преподавания иностранных языков» [8].

Вопросы военно-профессиональных компетенций и компетентности рассматриваются в ряде статей с точки зрения компетентностного подхода в обучении (Л.В. Долманюк [9], И.Ф. Бережная, А.Г. Смеянов, А.А. Ширан [5], Р.С. Федюк [10], Н.И. Николаева, А.С. Сопова [11], А.Л. Снигирев [4] и др.).

В нашей работе под военно-профессиональной компетенцией мы понимаем способность осуществлять конкретную деятельность в военной области на основе применения профессиональных знаний и умений и проявления личностных качеств, делающих эту деятельность успешной.

Основная проблема преподавания иностранных языков на 3–5-м курсах ВКА заключается в критически малой учебной нагрузке (6–12 часов в течение каждого семестра) и переносом основного акцента на самостоятельную работу. За это время можно перевести всего несколько текстов и проработать несколько грамматических явлений. Вне всякого сомнения, такой подход не представляется эффективным для обучения курсантов иностранному языку. Следует сделать вывод, что в масштабах академии данная военно-профессиональная компетенция сформирована на недостаточном уровне.

Для решения возникшей проблемы и создания оптимального алгоритма обучения иностранному языку на продвинутом этапе обучения, отвечающего требованиям Федеральных государственных стандартов третьего поколения, кафедра иностранных языков проводит педагогический эксперимент под названием «Инновационная методика интегрированного обучения иностранному языку на старших курсах ВКА им. А.Ф. Можайского».

Объектом нашего исследования является учебная деятельность по иностранному языку курсантов старших курсов ВКА им. А.Ф. Можайского. Предмет исследования: процесс формирования военно-профессиональной компетенции ВПК.ПК-20. Цель исследования: теоретическое обоснование, разработка и опытная реализация инновационной методики «Практикум по внеаудиторному чтению» для формирования навыков и умений внеаудиторного чтения при изучении английского языка курсантами старших курсов ВКА им. А.Ф. Можайского.

Для успешной реализации поставленной цели в данной работе использованы следующие методы: а) теоретические – теоретико-методологический анализ; понятийно-терминологический анализ; б) практические – изучение нормативно-правовых документов в области методики обучения иностранным языкам, подготовки курсантов военных специальностей; исследование и обобщение эффективного опыта внеаудиторного чтения в военном вузе; опытно-исследовательская работа, наблюдение, описание.

Практикум по внеаудиторному чтению на старших курсах в указанном эксперименте является инновационной методикой обучения профессионально-ориентированному чтению в военном вузе и в этом заключается научная новизна данного исследования.

Согласно мнению М.Ю. Олешкова, задача преподавателя не столько в том, чтобы «передать обучаемому определенный объем знаний, сколько *помочь ему освоить виды деятельности, владея которыми, он сам в любой ситуации сможет находить необходимую информацию*» [12]. Деятельностный подход и личностно-ориентированное образование способствуют развитию *самоорганизации и самостоятельности* обучающегося, индивидуализации и дифференциации в обучении. Весь комплекс поставленных задач, безусловно, базируется на *традиционной педагогике*, но тем не менее требует выхода на качественно новый, «*технологический*» уровень.

«Эксперимент – это исследовательская деятельность, предназначенная для проверки выдвинутой гипотезы, разворачиваемая в естественных или искусственных условиях, результатом которой является новое знание, включающее в себя выделение существенных факторов, влияющих на результаты педагогической деятельности» [13]. «Чтение – это мотивированный, рецептивный, опосредованный вид речевой деятельности, протекающий во внутреннем плане, нацеленный на извлечение информации из письменно фиксированного текста, протекающий на основе процессов зрительного восприятия произвольной кратковременной памяти и перекодировки информации» [14].

Далее подробно остановимся на основных положениях нашего исследования. Педагогический эксперимент «Инновационная методика интегрированного обучения иностранному языку на старших курсах ВКА им. А.Ф. Можайского» представлен в виде практикума по внеаудиторному чтению, включающего 6 или 12 аудиторных часов, не менее двух общих консультаций по 2 академических часа и дополнительного индивидуального консультирования. Дидактическая цель «Практикума по внеаудиторному чтению» – формирование военно-профессиональной компетенции ВПК.ПК-20.

Курсанты должны **знать**: техническую терминологию и сокращения, принятые в зарубежной технической литературе по своей специальности; особенности научно-технического подстиля изложения; грамматические явления, характерные для научно-технических текстов и мануалов на английском языке.

Курсанты должны **уметь**: оценивать актуальность, новизну и значимость публикаций для расширения и пополнения знаний по изучаемой специальности; выявлять главную и второстепенную информацию в тексте; находить ключевые термины; читать со словарем тексты по специальности с извлечением полной информации; читать без словаря любые научно-технические тексты с извлечением основной информации; использовать основные виды словарно-справочной литературы.

Курсанты должны **владеть** навыками: анализа информационных потоков; перевода специальной профессионально-ориентированной литературы; создания вторичных текстов на основе реферирования и аннотирования и технологии mindmapping; определения принципа работы иностранного технического устройства по его эксплуатационной документации.

У курсанта должны быть сформированы следующие личностные качества: трудолюбие, целеустремленность, самостоятельность, самоорганизация, критическое и аналитическое мышление, профессиональный интерес в области интеграции иностранного языка и специальности обучения.

Практикум по внеаудиторному чтению включает в себя три компонента: организационный, содержательный и методический.

Организационный компонент. Этот компонент заключается в выявлении существующих у курсантов представлений о роли иностранного языка в совершенствовании знаний в профессиональной области, мотивации курсантов к выполнению предстоящей интегрированной деятельности. Деятельность преподавателя при этом – прогностическая и конструктивная.

Содержательный компонент. Для данного эксперимента большое значение имеют критерии отбора текста для практикума по внеаудиторному чтению. Во-первых, текст должен быть аутентичным (аутентичный текст – это текст, который не был изначально приспособлен для учебных целей, это текст, написанный для носителей языка носителями языка). Во-вторых, статья должна быть профессионально-ориентированной, несущей значимую для обучаемых информацию, соответствующую их возрастным особенностям и интересам. Третье немаловажное условие – статья должна быть научной и иметь стандартную структуру. Последний критерий – статья должна быть написана научно-техническим стилем речи. Поэтому при поиске курсантами необходимой статьи преподаватель тщательно отбраковывает следующие варианты: а) статьи, написанные не носителями английского языка; б) тексты, взятые не с инженерных или других профессионально-ориентированных сайтов; в) статьи, не имеющие автора и не указывающие источник информации; г) тексты, взятые из википедии или написанные научно-популярным стилем речи.

При работе со статьей выделяются несколько рабочих этапов: предтекстовый, текстовый, послетекстовый и итоговый, каждый из которых наполнен специфическим содержанием.

Предтекстовый этап включает в себя отбор профессионально-значимой информации: а) ознакомительное и поисковое чтение, выбор темы и источника публикации, поиск профессионально-ориентированной статьи на инженерном сайте; б) консультация с научным руководителем и одобрение статьи преподавателем английского языка.

На текстовом этапе обучающиеся выявляют смысл (смыслы) публикации; работают с терминологией, ищут адекватные эквиваленты передачи смысла на родном языке. Курсанты выполняют поисковое чтение: поиск ключевых слов и выражений в тексте и составляют терминологический глоссарий, который впоследствии должен быть сдан наизусть. Повторное углубленное чтение статьи с использованием глоссария и указанных переводческих сайтов с целью осознанного понимания прочитанного.

Послетекстовый этап включает подготовку курсантами итоговых отчетных документов – терминологического глоссария, эссе, ментальной карты в электронном и письменном виде, демонстрирующих степень осмысления иноязычной профессионально-ориентированной информации. Затем курсанты сдают перевод профессионально-ориентированной статьи с листа.

На итоговом этапе проводится открытое зачетное аудиторное занятие, на котором происходит анализ отчетов курсантов и подведение итогов.

Методический компонент. «Методика в образовании – описание конкретных приемов, способов, техник педагогической деятельности в отдельных образовательных процессах» [15].

Технические средства, используемые в эксперименте: сайты, порталы, базы данных, электронные библиотеки, мультимедийное оборудование на отчетном оценочном этапе. Статья должна быть взята с англоязычного сайта инженерной направленности и/или из другого источника, имеющего профессионально-ориентированную направленность в соответствии с темой курсовой или дипломной работы. Предлагаются сайты www.ieee.com или www.sciencedirect.com, реже www.clarivate.com или www.scopus.com. Портал IEEE позиционирует себя как самую большую в мире профессионально-техническую некоммерческую организацию, имеющую целью продвижение технологий в интересах человечества и предлагает доступ к инновационным технологиям, передовой информации и различным интернет-возможностям. Эта платформа объединяет более 420000 специалистов в области инжиниринга и различных видов технологий. В электронной библиотеке данного портала под названием IEEE Xplore Digital Library имеется более 5 миллионов документов научно-технического содержания.

Портал научной периодики на английском языке Sciencedirect на платформе издательства Elsevier содержит 2500 научных журналов и 26000 электронных книг, имеет более 900 000 статей в открытом доступе по разным направлениям исследований, в том числе в области инжиниринга.

База данных Scopus издательства Elsevier индексирует 24000 названий научных изданий по техническим, медицинским и гуманитарным наукам, имеется весьма крупная патентная база данных. Для нашей академии актуальны статьи по следующим тематическим разделам: компьютерные науки, энергетика, науки о Земле и планетах и др. Крупнейшая база данных Web of science, управляемая независимой компанией Clarivate Analytics, охватывает материалы по естественным, техническим, общественным, гуманитарным наукам и искусству. Представлен объем данных более чем 34 000 журналов.

При переводе слов рекомендуется использовать электронные словари по профессиональной направленности: англо-русский военный словарь на <https://translate.academic.ru> или <https://dic.academic.ru/> и <https://multitrans.ru> (где также можно посмотреть толкование того или иного непонятного термина), англо-русский словарь военных терминов онлайн <https://en-rus-military-terms.slovaronline.com/>, а также специальные онлайн-словари. Преподавателям рекомендуется отучать курсантов от использования переводчиков гугл и яндекс, которые не являются профессионально-ориентированными.

Далее мы описываем систему приемов и методик отслеживания, контроля и коррекции учебно-познавательной деятельности курсантов для достижения дидактической цели на указанных выше четырех этапах.

Предтекстовый этап. Этот этап включает тестирование, фронтальный опрос, беседу. Мотивация курсантов с использованием аргументации, учебно-профессионального и личного интереса. Консультирование научного руководителя специальной кафедры (ее можно провести до и после поиска статьи) и одобрение статьи преподавателем английского языка. Научный руководитель и преподаватель английского языка просматривают статьи на соответствие определенным критериям. Курсанты приступают к ознакомительному чтению статьи только после того, как статья одобрена преподавателями 113 и специальной кафедр.

Текстовый этап. На текстовом этапе преподаватель английского языка выполняет роль тьютора, помогая снять трудности при выявлении смысла (смыслов) публикации, поиске ключевых слов и выражений в тексте и составлении терминологического глоссария. На этом этапе осуществляется коррекция представленных вариантов глоссария с точки зрения адекватности терминологии и соответствия теме статьи и проверка правильности транскрипции и точности перевода. Текущий контроль заключается в том, что терминологический глоссарий сдается преподавателю на оценку. Глоссарий должен быть также представлен в отпечатанном виде для отчета. Тьюторское консультирование курсантов продолжается при повторном углубленном чтении статьи.

Послетекстовый этап. Этот этап связан с переводом главной и второстепенной информации текста в другую знаковую систему путем создания ментальной карты (вторичного текста).

Ментальная карта (mind mapping) – удобный способ структурирования информации и визуализации мышления, при котором происходит радиальная схема записи понятий. Главная идея находится в центре листа, а связанные с ней идеи, темы и понятия располагаются центрально-горизонтально в виде ответвлений разного цвета и ширины. МК представляет собой иерархическую структуру, иллюстрирует взаимосвязь между идеями, темами, подтемами и микротемами статьи. Сначала идут более важные идеи и темы, они указываются более жирными линиями, затем менее важные – подтемы – прорисовываются более тонкими линиями, и далее – микротемы, которые, как правило, представлены на отдельных «полочках» в виде прямоугольников. Обычно ментальная карта представляется как разноцветная диаграмма (темы, подтемы и микротемы соответственно имеют отдельный цвет и зрительно отделяются друг от друга) на листе формата А4. МК является очень эффективным средством обучения аналитическому чтению и вообще эффективной обучающей методикой. Далее следует консультирование, проверка и коррекция созданных ментальных карт. Текущий контроль итоговых отчетных документов – терминологического глоссария, эссе, ментальной карты в электронном и письменном виде, демонстрирующих степень осмысления иноязычной про-

фессионально-ориентированной информации. Каждый обучающийся формирует файл с титульным листом, оформленным стандартно. Ответственный по дисциплине «иностранный язык» в каждой группе собирает все отчетные документы курсантов в отдельную папку по алфавиту с указанием названия статей.

Прием перевода преподавателем английского языка профессионально-ориентированной статьи с листа. Готовясь к данному модулю, обучающиеся могут использовать предложенные системы автоматического перевода. Однако преподаватель акцентирует внимание курсантов, что при сдаче перевода статьи они не будут иметь права читать написанный перевод. Цель всей многотрудной работы с профессионально-ориентированным текстом заключается в том, чтобы курсанты старших курсов могли более-менее свободно переводить текст с листа (т. е. имея перед глазами только статью на иностранном языке, могли не пользоваться ее переводом на русский язык).

Итоговый этап. На открытом зачетном занятии преподаватели кафедры иностранных языков и специальной кафедры совместно заслушивают и оценивают реферативное эссе по прочитанной статье на русском/английском языке и защиту ментальной карты, которые иллюстрируют степень сформированности знаний, умений и навыков в указанной военно-профессиональной компетенции.

Таким образом, на промежуточном этапе можно констатировать эффективность и целесообразность педагогического эксперимента «Инновационная методика интегрированного обучения иностранному языку на старших курсах ВКА им. А.Ф. Можайского», проводимого командой преподавателей 113-й кафедры в сотрудничестве с другими специализированными кафедрами. Оптимизация образовательного процесса в данном педагогическом эксперименте достигается посредством инновационной методики «Практикум по внеаудиторному чтению» на старших курсах ВКА имени А.Ф. Можайского, которая совмещает в себе несколько прорывных концепций в образовании: деятельностный подход, обеспечивающий самоорганизацию и самостоятельность обучающихся; личностно-ориентированное обучение; индивидуализацию обучения; дифференцированный подход.

Знания, навыки и умения, приобретенные курсантами во время практикума по внеаудиторному чтению, способствуют формированию военно-профессиональной компетенции ВПК.ПК-20 и учат курсантов применять иностранный язык в военно-профессиональной деятельности для получения и анализа информации о современных достижениях науки и техники в изучаемой предметной области.

Список используемых источников

1. Концепция Федеральной целевой программы развития образования на 2016-2020 годы. – URL: <http://static.government.ru/media/files/mlorxfXbbCk.pdf/> (дата обращения: 05.02.2020).
2. Об утверждении федерального государственного стандарта высшего образования – специалитет по специальности 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы»: приказ № 95 Министерства образования и науки РФ от 09.02.2018. – URL: http://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Spec/110502_C_3_09032018.pdf/ (дата обращения: 05.02.2020).
3. Рабочая программа по дисциплине «Иностранный / английский язык» (специалитет). – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018.
4. *Снигирев А.Л.* Учебное моделирование в процессе формирования военно-профессиональных компетенций будущих офицеров. – URL: <http://diss.seluk.ru/avpedagogika/695572-1-uchebnoe-modelirovanie-processe-formirovaniya-voenno-professionalnih-kompetenciya-buduschih-oficerov.php/> (дата обращения: 30.12.2020).

5. *Бережная И.Ф., Смянов А.Г., Ширан А.А.* Компетентностный подход и его особенности в военном образовании. – URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/educ/2020/02/2020-02-04.pdf> (дата обращения: 30.12.2020).
6. *Апалько И.Ю.* Организация внеаудиторного чтения по английскому языку в военном вузе // Педагогическое мастерство и педагогические технологии: материалы VIII Международной науч.-практической конф. (Чебоксары, 17 июля 2016 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – С. 41–42. – Doi:10.21661/r-112469/.
7. *Каленцова Т.В.* Из опыта работы по совершенствованию методики чтения текстов на иностранном языке у студентов неязыковых специальностей // Молодой ученый. – 2014. – № 17 (76). – С. 489–491. – URL: <https://moluch.ru/archive/76/13111/> (дата обращения: 02.01.2021).
8. *Николаева Н.И., Сопова А.С.* Система организации внеаудиторного практикума по иностранному языку в военном авиационном вузе. – URL: <https://interactive-plus.ru/e-articles/143/Action143-10794.pdf> (дата обращения: 30.12.2020).
9. *Доломанюк Л.В.* Формирование военно-профессиональной компетенции курсантов в процессе обучения в военных учебных заведениях. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-voenno-professionalnoy-kompetentsii-kursantov-v-protsesse-obucheniya-v-voenno-uchebnyh-zavedeniyah.pdf> (дата обращения: 29.12.2020).
10. *Федюк Р.С.* Формирование профессиональной компетентности будущих офицеров как залог сильной России. – URL: <http://lawinrussia.ru/content/formirovanie-professionalnoy-budushchih-oficerov-kak-zalog-silnoy-rossii> (дата обращения: 28.12.2020).
11. *Николаева Н.И., Сопова А.С.* Формирование профессионально-коммуникативной компетентности будущих военных летчиков в процессе обучения авиационному английскому языку // Молодой ученый. – Казань, 2015. – № 13 (93). – С. 675–678.
12. *Олешков М.Ю.* Педагогическая технология: проблема классификации и реализации // Профессионально-педагогические технологии в теории и практике обучения: сборник научных трудов. – Екатеринбург: РГППУ, 2005. – С. 5–19.
13. Педагогический эксперимент. – URL: https://studme.org/170801/pedagogika/pedagogicheskiy_experiment (дата обращения: 05.02.2020).
14. *Фокина Т.В., Тернова Л.Н., Костычева Н.В.* Методика преподавания иностранного языка: конспект лекций. – М.: Юрайт, Высшее образование, 2009. – 158 с.
15. *Коджаспирова Г.М., Коджаспиров А.Ю.* Словарь по педагогике. – М.: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Изд. центр «МарТ», 2005. – С. 174.

В.Г. Зиновьев,
кандидат техн. наук, доцент;
В.В. Мышко,
кандидат техн. наук, доцент;
В.П. Огородников,
доктор философских наук, профессор

ПРИНЦИП ДЕТЕРМИНИЗМА КАК ОСНОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ДАННЫХ

Рассмотрен принцип детерминизма как философско-методологическое основание вероятностно-статистического подхода к анализу данных. В этом контексте проанализированы особенности и проблемные вопросы содержания категорий вероятности, возможности и действительности, необходимости и случайности, причинности и детерминизма. Обоснована методология вероятностно-статистического подхода к анализу данных.

Ключевые слова: возможность и действительность, необходимость и случайность, причинность и детерминизм, мера, вероятность, вероятностно-статистический подход, анализ данных.

ВВЕДЕНИЕ

Углубляющаяся математизация различных сфер человеческой деятельности, продолжающееся усложнение систем и процессов имеет следствием широкое применение различных методов анализа данных.

В настоящее время одной из важнейших особенностей развития науки и техники является учет неопределенности практически на всех этапах (исследования, разработки, создания, эксплуатации и применения) жизненного цикла сложных систем, в том числе учет различных факторов, влияющих на качество выполнения этих этапов. Вследствие этого ведущее место занимают статистические методы анализа данных, которые, в отличие от детерминированных методов, позволяют учесть многообразие связей и факторов, оказывающих влияние на исследуемые объекты и процессы.

Современные космические средства (КС) характеризуются высоким уровнем сложности. Для контроля их технического состояния с целью управления ими требуется обрабатывать большие (от сотен до десятков тысяч параметров) потоки телеметрической информации (ТМИ). Человек не в состоянии справиться с задачами оперативной и качественной обработки такого объема данных без применения автоматизированных систем специального назначения [1, 5, 17]. Необходимость внедрения автоматизированных систем специального назначения определяется следующими факторами:

- большие потоки ТМИ о функционировании бортовых систем КС приводят к большим объемам вычислений при обработке и анализе ТМИ;
- повышение требования к оперативности управления КС требует получения, обработки и анализа ТМИ в реальном или близком к нему масштабе времени;
- повышаются требования к достоверности получаемой в результате обработки и анализа информации.

Под *информацией*, или *данными*, о каком-либо объекте будем понимать сведения о его свойствах, воспринятые из сообщения и понятые субъектом. Сообщение от объекта к субъекту, которое должно быть интерпретировано и преобразовано в суждение об объекте, осуществляется с помощью материального носителя – сигнала [1, 4].

Однако в обществе информация об объективных и субъективных процессах чаще всего

передается от субъекта к субъекту, но тоже в виде материального носителя (фиксированного на любом языке суждения). Информация должна быть истинной, ибо неистинная информация вовсе не есть информация. Это ставит философский вопрос о критериях истины.

Анализ данных представляет собой область научных знаний, связанную со сбором, обработкой и интерпретацией информации [2, 14–16, 18–20]. *Обработка информации* – любое изменение ее формы и/или содержания.

Совокупность методов, основанных на применении *вероятностно-статистического подхода* к анализу данных, представляет *статистический анализ информации*.

Замечание. Существуют также методы анализа данных, которые априори не основываются на вероятностной природе обрабатываемых данных (например, методы кластер-анализа, многомерного шкалирования, теории измерений) [5, 18].

Важнейшим принципом научного мировоззрения и основанием научной методологии является *принцип детерминизма* [12, 13]. Вне той или иной интерпретации этого принципа невозможно ни сформулировать, ни осуществить вероятностно-статистический подход к анализу и синтезу данных. Более того, раскрытие системы объективной детерминированности процессов является обоснованием и применением любой современной научной методологии, системного, информационного, эволюционного, синергетического и других подходов к изучению природных, социальных и мыслительных процессов.

Объектом изучения в настоящей статье является *статистический анализ информации*, философско-методологическим основанием чего является принцип детерминизма, а теоретической основой – теория вероятностей.

Предметом работы являются следующие философско-методологические аспекты принципа детерминизма, связанные с вероятностно-статистическим подходом к анализу данных:

а) онтологические, отвечающие на вопросы о природе случайности, ее месте в структуре объективной реальности, о взаимоотношении случайности и необходимости;

б) гносеологические, затрагивающие проблемы познания: возможно ли достижение абсолютного знания, какова истинность относительного (неполного) знания, какое место занимает вероятностное знание;

в) методологические, связанные с установлением методологической роли диалектической концепции детерминизма в выяснении сущности вероятностно-статистического подхода к анализу данных, определении его места в системе научного знания.

ПРИРОДА СЛУЧАЙНОСТИ И ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Теория вероятностей и математическая статистика со времени их становления как науки тесно связаны с философскими исследованиями природы случайного и вероятного.

Первым из известных мыслителей, кто поднял проблему случайности и необходимости, был древнегреческий философ Демокрит (ок. 460–370 до н.э.) [8, 9]. Он считал, что в объективном мире всё происходит благодаря действию абсолютно необходимых причинно-следственных связей. Случайность же, по Демокриту, люди выдумали, чтобы прикрывать этим словом незнание истинных причин явлений. Такая позиция была доминирующей на протяжении практически двух с половиной тысячелетий. Самые серьезные ученые принимали постулат существования необходимой причинно-следственной связи в качестве важнейшей предпосылки построения научной теории как в области естествознания, так и в области гуманитарных наук.

Интересно, что выдающийся французский математик, физик и астроном П.С. Лаплас (1749–1827) в начале XIX века так же, как и Демокрит в V веке до н.э., объявил случайность следствием незнания действительных причин. По Лапласу, вся теория вероятностей служит лишь для того, чтобы скомпенсировать незнание и приблизить людей к чистой необходимости причинно-следственного ряда: «Ум, которому были бы известны для какого-либо момен-

та все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее частей, если бы вдобавок он оказался достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движения величайших тел Вселенной наравне с движениями легчайших атомов: не осталось бы ничего, что было бы для него недостоверным, и будущее, так же как и прошлое, предстало бы перед его взором» [7].

Лаплас не понял, что его детерминизм, не оставляя в объективной реальности место случайному, упраздняет этим необходимость всякого изучения мира, разработки всякой теории, включая и теорию вероятностей. Если состояние всякой системы с «железной» необходимостью однозначно определяет будущее ее состояние, то изучение этой необходимости не дает человечеству никакой свободы выбора направленности его жизнедеятельности, вопреки утверждению Б. Спинозы (1632–1677), что свобода есть осознанная необходимость. Объективная необходимость причинно-следственного ряда делает человека беспомощным перед фатальной неизбежностью будущего. Мышление становится «даром напрасным», ибо не может служить целесообразной основой действия.

В XIX веке появились концепции, противоположные лапласовскому детерминизму. Так, А. Шопенгауэр (1788–1860) утверждал, что миром управляет некая безличная и лишенная разума, иррациональная «мировая воля». Спонтанные «выплески» мировой воли определяют случайность всего существующего, всех материальных и идеальных процессов. Абсолютизация объективной случайности, упразднение закономерности превращает мир в хаос. Метафизические (антидиалектические) противоположности сходятся – индетерминизм Шопенгауэра и всех его последователей делает человека еще более беспомощным, чем лапласовский детерминизм. В иррациональном мире невозможно ни действовать рационально, ни даже просто существовать.

Противопоставление необходимости и случайности приводит к появлению трех ложных альтернатив, являющихся серьезным препятствием для структурирования современного научного мировоззрения в целом, отдельных «картин мира» (в особенности социальной) и методологии научного познания: 1) лапласовского детерминизма – индетерминизма; 2) необходимости – свободы, 3) абсолютного монизма – плюрализма.

Не представляя диалектического единства противоположностей, эти дилеммы при любом варианте выбора внутри них или между ними ведут к метафизическим (антидиалектическим) концепциям типа телеологии, неовитализма, «теории факторов», фатализма, волюнтаризма и т. п. [13]. Все эти концепции несовместимы с теорией вероятностей и ее практическим использованием.

Решение указанной проблематики предлагается диалектико-материалистической концепцией детерминизма. Эта концепция подразумевает теоретическую реконструкцию системы типов детерминаций, определяющих развитие любой системы как реализацию ее возможностей, воплощение ее в действительность, что требует различения типов и форм детерминации. Типы детерминации относятся к связи взаимодействия разных систем, формы детерминации – к связи состояний различных этапов, моментов развития одной и той же системы.

Детерминизм распространяется на отношение взаимодействия, относительно активная сторона которого характеризует не только зависимость, но и изменение одного момента, стороны взаимодействия другими, т. е. детерминацию. Зависимость же может быть и недетерминационного характера (пример математической зависимости – зависимость длины гипотенузы от длин катетов). Во всех подобных случаях нет детерминации.

Коснувшись проблемы отличия формы детерминирующих связей от их содержания, мы должны выяснить (в первом пока приближении) различие между типами и формами детерминаций. Далеко не все всеобщие, отражающие атрибуты материи категории характеризуют содержание процесса детерминации, т. е. отвечают на вопрос, каков конкретный характер воздействия активной стороны взаимодействия – детерминанта на пассивную – детерминируемое. Так, пространство и время сами по себе ничего не детерминируют и, являясь характеристиками изменения материи, могут лишь «свидетельствовать» о наличии детерминации

определенного типа (последнее обстоятельство раскрывается в теоремах Э. Неттер и в общей теории относительности) [12].

Не выступают в качестве детерминантов и количественно-качественные характеристики. И количество, и качество имеют источники своего изменения, но сами не являются детерминантами процессов. Поэтому количество регистрируемых в статистическом анализе случаев само по себе не детерминирует вероятностно-статистический анализ данных.

Наконец, наиболее фундаментальные (как в историческом, так и в логическом плане) категории детерминизма – «необходимость» и «случайность» также не отражают типы детерминаций, то есть активные стороны взаимодействия.

Необходимость, как показал Г. Гегель (1770–1831), является процессом, и в качестве процесса сама выступает чем-то детерминируемым. Случайность – объективно-реальная форма процесса необходимости – также не является типом детерминации. При этом следует отличать случайности-проявления относительной необходимости и случайности-дополнения необходимости. Случайности-проявления характеризуют форму бытия каузального типа детерминации. Случайности-дополнения – форма бытия не причинных типов детерминации – условий, функциональной детерминации, инспирирующей детерминации (например, повода).

Формы детерминирующих связей следует отличать как от типов детерминаций, так и от видов детерминирующих связей. Последние характеризуются гносеологическими (детерминация познавательной деятельности, научного открытия), этическими и другими категориями сферы социального бытия, специальными понятиями и терминами науки (детерминация специфических процессов в области физики, химии, биологии и т. д.). Типы же детерминаций выявляются как факторы, действующие в процессе реализации возможностей материального объекта, образующие систему его становления и развития.

Причина, порождающая фактор, выступает главным, системообразующим типом детерминации любого процесса. Причина – раскрывающееся противоречие. Возможность к изменению в каком-то отношении является тенденцией присущей системе именно благодаря наличию в ней внутреннего противоречия. Отсутствие в какой-то системе внутреннего противоречия в определенном отношении означает отсутствие у системы возможности к изменению в этом отношении. На рис. 1 представлена схема, раскрывающая соотношение секторов возможного и невозможного для некоторой действительности Д.



Рис. 1. Возможное и невозможное действительности Д

Непричинные детерминации опосредуют действие причины и способствуют ее реализации, то есть превращению в действительность. Если система обладает внутренним противоречием, но отсутствуют относительно внешние непричинные детерминанты, то вероятность реализации такой возможности стремится к нулю. Эта ситуация обозначается термином «абстрактная возможность» (рис. 2).

Рассмотрение того, как происходит взаимодействие, определение относительно активных сторон конкретного взаимодействия (детерминантов) позволяет раскрыть систему причинных и непричинных детерминантов процесса реализации возможности – каузального, кондичонального, функционального, инспирирующего, системного и управляющего типов детерминаций [13].

Применение данной системы к анализу любого процесса, в том числе и к процессу научного познания, позволяет установить конкретную форму проявления диалектического единства устойчивого и изменчивого, сущностного и явленческого, необходимого и случайного, повторяющегося и неповторимого, общего и единичного в изучаемом процессе, избежать метафизических (антидиалектических) противопоставлений и абсолютизаций.



Рис. 2. Абстрактные и реальные возможности

Система причинных и не причинных детерминаций, действующая в процессе реализации возможности, представлена на рис. 3.

В настоящей работе нас особенно интересует связь необходимого и случайного. Подходы к решению вопроса заложены Гегелем, который охарактеризовал случайность как форму бытия необходимости. Однако эта дефиниция интерпретируется очень различно. Нам представляется, что связь необходимости как сущности, а случайности как явления (формы бытия сущности) лучше всего выясняется через закон

единства количественных и качественных изменений, наиболее отчетливо раскрытый тем же Гегелем в категории «мера».

Закон меры предполагает, что свойство (как элемента качества) любого объекта (явления, процесса, момента объективной и субъективной реальности) существует в рамках определенной количественной меры. Переход через границу меры ведет к прерыву количественной определенности, переходу («скачку») системы в новое или иное качество.

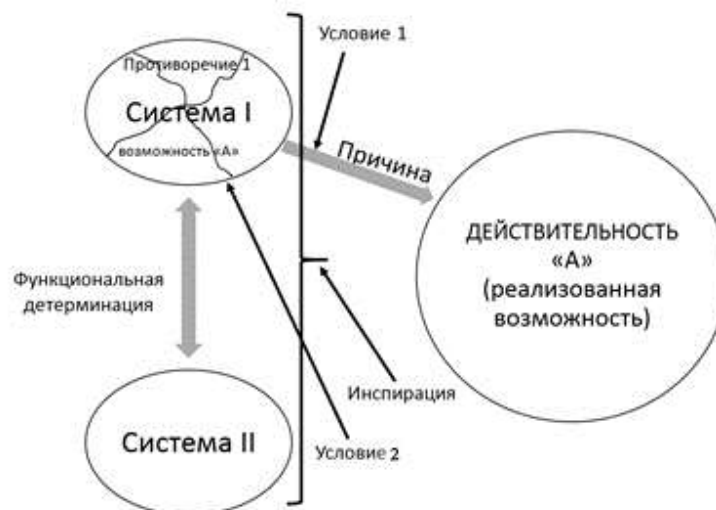


Рис. 3. Система причинных и не причинных детерминаций реализации возможности «А»

Например, размеры, цвет, объем, вес каждого конкретного зерна овса и тому подобные количественные проявления качества могут варьироваться в определенных пределах. Но ни один из этих показателей не может быть ниже или выше допустимого. Так, длина зерна овса варьирует в пределах от 8 до 16,6 мм. При большей или меньшей длине зерно теряет свои существенные свойства (не может существовать зерно длиной 1 мм или 160 мм.) Если мера во всех процессах представляет относительную необходимость, закономерность, устойчивость, то конкретные количественные значения того или иного свойства внутри меры – случайность – форму бытия этой необходимости. Всякая конкретная длина зерна овса от 8 до 16,6 мм, скажем, 9,1 или 14,4 мм будет случайностью – формой бытия необходимости, представленной всем множеством вероятных значений длины зерна. В контексте изложенного рассмотренные выше варианты интерпретации метафизическим детерминизмом и индетерминизмом необходимости и случайности демонстрируют свою абсурдность.

Диалектическая концепция детерминизма раскрывает неразрывную объективную связь необходимого и случайного. Заметим, что все сказанное относится прежде всего к объективным процессам и лишь во вторую очередь – к нашим взглядам на них.

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ДАННЫХ

Вопрос оценивания вероятности как возможности появления случайного события занял длительное время.

Античные философы придерживались принципа дихотомии между *знанием* (*episteme*) и *мнением* (*doxa*). Под знанием понимались истинные (абсолютно достоверные) утверждения, выводимые из очевидных аксиом (как, например, в геометрии Евклида). И единственная цель науки – это достижение истинного знания. Рассуждения, не удовлетворяющие критериям достоверности, относили к разряду мнений. Данный принцип дихотомии практически на две тысячи лет задержал появление теории вероятностей как науки.

В конце XVII века завершилось накопление основных сведений о случайных событиях. В XVIII–XIX веках сформировались понятия классической и статистической вероятностей.

Для дискретных случайных событий Лаплас определил вероятность как отношение числа благоприятных исходов к числу всех возможных.

Замечание. По умолчанию считалось, что все исходы: а) несовместны (появление одного исключает появление остальных); б) образуют полную группу событий (только один из них и никакие другие, не входящие в полную группу событий, произойти не могут); в) равновероятны (равновозможны).

Классическое определение вероятности Лапласа не предполагает обращения к эмпирическому исследованию. При бросании симметричной монеты считается, что выпадение аверса или реверса одинаково вероятно. Данное условие, основанное на равновероятности различных исходов, имеет ограниченную область применения [6, 10]. Другим недостатком этой теории является определение вероятности через равновозможность, которая тождественна равновероятности и, в свою очередь, уже предполагает наличие определения вероятности. Вследствие этого ввели принцип недостаточного основания (индифференции): события считаются равновероятными, если нет оснований предполагать обратное.

Принцип индифферентности реально применим только к таким явлениям, которые имеют симметричные исходы (исходя из логических или физических суждений). Соответственно, вероятность события выступает не как объективная мера возможности события, а как характеристика знаний или даже веры человека.

Появлению у понятия «вероятность» объективного статуса способствует произведенное выше рассмотрение процесса реализации возможности, в котором участвует кроме центральной – причинной детерминации, ряд не причинных детерминаций, опосредующих причину.

Именно не причинные детерминации приводят к тому, что каждая конкретная реализация возможности – действительность выступает случайностью-формой проявления относительной необходимости этого процесса.

Относительная необходимость представляет при этом множество значений (меру), которые характеризуют диапазон вероятных реализаций возможности. При этом вероятность реализации каждого элемента этого множества может быть объективно различна.

Например, конкретная длина зерна овса более или менее вероятна в реализации в зависимости от того, ближе или дальше она находится к экстремальным (минимуму или максимуму) значениям меры, за пределами которых зерно вообще не может существовать в данном своем качестве зерна овса.

Наиболее вероятная длина (мода) представлена в виде оценки – некоторого значения, которое определяется статистически (высчитываемое апостериори) из множества возможных значений, внутри которого реализуется и существует данное качество.

Раскрытие качества как сущности процесса и его количественной меры – задача каждой конкретной науки. Неудачи Пифагора (ок. 570–497/496 до н.э.) с абсолютизацией количественной характеристики как причины всех процессов (нумерология) достаточно красноречиво свидетельствуют о безуспешности попыток разработать и использовать априорную концепцию вероятности.

Именно индуктивный, опирающийся на эмпирически полученные данные метод позволяет раскрыть сущность любого процесса, определить его как реализацию объективных возможностей. На этом основании выясняются и причинные, и не причинные детерминанты процесса.

Развивая индуктивный подход к анализу эмпирических данных, Ф. Бэкон (1561–1626) разработал методы установления причинных связей, которыми до сих пор успешно пользуются во всех областях научного познания. Исследование условий и других не причинных детерминаций, без которых невозможно действие причины, позволяет оценить вероятность реализации любой конкретной возможности.

Математическая вероятность не дает оснований к единству взглядов относительно смысла вероятностных суждений там, где они находят применение. Вместе с тем там, где мы имеем дело с прагматической оценкой деятельности человека, мы неизбежно сталкиваемся с субъективной оценкой вероятности. Однако субъективная оценка вероятности не может объяснить многочисленные факты успешных предсказаний, которые делает современная наука, опираясь на статистические вероятностные представления.

Важной проблемой для всякой концепции является вопрос о том, насколько она может приблизить исследователя к истине, т. е. насколько суждения, полученные при помощи теории, адекватны объективной реальности. В этом контексте многие исследователи высказывали сомнения об истинности полученных индуктивным путем вероятностных суждений. Уже Аристотель (384–322 до н.э.) третирует на этом основании индукцию, предпочитая дедуктивное умозаключение, в котором истинность посылок при соблюдении правил вывода с необходимостью дают истинное заключение.

В XX веке скептицизм в отношении вероятностных суждений высказывал крупнейший логик Р. Карнап (1891–1970). Вместе с тем именно Карнап выдвинул логический критерий истинности суждения, в соответствии с которым суждение считается истинным, если оно построено внутренне логически и не противоречит другим суждениям в рамках данной концепции (теория когерентности). Однако с таких позиций мы должны признать одинаково истинными геоцентрическую концепцию К. Птолемея (ок. 100–170 гг.) и гелиоцентрическую концепцию Н. Коперника (1473–1543).

Математический аппарат теории вероятностей широко и плодотворно применяется на практике в различных областях человеческой деятельности именно благодаря опоре на факты, полученные в эмпирических исследованиях.

В основе научной обработки и анализа экспериментальных данных лежит *вероятностно-статистический подход*.

Большой объем ТМИ и сложность ее структуры определяют следующие основные особенности, затрудняющие непосредственное использование ТМИ.

1. Избыточность:

а) частота опроса параметров рассчитывается из условия изменения их значений в экстремальных (аварийных) ситуациях для достоверного надежного анализа именно этих ситуаций, и во всех других режимах функционирования бортовых систем принятая частота оказывается чрезмерно высокой;

б) одинаковая частота опроса по всем каналам большинства современных многоканальных телеметрических систем предусмотрена для высокодинамичных параметров, поэтому для всех других параметров принятая частота оказывается чрезмерно высокой;

в) с целью компенсации воздействия непредсказуемых причин «сбойные участки» исключаются из обработки, поэтому с расчетом на это повышается частота опроса и запараллеливаются каналы измерений для особо важных параметров;

г) некоторые измеряемые величины связаны между собой функциональными или стохастическими связями, которые были недостаточно известны и учтены при выборе состава измеряемых параметров.

Избыточность является атрибутом ТМИ и в ряде случаев существенно затрудняет процесс

ее обработки и анализа, но в то же время она способствует повышению точности и достоверности результатов обработки и анализа.

2. *Семантическое разнообразие*: в процессе функционирования КС контролируются различные по физической сущности и динамике процессы, происходящие как на КС, так и в окружающей среде.

3. *Погрешности*:

а) порождаемые дискретностью измерений параметров по времени и по уровню их возможных значений;

б) обусловленные внутренними и внешними помехами в сложном тракте получения и передачи ТМИ.

В общем случае, согласно Галилею, погрешность измерения содержит систематическую и случайную составляющие. К систематической относят погрешность, которая остается постоянной или медленно (закономерно) изменяется при повторных измерениях одной и той же величины. Случайная составляющая погрешностью изменяется непредсказуемым образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Кроме того, при недостоверных измерениях (вследствие воздействия помех) ТМИ может характеризоваться *пропуском данных*, поскольку заведомо недостоверные данные не рассматриваются при автоматизированном анализе.

Оцениваемое значение x рассматривается как *случайная величина* $\hat{x} \equiv \xi$ и характеризуется *вероятностью* $P(\hat{x} = x)$ появления в результате проведения эксперимента того или иного значения x .

Значение физической величины или параметра исследуемого объекта определяется экспериментально из предположения, что результат эксперимента (измерения или наблюдения) наиболее близок к истинному – неизвестному значению.

Истинное значение x характеризуется полученной *оценкой* \tilde{x} и *ошибкой* Δx : $x = \tilde{x} + \Delta x$.

Вероятность случайного события – степень объективной возможности его наступления при реализации некоторого комплекса условий (испытания, эксперимента, опыта). Для этого вводится понятие *распределения вероятности* – каждому возможному значению x оцениваемой величины \hat{x} ставится в соответствие вероятность появления этого значения $p(x)$ (для дискретной случайной величины) или плотность вероятности $f(x)$ (для непрерывной случайной величины).

Функцию $f(x; m, \sigma)$ – *плотность вероятности* нормального закона распределения случайной величины \hat{x} можно описать двумя параметрами: *средним значением* m и *средним квадратическим отклонением* σ , которое характеризует разброс значений случайной величины \hat{x} относительно среднего значения m . Тогда можно сказать, с какой вероятностью $f(x)$ истинное значение x находится в заданной области $[m - \sigma, m + \sigma]$ относительно среднего значения m .

Про оцениваемую (измеряемую) величину общепринято говорить, что она «имеет значение m с погрешностью σ ». Для экспериментального построения функции $f(x; m, \sigma)$ необходимо многократно повторить измерения для определения *частоты* появления возможных значений функции. Объем измерений n вносит дополнительную погрешность.

Теория вероятностей как математическая наука изучает закономерности в случайных явлениях [3].

Объектом теории вероятностей является *вероятность*, а предметом – *математический анализ* случайных явлений.

Выше было показано, что в мире нет ни абсолютных случайностей, ни абсолютных необходимостей. Поэтому задачей теории вероятностей является выяснение того, какая именно относительная необходимость, закономерность предстает в наличной действительности в форме случайности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, можно сделать следующие выводы. В основе любого серьезного анализа экспериментальных данных лежит вероятностно-статистический подход, требующий строгих и иногда сложных математических приемов.

Использовать *вероятностно-статистический* подход в отношении анализа данных следует только в контексте диалектической концепции детерминизма, с позиций которой случайное событие является случайностью-проявлением относительной необходимости. При этом сама относительная необходимость представляет собой процесс реализации объективной возможности некоторой системы (систем). Вероятность является мерой реальности возможного и определяется взаимодействием причины и непринципиальных детерминаций процесса становления действительности.

Одной из важных задач преподавателя дисциплин профессионального цикла и специализации является раскрытие философско-методологических аспектов вероятностно-статистического подхода к анализу данных в своей дисциплине.

Преподаватель должен уметь осуществлять синтез философского, математического и естественно-научного начал, показывать на примере своей дисциплины необходимость этих знаний для профессии военного инженера – специалиста в области применения и эксплуатации автоматизированных систем специального назначения.

Рассматривая случайность как форму проявления закономерностей и используя методы статистического анализа информации, мы можем обрабатывать потоки данных, отслеживать, вскрывать и оценивать причинно-следственные связи процессов, воздействующих на космические средства и происходящих внутри них. Полученные оценки и их качество используются для принятия корректных решений о текущем состоянии космических средств, определения штатности и режима их функционирования и целесообразного управления ими.

Список используемых источников

1. Автоматизированная обработка телеметрической информации / В.А. Чикуров [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 473 с.
2. Анализ данных и процессов / А.А. Барсегян [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.
3. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
4. *Зиновьев В.Г., Казаков В.В.* Методы и средства статистической обработки данных. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 166 с.
5. *Зиновьев В.Г., Мышко В.В., Самойлов Е.Б.* Оперативная обработка и анализ многомерной измерительной информации на основе структурно-дескриптивного подхода // Информатика и Космос. – 2008. – № 4. – С. 120–126.
6. *Колмогоров А.Н.* Основные понятия теории вероятностей. – 3-е изд. – М.: ФАЗИС, 1974. – 144 с.
7. *Лаплас П.С.* Опыт философии теории вероятностей. – М.: Либроком, 2011. – 208 с.
8. *Лурье С.Я.* Демокрит. Тексты. Перевод. Исследования. – Л.: Наука, 1970. – 664 с.
9. Материалисты Древней Греции. – М.: ГИПЛ, 1955. – 239 с.
10. *Майстров Л.Е.* Развитие понятия вероятности. – М.: Наука, 1980. – 270 с.
11. *Мизес Р.* Вероятность и статистика. – М.: Либроком, 2009. – 259 с.
12. *Назирова А.Э., Огородников В.П.* История и философия науки. – СПб.: НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2005. – 374 с.
13. *Огородников В.П.* Познание необходимости: Детерминизм как принцип научного мировоззрения. – М.: Мысль, 1985. – 256 с.
14. *Охтилев М.Ю.* Системы искусственного интеллекта и их применение в автоматизиро-

ванных системах мониторинга состояния сложных организационно-технических объектов. – СПб.: ГУАП, 2018. – 261 с.

15. *Рыжиков Ю.И., Зиновьев В.Г.* Обработка экспериментальных данных. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 133 с.

16. *Силен Д., Мейсман А., Али М.* Основы Data Science и Big Data. Python и наука о данных. – СПб.: Питер, 2017. – 336 с.

17. *Степкин В.С., Шмыголь С.С.* Автоматизированная обработка и анализ телеметрической информации. – МО СССР, 1980. – 515 с.

18. *Хименко В.И.* Случайные данные: структура и анализ. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 424 с.

19. *Berman J.J.* Principles of Big Data. Preparing, Sharing and Analyzing Complex Information. – N.Y.: Elsevier, 2013. – 287 p.

20. *Big Data Computing / edited by R. Akerkar.* – N.Y.: CRC Press, 2014. – 560 p.

Ю.Ф. Пивоваров*,

доктор исторических наук, профессор;

С.Г. Шилова*,

кандидат исторических наук

*22-й НИИ (ВИ) ВАГШ ВС РФ, г. Москва

ДИКАЯ ДИВИЗИЯ РАБОЧЕ-КРЕСТЬЯНСКОЙ КРАСНОЙ АРМИИ В ГОДЫ ГРАЖДАНСКОЙ ВОЙНЫ (1919–1920)

Авторы кратко излагают процесс формирования и боевого пути специально созданного соединения РККА в годы Гражданской войны в России в период с 1919 по 1920 гг.: 1-й Красной Кавказской кавалерийской Дикой дивизии. Она была создана по инициативе ее первого легендарного командарма Г.Д. Гая. Основное внимание уделяется созданию дивизии, комплектованию ее частей и подразделений. Показан боевой путь дивизии вплоть до ее расформирования. Статья содержит источниковый и фактологический материал о причинах формирования, структуре и решаемых задачах особого соединения РККА.

Ключевые слова: Гражданская война, Реввоенсовет, Рабоче-Крестьянская Красная Армия, Дикая дивизия, бригада, полк; части и подразделения, командарм, боевые действия, мобилизация, штаты, кадр, добровольцы, офицеры, красноармейцы, место дислокации, расформирование.

Участие народов Северного Кавказа в Гражданской войне на стороне Рабоче-Крестьянской Красной Армии наименее освещено в историографии в сравнении с такими же частями в белых армиях Юга России [2]. В советское время были опубликованы воспоминания, героизировавшие путь частей Красной Армии [3, 4, 12]. В последние годы вышло несколько работ, внесших существенный вклад в изучение формирования Красной Армии [17, 21]. Вместе с тем, несмотря на определенные успехи в изучении темы попыток создания в Рабоче-Крестьянской Красной Армии национальных или территориальных формирований (из народов Северного Кавказа), она нуждается в дальнейшей разработке. Перспективы ее исследования зависят не только от уточнения отдельных вопросов, связанных со строительством вооруженных сил, но и с военно-политической историей народов Северного Кавказа. Немаловажным представляется тот факт, что ряд источников по истории формирования территориальных, национальных частей Красной Армии остается по-прежнему не введенным в научный оборот. Цель настоящей статьи состоит в освещении ранее не исследованной темы истории формирования частей Красной Армии по территориальному признаку. При изучении вопросов территориальных формирований РККА применялись как общенаучные, так и специальные исторические методы исследования, в основе которых заложены принципы научности, историзма, системности и комплексности.

На фронтах Гражданской войны в период с 25 сентября 1919 года по 2 сентября 1920 года действовало специальное боевое соединение Рабоче-Крестьянской Красной Армии (РККА): 1-я Красная Кавказская кавалерийская Дикая дивизия. Она состояла из двух бригад трехполкового состава. В дивизию также входил отдельный стрелковый полк [1]. Название дивизии, как утверждают мемуаристы, придумал лично ее первый командарм Г.Д. Гай – «Железный комдив» [2]. Таким названием дивизии он планировал подчеркнуть особый статус и происхождение дивизии в расчете на продвижение ее на Кавказ, где к ней должны были по замыслу командующего присоединиться горские народы. Отсюда и характеристика «дикая» к названию дивизии, которая завуалированно намекала на славный боевой путь ее предшественницы – Кавказской туземной конной дивизии старой императорской армии, принимавшей участие в Первой мировой войне (1914–1918) и с легкой руки великого князя Николая Николаевича получившей название «дикой» [3]. Отметим, что полки Дикой дивизии импера-

торской армии были отправлены в места своего первоначального формирования, где в середине 1918 года их расформировали.

На протяжении Гражданской войны Дикой дивизией РККА последовательно командовали: Гая Дмитриевич Гай (с 25 сентября 1919 года по 3 марта 1920 года)¹; Павел Ефимович Дыбенко (с 3 марта 1920 года по 11 мая 1920 года); врид Борис Иванович Мартвих (с 11 мая 1920 года по 16 мая 1920 года); Михаил Георгиевич Мейер (с 16 мая 1920 года по 14 августа 1920 года); Виктор Антонович Снарский (с 14 августа 1920 года по 2 сентября 1920 года) [4].

Идея формирования Дикой дивизии в рядах РККА родилась в начале сентября 1919 года, когда советское командование приняло решение объединить борьбу горцев против белых армий генерала А.И. Деникина. По преданию название «дикая дивизия» придумал красный командир Г.Д. Гай, мечтая укомплектовать данное соединение горцами-кавалеристами, как прикомандированными из других частей РККА, так и присоединившимися по пути освобождения Кавказа от добровольческих белых частей. Слово «кавказская» должно было означать, что дивизия состоит из жителей Кавказа. Слово «дикая» из названия дивизии позже убрал ее следующий начальник П.Е. Дыбенко [12]. План Г.Д. Гая о создании такой дивизии поддержал член Революционного военного Совета Республики П.А. Кобзев. Для координации усилий при ее комплектовании по национальному признаку потребовалось распоряжение Главного командования РККА. 2 октября 1919 года было получено распоряжение следующего содержания: «Начвсероглавштаба попросил указать, куда и когда, в каком порядке направлять добровольцев, кои находятся в ведении Всероссийского Главного Штаба. По получении этих указаний немедленно будут сделаны соответствующие распоряжения округам. Список всех частей выслать Вам не представляется возможным» [5].

Частные указания по комплектованию «Дикой дивизии» были разосланы во все воинские части РККА, дислоцирующиеся в Саранске, Рязани, Туле и других городах, контролируемых советской властью. Подобные распоряжения стали поступать в части Красной Армии, начиная с 9 октября 1919 года. Например, начальник штаба 1-й Кавказской Дикой дивизии Э.Ф. Вилумсон в телеграмме начальнику штаба запасной дивизии писал: «Срочно прошу распоряжения об откомандировании из подчиненных Вам пехотных частей, расположенных в Симбирске кавалеристов – казаков и кавказцев, желающих добровольно поступить в 1 Кавказскую Красную дивизию. О последующем прошу уведомить. 9 окт[ября] 1919 №4084/13» [6]. Буквально на следующий день была отправлена еще одна телеграмма следующего содержания: «Прошу срочно распоряжения об откомандировании из отдельных батальонов войск внутренней охраны кавказцев и кавалеристов в формирующуюся в г. Симбирске 1 Красную Кавказскую Дивизию» [7].

На основе оценки архивных источников можно сделать вывод о том, что результативность выполнения подобных распоряжений была крайне низкой и имела множество неясностей по целому ряду причин. Телеграммы у своих адресатов вызывали больше вопросов, чем побуждали к действию. Как видно из телеграмм, не понятно, из какого контингента будет комплектоваться дивизия: из добровольцев, или из мобилизованных, или из тех и других. Всероглавштаб предполагал, что дивизия может пополниться мобилизованными, однако Г.Д. Гай и его начальник штаба горячо протестовали против такого пополнения [8]. Наряду с этим не было утвержденного штата дивизии, в связи с чем возникали вопросы о возможности иметь в штате этой кавалерийской дивизии полк ездящей пехоты и броневой отряд [8]. Кроме того, из-за того что вертикальная структура военной власти в РККА была еще не установлена, возникали проблемы с подчинением нового формирования, в частности, было

¹ Гая Гай (Гайк Бжишкян(ц); 1887–1937) сын народного учителя Д. Бжишкяна, родился 6 (18) февраля 1887 года в городе Тавризе (Персия). Его отец – один из основателей и активный член армянской социал-демократической партии «Гнчак» («Колокол»). – *Прим. авт.*

предположение, что если Г.Д. Гай будет формировать дивизию в составе Запасной армии², то он должен выполнять все приказания Реввоенсовета Запасной армии, а если нет, то кому его дивизия будет подчиняться. Еще одной характерной чертой красноармейских формирований было то, что командиры многих формирований были под властью духа партизанщины, типичным выразителем партизанского духа с крайне пренебрежительным отношением к вышестоящему начальству был и Г.Д. Гай, именно поэтому в одной из телеграмм в переписке между Всероглавштабом и Штабом Запасной армии указывалось: «Отдайте приказание Гаю [в] форме **категорической** – все приказания Реввоенсовета Запасной выполнить беспрекословно, и за этим следить» [8].

Из донесений о проделанной работе по комплектованию дивизии национальным составом видно, что работа командования дивизии в этом вопросе имела серьезные недочеты. А сами отчеты носили формальный характер и содержали в основном частную переписку. По результатам запросов в различные части и соединения РККА приходили ответы, которые говорили об отсутствии нужного контингента для формирования национальной части. Среди немногих ответов на присланные Г.Д. Гаем телеграммы обычно приходила телеграмма, например, с таким содержанием: «Был отправлен один кавалерист Шахов из Усть-Ольска» [9].

В целом дивизия была только номинально сформирована из народов Северного Кавказа и казаков, об этой принадлежности свидетельствовала только форма личного состава дивизии, но не сам его состав. Сохранилось следующее донесение на имя Г.Д. Гая от командира 2-го стрелкового полка первой тульской отдельной бригады Дудкина: «...как кавказец, хотел бы служить во вверенной вам дивизии прошу ходатайства перед тульским губвоенкомом об откомандировании меня с должности командира полка» [10]. Слово «кавказец» здесь употреблено в смысле уроженец Северного Кавказа.

Для расширения базы комплектования Г.Д. Гай послал письмо в г. Самарканд, где попросил открыть набор в дивизию и послать в его распоряжение бывших бойцов его отряда, с которыми он воевал в Туркестане в начале 1918 года.

В связи с имеющимися недостатками по формированию национально-однородного соединения, личный состав частей и подразделений дивизии был в основном укомплектован офицерами и красноармейцами-кавалеристами русской национальности и частично – кубанскими казаками. Офицерский корпус дивизии был представлен офицерами «старой армии». Для примера приведем списочный состав штата одного из полков дивизии [11]:

Соколов Сергей Григорьевич – комполка, в старой армии – поручик;

Рышков Владимир – агитационный организатор, в старой армии – подпоручик;

Заркевич Сергей – казначей, в старой армии – поручик;

Висмин – заведующий хлебопекарней, в старой армии – штабс-капитан;

Васильев Александр – заведующий армейским складом, в старой армии – штабс-капитан;

Николаев Алексей – заведующий мастерской, в старой армии – штабс-капитан;

Березин Анис – заведующий артиллерийским снабжением, в старой армии – подполковник;

Бехтеев Сергей – заведующий конным снабжением, в старой армии – штабс-капитан;

Мейер Михаил Григорьевич – начдив, в старой армии – подполковник, командир полка;

Петров Михаил – начальник снабжения дивизии, в старой армии – подполковник;

Бурмистров Иван, в старой армии – офицер.

Кроме того, в дивизии было значительное количество артиллерийских унтер-офицеров и фельдфебелей, имевших боевой опыт Первой мировой войны, которые вошли в конноартиллерийский дивизион дивизии [12].

² Запасная армия Республики сформирована приказом РВСР от 7 августа 1919 года, дислоцировалась в районах Средней Волги, Заволжья, Предуралья. Штаб армии находился в г. Симбирске, с сентября 1919 года в Казани имела три центра формирования резервов: в Саратове, Алатыре и Ардатове.

Несмотря на такой личный состав, особый характер Дикой дивизии было решено подчеркнуть национальной кавказской формой одежды. До сих пор не известно, чья это была идея, может быть и самого Г.Д. Гая, но дивизия была едва ли не единственным соединением РККА, в котором кавказская национальная форма одежды для бойцов и командиров соединения была установлена в качестве официальной униформы соединения РККА (рис. 1).

Для пошива кавказской национальной одежды в штатах дивизии было создано специальное подразделение на основе следующего распоряжения временно исполняющего должность начальника штаба дивизии Голенкова: «Срочно мобилизовать портных и кожевников для пошива черкесок, и патронташей». Интересно, что черкески для бойцов дивизии были пошиты в Москве [16].

Местом формирования Дикой дивизии должен был быть г. Симбирск. Однако в этом городе не хватило площадей для размещения кавалеристов и лошадей. В связи с этим местом формирования дивизии и ее штаба был выбран г. Саранск, где согласно приказу Реввоенсовета Республики за №1547/309 стала формироваться 1-я Кавказская Дикая дивизия из добровольцев и кавказцев путем набора таковых из всех действующих и запасных полков, а также учреждений и городов республики. В связи с этим были разосланы телеграммы, в которых начдив Г.Д. Гая и Э.Ф. Вилумсон просили «всех желающих и кавказцев направить в Саранск через военкома Пензы», именно полномочный штаба Кавказской дивизии в г. Пензе и губернии был назначен ответственным исполнителем для набора в дивизию кавказцев и кавалеристов [13].



Рис. 1. Форма одежды Дикой дивизии РККА в годы Гражданской войны (1919–1920) [14]

Формирование Дикой дивизии РККА происходило медленно и трудно. Так, в одном из архивных документов указывается, что «... между т. Гаем и Реввоенсоветом Запасной армии начались трения, несомненно, вредные для дела формирования дивизии. Почвой для этих трений служит вопрос о подчиненности. Гай утверждает, что формирование дивизии Реввоенсоветом поручено ему. Связь Запасной армии ограничивается только снабжением. Получено категорическое приказание начштаба Запасной всех собранных и собираемых Гаем добровольцев направлять в Саранск, где, как выяснилось из разговоров с начштабом, уже начато формирование дивизии. Что же касается местонахождения Штаба, то протеста против

его пребывания [в] Симбирске за 600 верст от формируемой им дивизии не встречается... Гая находит возможным формирование бригады продолжать в окрестностях Симбирска радиусом приблизительно с 30 верст, а вторую бригаду заканчивать в Саранске... Необходимо преодолеть неопределенное толкование приказа и точно и ясно и немедленно указать, подчинено ли формирование Дикой дивизии – Запасной? В случае утвердительного ответа приказать категорично подчиняться всем распоряжениям Запасной армии... В настоящее время Гае почти сформирован Штаб дивизии. Имеется 260 лошадей, 240 людей строевых. Лошадей ежедневно прибывает около 40 штук. Люди успешно вербуются. Должны прибыть из Оренбурга, Саранска, Астрахани, Петрограда [в] ближайшее время» [15]. Возникали также проблемы и с подчинением дивизии командованию республиканских войск [18].

Кроме проблем с дислокацией, возникали недостатки и со снабжением, которое оценивалось штабом округа как неудовлетворительное. Так, в одном из донесений от 15 октября 1919 года указывается: «Кто должен нас снабжать... Откуда достать седла и лошадей. Дивизия без денег. Просили перевести миллион, согласие получили, а денег нет, это затрудняет и замедляет формирование дивизии» [16]. После того, как в основном дивизия была укомплектована людьми и лошадьми, части и подразделения Дикой дивизии были направлены в Казань, в состав Запасной армии Республики. В течение нескольких дней соединение получило всё необходимое для ведения боевых действий в горной местности, в том числе недостающий личный состав, конский состав, материальную часть и особую форму одежды: белые папахи, бурки, черкески, бешметы и шаровары. Однако заменить устаревшие пушки образца 1900 года дивизии не удалось [12]. Более современные артиллерийские системы на артскладах округа просто отсутствовали.

В декабре 1919 года дивизия была передислоцирована под г. Царицын и вошла в состав 10-й армии (позднее переименованной в 10-ю Терскую армию) Кавказского фронта. В начале 1920 года ее планировалось использовать против белых армий вооруженных сил Юга России в боях на Кубани и для взятия Крыма, для чего в подчинение Дикой дивизии была передана Азовская флотилия. Однако в начале марта Г.Д. Гая перевели в тыл формировать кавкорпус, и вместо него был назначен П.Е. Дыбенко. При нем в дивизии произошли организационные изменения. Новый командарм добился исключения слова «дикая» из наименования соединения. Кавказская форма одежды бойцов была заменена на общекрасноармейскую [19]. Видимо, поэтому после сражения с дивизией белогвардеец А. Судоплатов охарактеризовал в своих воспоминаниях красноармейцев этой дивизии – «дикие и отчаянные воины в буденовках» [20].

Боевой путь дивизии начался столкновением в районе Царицына с горскими частями, о чем красноречиво вспоминал один из участников тех событий – политрук конноартиллерийской батареи А.В. Голубев: «В районе хутора Вертячий кавдивизией Гая разбита сводно-горская дивизия противника» [12]. Далее дивизия следовала за отступающими добровольческими частями. С наступлением весны и распутицы дивизия потеряла несколько лошадей, и преследование отходящих белых пошло еще медленнее, до Маныча дивизия шла без боев. Кроме того, личный состав дивизии начал болеть тифом. В феврале 1920 года вооруженные силы Юга России генерала А.И. Деникина потеснили 8-ю и 9-ю советские армии. Под давлением белых дивизия отошла за Маныч. 18 августа 1920 года, несмотря на сопротивление подстанцией Ново-Роговской, основные части и подразделения дивизии были разгромлены частями белых, входящих в состав так называемого Улагаевского десанта [21]. Заметим, что «Улагаевский десант» – общепринятое название операции Русской армии барона генерала П.Н. Врангеля, названной по имени ее руководителя – генерал-лейтенанта С.Г. Улагая) против Красной Армии на Кубани 1 (14) августа – 25 августа (7 сентября) 1920 года. В состав десанта входили конные дивизии Н.Г. Бабиева, А.М. Шифнер-Маркевича, пехотные части Б.И. Казановича – всего 4,5 тыс. бойцов при 12 орудиях, 130 пулеметах, нескольких броневиках и 8 аэропланах.

В результате боя уцелела лишь половина личного состава и 2 сентября 1920 года 1-я Красная Кавказская кавалерийская дивизия РККА была официально расформирована, а ее остатки пополнили состав 33-й Кубанской кавалерийской бригады, которая, в свою очередь, вошла в состав 5-й Кубанской кавалерийской дивизии РККА.

Таким образом, Дикая дивизия РККА периода Гражданской войны в России прошла сложный, неоднозначный и довольно короткий путь – начиная со своего становления, боевого применения и расформирования прошло чуть больше года. Несмотря на краткую историю существования и имевшиеся недостатки в организации и снабжении, 1-я Красная Кавказская кавалерийская дивизия явилась попыткой логического продолжения образа национальных формирований периода Первой мировой войны. Идейный вдохновитель дивизии Г.Д. Гай мечтал о создании части, укомплектованной горцами-добровольцами, жителями Северного Кавказа, однако на практике в состав дивизии входили 600 человек кубанцев, собранных из разных подразделений РККА, и мобилизованные жители Симбирска, Саранска и их окраин. За год своего существования у дивизии сменились пять начальников, четыре военкома и четыре начальника штаба дивизии.

По решаемым задачам это было специальное воинское конное соединение, предназначенное решать боевые задачи тактического уровня. Кроме того, это была одна из первых попыток создать сильную красную кавалерию. Сформированная в Саранске и Симбирске дивизия воевала на Кавказе, участвовала в боях за Царицын, за станицу Егорлыцкую, однако большую часть времени дивизия стояла в тыловых районах и следовала за уходящим противником, потерпев поражение в конце августа 1920 года она была расформирована. Потери дивизии были в основном связаны с эпидемией тифа, с чем и связывают современники то, что дивизия не сыграла решающей роли [12] в Гражданской войне, несмотря на все старания Г.Д. Гая. 1-я Красная Кавказская Дикая дивизия не вошла в историю Красной Армии с такой славой, как 1-я Конная армия, не упоминается о ней и в работах по истории Гражданской войны, однако она заслуживает того, чтобы память о ней осталась в анналах истории вооруженных сил страны.

Список используемых источников

1. Российский государственный военный архив (РГВА). – Ф. 7611. – Оп. 1. – Д. 8.
2. *Шилова С.Г.* Всадники между белыми и красными // V Батаевские чтения. Материалы Международной междисциплинарной конференции, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки, профессора РУДН Т.В. Батаевой. – М., 2013. – Ч. 2. – С. 265–75; ее же: Черкесские формирования в составе Добровольческой армии (1918–1919) // Новый исторический вестник. – М., 2007. – №16. – С. 244–251.
3. *Брешко-Брешковский Н.Н.* Дикая дивизия. – М.: Московская правда, 1991. – С. 25.
4. *Буденный С.М.* Пройденный путь. – М.: Воениздат, 1973. – Кн. 3. – 408 с.
5. РГВА. – Ф. 7611. – Оп. 1. – Д. 60. – Л. 24.
6. Там же. – Д. 54, 55, 61, 83.
7. Там же. – Д. 60. – Л. 16.
8. Там же. – Л. 58–58 об.
9. Там же. – Л. 11; 51.
10. Там же. – Л. 17.
11. Там же. – Д. 8. – Л. 3–95.
12. *Голубев А.В.* В Кавказской кавалерийской // Против Деникина. – М., 1969. – С. 281–308.
13. РГВА. – Ф. 7611. – Оп. 1. – Д. 60. – Л. 62.
14. Фото с открытого сайта. –URL: <https://voencomuezd.livejournal.com/1319190.html> (дата обращения: 15.08.2019).

15. РГВА. – Ф. 7611. – Оп. 1. – Д. 60. – Л. 57.
16. Там же. – Л. 52–62.
17. *Безугольный А.Ю.* Народы Кавказа и Красная Армия. 1918–1945 годы. – М.: Вече, 2007. – 512 с.
18. РГВА. – Ф. 7611. – Оп. 1. – Д. 60. – Л. 63.
19. Форма 1-й Красной Кавказской кавалерийской дикой дивизии. – URL: <https://voencomuezd.livejournal.com/1319190.html> (дата обращения: 15.08.2019).
20. *Судоплатов А.* Дневник. – М., 2014. – С. 148.
21. *Градосельский В.В.* Национальные воинские формирования в Красной армии (1918-1938) // Военно-исторический журнал. – 2001. – №10. – С. 2–6.

С.Е. Алешичев,
кандидат техн. наук;
С.В. Зарин;
А.В. Мацкевич,
кандидат техн. наук;
С.А. Мачнев,
кандидат техн. наук;
А.М. Сычева,
доктор техн. наук, доцент

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФОРТИФИКАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИХ РЕКОНСТРУКЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ

Предложена методика оценивания фактической степени защиты специальных фортификационных сооружений на основе расчета требуемых толщин их защитных конструкций. Обоснована применимость методики при изменении свойств материалов защитных конструкций и их геометрических характеристик, а также изменения объемно-конструктивных решений специальных фортификационных сооружений. Апробация методики показана на примере специальных фортификационных сооружений с применением высокопрочного поверхностно упрочненного бетона. Показан эффект повышения фактической степени защиты при применении поверхностно упрочненного бетона, рассчитанный по предлагаемой методике.

Ключевые слова: специальное фортификационное сооружение, степень защиты, толщина защитных конструкций, высокопрочный бетон, поверхностное упрочнение.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие обычных и ядерных средств поражения достигло высочайшего качественного уровня. Способы доставки средств поражения до объекта-цели существенно изменились в лучшую сторону. Круговое вероятное отклонение современных ядерных средств поражения (ЯСП) не превышает 30 м, что вызывает поражение объекта-цели с большей вероятностью. Объектом-целью при воздействии ЯСП в том числе являются специальные фортификационные сооружения (СФС). Из проведенного анализа работ [1–4] следует, что актуальны на сегодняшний день вопросы о необходимости повышения защитных свойств существующих и вновь возводимых СФС. Одним из способов повышения степени защиты существующих СФС стало частичное изменение строительной системы защитных конструкций сооружения, использование дополнительной конструктивной защиты, это представляется возможным осуществить на этапе проведения их реконструкции или модернизации. В трудах [1, 2] подробно рассмотрен вопрос об определении стандартной степени защиты объекта в зависимости от его назначения, что является неотъемлемой частью при выборе объемно-конструктивного решения (ОКР) сооружения, а также в его посадке относительно уровня поверхности земли. На этапе реконструкции или модернизации СФС требуется определение фактической степени защиты СФС.

Известна зависимость для расчета фактической степени защиты СФС, учитывающая изменение параметров и способов воздействия средств поражения на СФС, а также отклонение фактической посадки от проектной [1].

Однако на сегодняшний день мало изучены актуальные для реконструкции и модернизации способы расчета фактической степени защиты СФС при изменениях:

- свойств материалов защитных конструкций СФС;
- геометрических характеристик защитных конструкций СФС;
- объемно-конструктивного решения СФС.

При расчете требуемых характеристик защитных конструкций СФС в ходе их проектирования, например толщины покрытия, одной из исходных характеристик является заданная степень защиты СФС [2].

В данной работе предложено разработать методику оценивания фактической степени защиты СФС при проведении реконструкции и модернизации на основе расчета толщины защитных конструкций СФС.

Профессором Д.В. Суриным разработаны методики, позволяющие решить прямую задачу, т. е. определить требуемые толщины защитных конструкций СФС [2]. Данные методики позволяют определить толщины защитных конструкций на основе исходных данных, одной из которых является заданная степень защиты СФС. Тогда решение обратной задачи этих расчетов позволит определить фактическую степень защиты СФС, что отражает суть предлагаемой в данной работе методики. Эта величина будет отличаться от заданной степени защиты при неизменных толщинах защитных конструкций за счет возможного изменения свойств материалов защитных конструкций и их геометрических характеристик, а также изменения ОКР СФС.

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФОРТИФИКАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИХ РЕКОНСТРУКЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ

Разработанная методика оценивания фактической степени защиты СФС при их реконструкции и модернизации приведена на рис. 1.

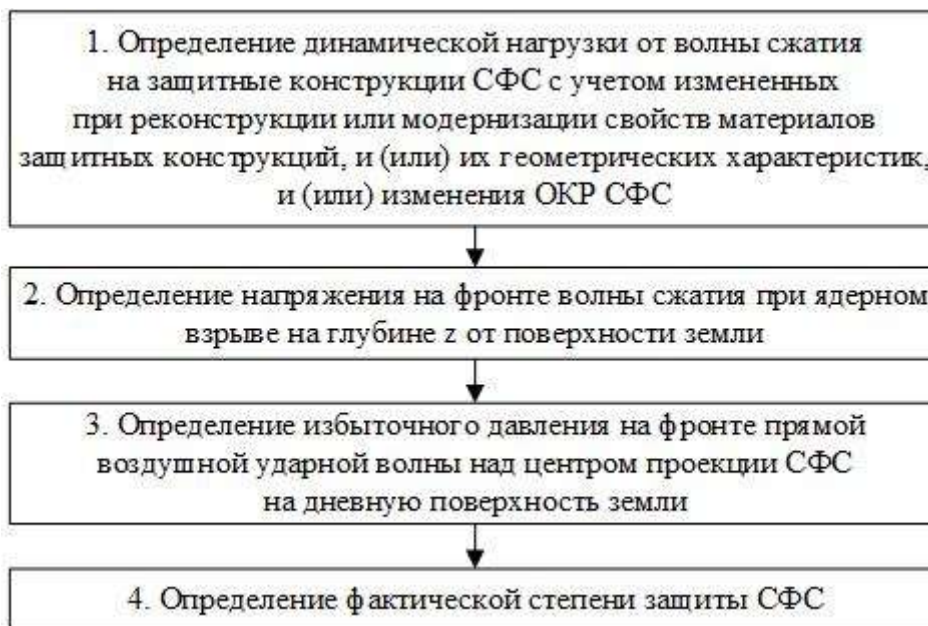


Рис. 1. Методика оценивания фактической степени защиты СФС при их реконструкции и модернизации

На первом этапе методики определяется динамическая нагрузка от волны сжатия на защитные конструкции СФС j -го вида для объемно-конструктивных решений (ОКР) i -го типа с учетом измененных при реконструкции или модернизации свойств материалов защитных конструкций, и (или) их геометрических характеристик, и (или) изменения ОКР СФС, кгс/см², по зависимости

$$\sigma_{ij} = f(R_{bkij}, h_{kij}, l_{kij}, H_{эij}, r_{aij}, r_{kij}, \dots), \quad (1)$$

- где R_{bkij} – расчетное сопротивление бетона k -го типа защитной конструкции СФС j -го вида для ОКР i -го типа сжатия, кгс/см²;
- h_{kij} – толщина k -го типа защитной конструкции СФС j -го вида для ОКР i -го типа, м;
- l_{kij} – пролет защитной конструкции k -го типа СФС j -го вида для ОКР i -го типа, м;
- $H_{эij}$ – высота этажа СФС j -го вида для ОКР i -го типа, м;
- r_{aij} – внутренний радиус кривизны арочного свода СФС j -го вида для ОКР i -го типа, м;
- r_{kij} – внутренний радиус кривизны купольного свода СФС j -го вида для ОКР i -го типа, м.

Переменные R_{bkij} , h_{kij} , l_{kij} , $H_{эij}$, r_{aij} , r_{kij} определялись по методикам, приведенным в [2].

Затем, на втором этапе, вычисляется напряжение на фронте волны сжатия при ядерном взрыве на глубине заложения СФС j -го вида для ОКР i -го типа заданных проектом, кгс/см², по формуле

$$\sigma_{vij} = \frac{\sigma_{ij}}{k_{vij} k_{\Phi_{ijk}}}, \quad (2)$$

- где k_{vij} – коэффициент динамического взаимодействия волны сжатия с k -м типом защитной конструкции СФС j -го вида для ОКР i -го типа;
- $k_{\Phi_{ijk}}$ – коэффициент осреднения динамических давлений от воздушной ударной волны и волны сжатия на поверхность k -го типа защитной конструкции СФС j -го вида для ОКР i -го типа.

Коэффициенты k_{vij} и $k_{\Phi_{ijk}}$ рассчитаны по методикам, приведенным в [2].

На третьем этапе определяется избыточное давление на фронте воздушной ударной волны на поверхность земли в месте посадки СФС j -го вида для ОКР i -го типа $\Delta p_{пов}$, кгс/см², по формуле

$$\Delta p_{пов_{ij}} = \sigma_{vij} \left(1 + \frac{n_p z}{2a_1 \tau_+} \right)^2, \quad (3)$$

- где n_p – показатель интенсивности воздушной ударной волны (ВУВ), действующей на СФС j -го вида для ОКР i -го типа;
- z – уровень заглубления защитной конструкции СФС j -го вида для ОКР i -го типа, м;
- a_1 – скорость упругопластических деформаций для грунта заложения СФС j -го вида для ОКР i -го типа, м/с;
- τ_+ – длительность фазы сжатия ВУВ в месте посадки СФС j -го вида для ОКР i -го типа, с.

Переменные n_p и τ_+ рассчитаны по методикам, приведенным в [2], исходя из стандартного расстояния от центра взрыва до центра места расположения СФС, равного 1 км, а переменные z и a_1 – согласно исходным данным.

Далее, на четвертом (заключительном) этапе, определяется фактическая степень защиты СФС j -го вида для ОКР i -го типа $\Delta p_{сз(\Phi)}$, кгс/см², по формуле

$$\Delta p_{сз(\phi)_{ij}} = \Delta p_{пов_{ij}} \cdot \begin{cases} \frac{1}{1 + k_{отр} \cos \psi}, \psi \leq 0,698, \\ \frac{1}{1 + k_{отр} \cos \psi \operatorname{ctg} \psi}, \psi > 0,698, \end{cases} \quad (4)$$

где $k_{отр}$ – коэффициент отражения ВУВ от поверхности земли в месте посадки СФС j -го вида для ОКР i -го типа;

ψ – угол наклона фронта ВУВ относительно поверхности земли в месте посадки СФС j -го вида для ОКР i -го типа, рад (град).

Коэффициент $k_{отр}$ и угол ψ рассчитаны по методикам, приведенным в [2].

АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФОРТИФИКАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В ИХ КОНСТРУКЦИЯХ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

Одним из способов повышения степени защиты СФС может быть получение высокопрочного бетона на основе его поверхностного упрочнения [3–6]. Показатели качества такого бетона приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества высокопрочного бетона

№ п/п	Наименование показателя	Бетон класса В30	Бетон после поверхностного упрочнения (В45)	Эффект реализации метода, %
1	Прочность на сжатие $R_{сж}$	39,3 МПа	60,1 МПа	53
2	Прочность на растяжение при изгибе $R_{изг}$	5,2 МПа	9,2 МПа	76
3	Водонепроницаемость W	0,8 МПа	1,4 МПа	75
4	Морозостойкость F	200 циклов	600 циклов	200
5	Водопоглощение ρ	4,7 %	1,9 %	60
6	Начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении E_b	$32,5 \text{ МПа} \cdot 10^{-3}$	$44,5 \text{ МПа} \cdot 10^{-3}$	37

Разработанная методика позволяет произвести количественную оценку эффекта от применения высокопрочного бетона на основе поверхностного упрочнения для различных ОКР СФС.

В статье рассмотрены следующие ОКР СФС: котлованное рамное, котлованное арочное и котлованное купольное.

В качестве исходных данных приняты:

- тип защитной конструкции СФС – покрытие (ввиду того, что данный тип конструкций СФС является наиболее критичным);
- варьируемый вид конструкционного материала – монолитный железобетон;
- вариант предельного состояния защитных конструкций – упругопластическая работа защитных конструкций с образованием макротрещин и их раскрытием в растянутой зоне;
- тип ядерного взрыва (ЯВ) – наземный;

- тип грунта – суглинок;
- глубина заложения СФС – 2 м;
- расчетное сопротивление бетона сжатию (В30) $R_b = 400,748 \text{ кгс/см}^2$ [7, 8];
- расчетное сопротивление высокопрочного бетона на основе золирования сжатию $R_b^M = 612,849 \text{ кгс/см}^2$;
- расчетное сопротивление арматуры (А400) $R_a = 3569 \text{ кгс/см}^2$ [7];
- процент армирования железобетона $\mu_a = 1,5$ [2];
- тип СФС по назначению – командный пункт полка.

Результаты апробации разработанной методики при применении высокопрочного бетона приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Результаты расчета приведены для всех выбранных ОКР СФС. В последней графе табл. 2 показан эффект применения высокопрочного бетона на основе поверхностного упрочнения, рассчитанный по формуле

$$\Theta_{\Delta p_{сз}} = \frac{\Delta p_{сз(ф)} - \Delta p_{сз}}{\Delta p_{сз(ф)}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Таблица 2

Результаты сравнения показателей эффекта от применения высокопрочного бетона при реконструкции или модернизации СФС

№ п/п	Тип применяемого бетона	Степень защиты СФС, кгс/см ²		Эффект, %
		заданная	фактическая	
1	Обычный	2	–	29
	Высокопрочный	–	2,59	
2	Обычный	5	–	48
	Высокопрочный	–	7,39	
3	Обычный	50	–	59
	Высокопрочный	–	79,51	

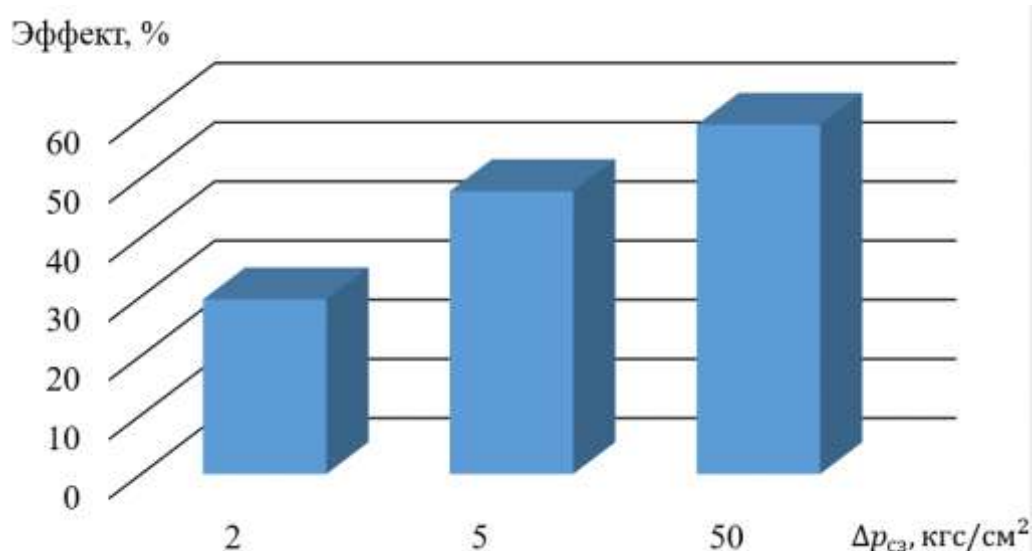


Рис. 2. Показатели эффекта от применения высокопрочного бетона при реконструкции или модернизации СФС

Из результатов расчета видно, что с ростом заданной степени защиты эффект от применения высокопрочного бетона возрастает до двух раз. Это, вероятно, связано с тем, что роль свойств материала с возрастанием заданной степени защиты СФС возрастает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложена методика оценивания фактической степени защиты СФС при их реконструкции и модернизации.
2. Обоснована применимость методики оценивания при изменении свойств материалов защитных конструкций и их геометрических характеристик, а также изменения ОКР СФС.
3. Апробация методики произведена на примере улучшения свойств материала защитных конструкций при использовании поверхностно упрочненного высокопрочного бетона.
4. Показано, что с повышением заданной степени защиты СФС эффект от применения высокопрочного бетона увеличивается до двух раз.

Список используемых источников

1. *Сурин Д.В.* Специальные фортификационные сооружения: учебник – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 429 с.
2. Оптимальное проектирование и оперативный расчет специальных фортификационных сооружений Министерства обороны: учеб. пособие / Д.В. Сурин [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. – 144 с.
3. Оценка повышения несущей способности железобетонного покрытия посредством неорганической минеральной обоймы / Ш.Ш. Исхаков [и др.] // Транспортное строительство. – 2018. – №5. – С. 4–7.
4. Метод поверхностного упрочнения бетонов для сооружений специального назначения: монография / А.М. Сычева [и др.] – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 74 с.
5. Купольное сооружение: патент № 2639230 / Л.Б. Сватовская, Д.В. Сурин, Д.С. Старчуков, А.М. Сычева и др. – Заявл. 14.09.2016; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 20.12.2017.
6. Арочное сооружение: патент № 2639004 / Л.Б. Сватовская, Д.В. Сурин, Д.С. Старчуков, А.М. Сычева и др. – Заявл. 15.09.2016; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 19.12.2017.
7. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Росстандарт, 2018. – 150 с.
8. Метод упрочнения поверхности бетона для специальных сооружений: монография / А.М. Сычева, Л.Б. Сватовская, Д.С. Старчуков, В.Я. Соловьева, Ш.Ш. Исхаков, А.В. Мацкевич. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 74 с.

В.И. Гера,

кандидат техн. наук, доцент;

Ю.А. Каменев,

кандидат техн. наук;

В.Г. Котович,

кандидат техн. наук, доцент;

А.С. Соломахин,

кандидат техн. наук, доцент;

А.М. Сычева,

доктор техн. наук, доцент

ЖАРОСТОЙКИЙ ФИБРОПЕНОБЕТОН ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА «АНГАРА»

Приведены результаты подбора состава жаростойкого фибропенобетона неавтоклавного твердения с целью применения в конструкциях покрытий и газоходов стартовых сооружений. Показано, что присутствие в составе пенобетона базальтовой фибры позволяет получить теплоизоляционный фибропенобетон средней плотности D500 на кварцевом заполнителе с повышенными теплозащитными и деформативными свойствами.

Ключевые слова: стартовое сооружение, газоход, жаростойкий фибропенобетон, фибра, базальт, термостойкость.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы связана с необходимостью использования жаростойких материалов в конструкциях металлооблицовки газохода и плиты покрытия стартового сооружения космического ракетного комплекса «Ангара» (СС КРК «Ангара»). В качестве такого материала предлагается использовать жаростойкий фибропенобетон с заданными свойствами, который предназначен для снижения теплового воздействия на указанные конструкции (рис. 1), а также для демпфирования нагрузок на них, возникающих при температурном расширении металлоконструкции оболочек.

Известно, что при старте ракеты-носителя (РН) конструкции газоходов и плиты покрытия испытывают сильные температурные и деформационные нагрузки [1], что приводит к разрушению их материалов и необходимости использования металлооблицовки. В настоящее время конструкция металлооблицовки «нулевой отметки» и газохода имеет различную толщину в соответствии с двумя зонами деления (рис. 1).

Зона 1 непосредственно примыкает к пусковому столу и подвергается интенсивному воздействию высокотемпературных струй двигательных установок (ограничена размерами 36920×35700 мм и имеет толщину защитных металлических плит не менее $h_{\text{обл}} = 20$ мм, размер плит в плане составляет 1400×1400 мм).

Зона 2 находится от центра пускового стола на расстоянии 18515 мм (ограничена размерами 26780×35700 мм и имеет толщину металлических плит не менее $h_{\text{обл}} = 14$ мм).

Зона 1.1 располагается под пусковой установкой и включает в себя металлооблицовку стен газохода плитами толщиной $h_{\text{обл}} = 20$ мм.

Зона 2.1 находится на выходе газохода и включает в себя металлооблицовку стен газохода плитами толщиной $h_{\text{обл}} = 14$ мм.

Как показали проведенные предварительные оценки, максимальные значения средней (по толщине) температуры металлооблицовки газоходов будут составлять около 125°C и не превысят максимальной температуры применения углеродистой стали, равной 450°C.

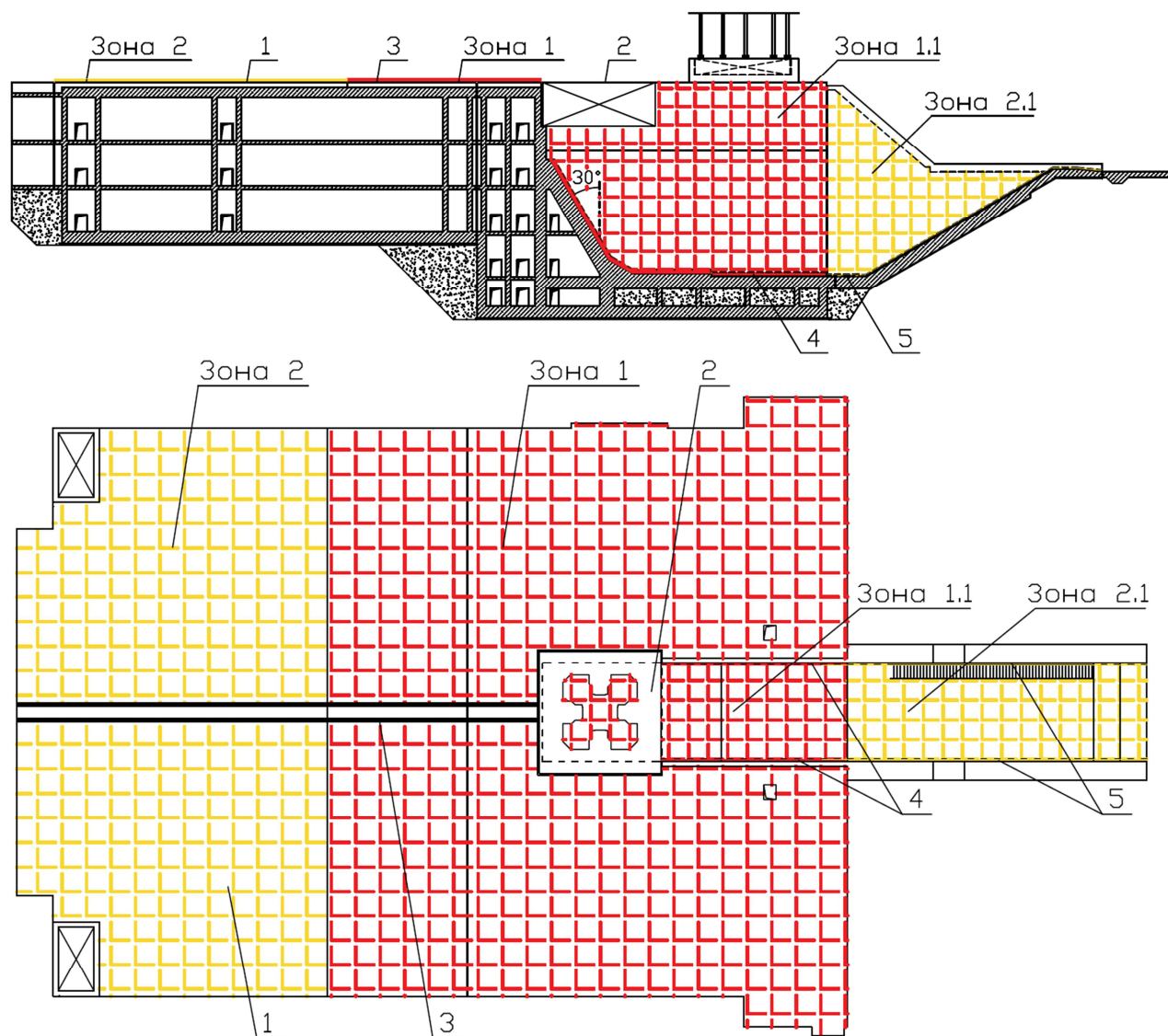


Рис. 1. Конструкция стартового сооружения космического ракетного комплекса «Ангара»:

- 1 – плита покрытия стартового сооружения; 2 – пусковая установка;
 3 – рельсовый путь; 4 – металлооблицовка газохода ($h_{обл} = 20$ мм);
 5 – металлооблицовка газохода ($h_{обл} = 14$ мм)

Критерием выбора толщины защитных металлических плит также является величина равновесной температуры прогрева плиты после выравнивания ее по всей толщине [1].

Согласно [2] под металлооблицовкой может находиться бетон или пенобетон, обладающий жаростойкими свойствами.

В работе рассмотрен синтез жаростойкого фибропенобетона с температурой применения до 600°C (класс по жаростойкости И6). Согласно условиям эксплуатации, пенобетон должен обладать повышенными деформативными и теплозащитными свойствами для того, чтобы рассеивать тепловую энергию, возникающую при пуске РН, а также демпфировать нагрузки от расширения металлоконструкции. Применение такого пенобетона под металлооблицовкой возможно в различных зонах газохода.

Объект исследования – конструкции плиты покрытия и газохода стартового сооружения космического ракетного комплекса «Ангара».

Предмет исследования – жаростойкий фибропенобетон, его физико-механические свойства.

Цель работы – разработка состава жаростойкого фибропенобетона неавтоклавного твердения, соответствующего классу по предельно допустимой температуре применения ИБ, определение его физико-механических свойств.

Литературный и патентный анализ показал, что на сегодняшний день существуют жаростойкие пенобетоны и ячеистые бетоны на различной основе. Это ячеистые бетоны на жидком стекле [2–5], на гипсовом вяжущем [6, 7], пенобетоны, приготовленные с использованием глиноземистого цемента [8–10], портландцемента совместно с вулканическим туфом [11], а также жаростойкий газобетон [12].

Анализ также показал, что жаростойких фибропенобетонов неавтоклавного твердения на цементном вяжущем и пенообразователе на протеиновой основе с одновременно высокими деформативными и теплоизоляционными характеристиками на сегодняшний день не существует.

ПОДБОР СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ. ВЯЖУЩЕЕ

Для обеспечения долговечности пенобетона необходимо свести к минимуму его деформации при температурном воздействии. Интенсивные деструктивные процессы при нагревании материала идут при температуре более 200°C. Нагрев в интервале 200–400°C приводит к постепенному снижению прочности цементного камня и бетона из-за дегидратации в основном гидроалюминатов, а также распада и перекристаллизации гидросульфалюминатов кальция. При нагревании свыше 300°C нарушается структура цементного камня и бетона в результате различия деформаций гидратных продуктов цементного камня и непрогидратированных зерен цемента. При 500–600°C идет разложение гидратных новообразований и дегидратация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – продукта гидролиза клинкерных минералов, преимущественно трехкальциевого силиката, что способствует дальнейшему снижению прочности цементного камня.

Портландцементные образцы, прогретые до температуры 600–800°C, полностью разрушаются после выдерживания их в воздушно-сухих условиях в основном в результате вторичной гидратации оксида кальция. При непрерывном нагревании до 1200°C прочность цементного камня составляет 35–40% от прочности контрольных образцов. При этом развивается значительная усадка – до 1% и более [13, 14]. Коэффициент термического расширения (КТР) цементного раствора $\approx 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [15].

Учитывая условия работы жаропрочного пенобетона (ЖПБ), в работе выбран цемент портландцемент ЦЕМ II/A-III 32,5Н ГОСТ 31108-2016.

Цемент представляет собой тонкомолотую смесь портландцемента нормированного химико-минералогического состава и кремнеземсодержащей добавки – доменного гранулированного шлака металлургического производства.

ЗАПОЛНИТЕЛЬ

Известно, что термостойкость бетона увеличивается с уменьшением размера заполнителей [21]. Поэтому при подборе состава ЖПБ в качестве основного заполнителя был выбран мелкий песок по ГОСТ 8763-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» с размером зерна не более 0,63 мм. Кроме этого, такой размер песка не вызывает разрушения строительной пены при производстве пенобетона.

Помимо сказанного, известно, что при температуре 572°C происходит полиморфное превращение $\beta\text{-SiO}_2$ в $\alpha\text{-SiO}_2$ с объемным расширением до 15% [16, 17]. В связи с этим общее количество песка в составе жаростойкого фибропенобетона не должно превышать некоторого критического значения, которое не будет вызывать термическую усадку свыше 2% и, соответственно, разрушение материала. КТР песка $\approx 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [15].

ШАМОТНЫЙ ПОРОШОК

С целью уменьшения песка в составе заполнителя и увеличения термической стойкости при последующем высокотемпературном нагреве в состав ЖПБ был введен материал с пониженным по сравнению с песком КТР – порошок шамота молотый Боровичского комбината огнеупоров марки ПШБМ по ТУ 1522-009-00190495-99 с изм.1. КТР $\approx 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [15]. Шамотный порошок используется с размером частиц не более 0,63 мм.

ФИБРА

Термостойкость бетона можно увеличить дисперсным армированием температуростойкими волокнами базальта, обеспечивающими минимальное различие температурных деформаций отдельных компонентов, КТР $\approx 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [15].

Использование базальтовых волокон способствует формированию на их поверхности центров кристаллизации с образованием сети гексагональных пластин и игольчатых кристаллов, срастающихся со сферическими зёрнами цементной системы, что дополнительно усиливает действие волокон как дисперсной арматуры. Кроме этого, базальтовые волокна должны значительно повысить прочность при изгибе пенобетона, что увеличит его трещиностойкость и, соответственно, деформативность (рис. 2) [18]. Вместе с тем базальтовая фибра имеет пониженный коэффициент теплопроводности, $\lambda \approx 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{ } ^\circ\text{C)}$, что должно понизить коэффициент теплопроводности жаростойкого фибропенобетона.

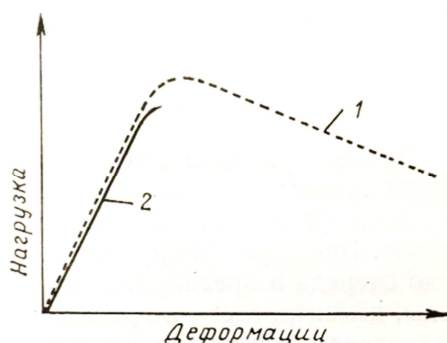


Рис. 2. Сравнительный график нагрузка-деформация неармированного бетона и фибробетона:
1 – фибробетон; 2 – неармированный бетон

При подборе состава пенобетона используется фибра базальтовая по ТУ 5952 002-13307094-2008 марки БС17-12,7(1/2'')р-КВ-13 с длиной волокон 12 мм.

ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЬ

Одними из важнейших компонентов для производства пенобетона являются пенообразователи на основе поверхностно-активных веществ.

Для поризации смеси выбран пенообразователь на протеиновой основе «Foamset», поскольку он является лучшим с точки зрения влияния на гидратацию цемента. Выбор именно этого пенообразователя продиктован еще и тем, что получаемая из него пена имеет большую подвижность по сравнению с другими пенами и хорошо смешивается с тонкомолотыми компонентами сырья в смесителе. Другие пены в силу своей жесткости не обеспечивают требуемой однородности пеносмеси при смешении [19].

СТАБИЛИЗАТОР СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЕНЫ

На устойчивость строительной пены в составе ЖПБ оказывают влияние множество технологических факторов. Основными из них являются:

- изотермическая реакция гидратации жаростойкого цемента с выделением большого количества теплоты;
- наличие базальтовой фибры ($l=12$ мм), которая способна привести к разрушению строительной пены.

Так как в качестве пенообразователя используется протеиновый, как один из лучших, то исходя из существующих знаний в качестве стабилизирующей добавки целесообразно выбрать $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ – нанодисперсный кремнезем (золь SiO_2), поскольку именно такое соединение способно взаимодействовать с молекулами белка пенообразователя и образовывать протеиновые комплексы в пенной пленке, значительно повышающие устойчивость пены [20]. Помимо этого, использование стабилизатора способствует образованию мелкопористой структуры пенобетона, что положительно скажется на значении его коэффициента теплопроводности.

Стабилизатор для пенообразующей добавки на протеиновой основе – золь кремниевой кислоты «КС-К» по ТУ 2145-005-76287984-15, производитель ООО «СИТЕК», Санкт-Петербург.

В эксперименте использовалась вода по ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

В результате подбора был получен состав жаростойкого фибропенобетона средней плотности D500 (табл. 1) с физико-механическими характеристиками, которые приведены в табл. 2.

Таблица 1

Расход сырьевых материалов на 1 м³ пенобетонной массы средней плотности D500

Цемент, кг	Песок, кг	Шамотный порошок, кг	Фибра, кг	Вода, л	Раствор пенообразователя, л		
					вода, л	пенообразователь	стабилизатор
430	59	6	13	215	91	2,91	0,19

Таблица 2

Физико-механические характеристики жаростойкого фибропенобетона

№	Исследуемая физико-механическая характеристика	Полученное значение	Нормативный документ
1	Класс по средней плотности, D	500	ГОСТ 12730.1, приложение №3
2	Отпускная влажность, %	16-20	ГОСТ 12730.2, приложение №3
3	Класс бетона по предельно допустимой температуре применения	И6	ГОСТ 20910-90, приложение №3
4	Марка по термостойкости, воздушные теплосмены	T(2)12	ГОСТ 20910-90, приложение №3
5	Прочность при сжатии после ТВО, кгс/см ²	6,2	ГОСТ10180-90, приложение №3
6	Прочность на растяжение при изгибе после ТВО, кгс/см ²	7,7	ГОСТ10180-90, приложение №3
7	Остаточная прочность после прогрева кгс/см ² /%	3,1/50	ГОСТ 20910-90

Продолжение табл. 2

№	Исследуемая физико-механическая характеристика	Полученное значение	Нормативный документ
8	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°С)	0,11	ГОСТ 7076, приложение №3
9	Усадка при высыхании, мм/м	1,7	ГОСТ 25485-89, приложение №3
10	Прочность при сжатии в 7 суток нормального твердения, кгс/см ²	2,9	ГОСТ10180-90, приложение №3
11	Прочность при сжатии в 14 суток нормального твердения, кгс/см ²	4,9	ГОСТ10180-90, приложение №3
12	Прочность при сжатии в 28 суток нормального твердения, кгс/см ²	6,2	ГОСТ10180-90, приложение №3
13	Температурная усадка, %	0,3	ГОСТ 20910-90, приложение №3

Из табл. 2 следует, что разработанный пенобетон соответствует классу по жаростойкости Иб. Коэффициент теплопроводности имеет пониженное значение по сравнению со значениями, которые устанавливает ГОСТ для этого класса по средней плотности (0,12 Вт/(м·°С)). Данный эффект положительно влияет на устойчивость защитного покрытия СС КРК «Ангара» к термическим нагрузкам от газовой струи РН.

Кроме того, из табл. 2 следует, что прочность на растяжение при изгибе выше прочности при сжатии на 24%, что может быть связано с присутствием фибры в составе пенобетона и говорит о его повышенных деформативных свойствах.

Диаграмма напряжения-деформации разработанного жаростойкого фибропенобетона показана на рис. 3. Диаграмма получена для образца пенобетона, выдержанного в течение 4 часов при температуре, соответствующей классу по жаростойкости Иб – 600°С.

Из анализа диаграммы можно сделать вывод, что ветвь, характеризующая заупругую зону деформирования, имеет значительную протяженность, что говорит о повышенных деформативных характеристиках разработанного пенобетона.

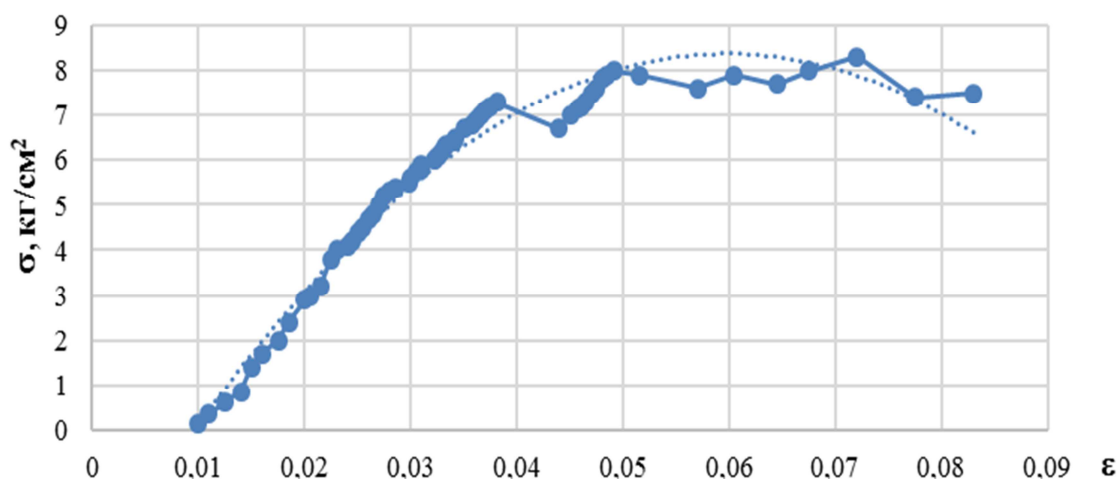


Рис. 3. Диаграмма напряжения – относительные деформации жаростойкого фибропенобетона класса плотности 530 кг/м³

Таким образом, разработанный жаростойкий фибропенобетон способен демпфировать нагрузки, возникающие при температурном расширении металлооблицовки покрытия и газохода СС КРК «Ангара».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате научно-практических исследований был разработан состав жаростойкого фибропенобетона с повышенными теплозащитными и деформационными характеристиками, применение которого обеспечивает термическую защиту плиты покрытия и газохода СС КРК «Ангара». Класс по жаростойкости обеспечивается использованием портландцемента с тонкомолотыми добавками, а также шамотным заполнителем и присутствием базальтовой фибры. Теплозащитные и деформационные характеристики также обеспечиваются присутствием базальтовой фибры и мелкопористой структурой пенобетона, которая создается благодаря использованию стабилизатора для пены – золя SiO_2 .

Полученный жаростойкий фибропенобетон рекомендуется к использованию в качестве материала для конструкции металлооблицовки плиты покрытия и газохода СС КРК «Ангара».

Список используемых источников

1. Гула Д.Н. Анализ возможных схемных решений закрепления листов металлооблицовки нулевой отметки стартового сооружения универсального стартового комплекса «Ангара» // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 1, ч. 1. – С. 44–49.
2. Жаростойкий шлакощелочной пенобетон: пат. 2149853 Российская Федерация, МПК С 04 В 28/08, С 04 В 111/20 / Рахманов В.А., Мелихов В.И., Величко Е.Г., Белякова Ж.С.; заявитель и патентообладатель Всероссийский Федеральный головной технологический институт «ВНИИ железобетон». – № 98121990/03; заявл. 01.12.98; опубл. 27.05.00, Бюл. № 15.
3. Сырьевая смесь для получения жаростойкого ячеистого бетона и способ получения жаростойкого ячеистого бетона: пат. 2177463 Российская Федерация, МПК С 04 В 38/02, С 04 В 28/26, С 04 В 111/20 / Кузнецов В.А.; заявитель и патентообладатель Кузнецов В.А. – № 2001106955/03; заявл. 16.03.01; опубл. 27.12.01, Бюл. № 36.
4. Способ получения ячеистого жаростойкого бетона: пат. 96118883 Российская Федерация, МПК С 04 В 38/02, С 04 В 38/04, С 04 В 38/10 / Затворницкая Т.А., Чалков Г.В., Лузан А.И., Рубин О.Д.; заявитель и патентообладатель Затворницкая Т.А., Чалков Г.В., Лузан А.И., Рубин О.Д. – № 96118883/03; заявл. 23.09.96; опубл. 27.01.98.
5. Жаростойкий шлакощелочной пенобетон: пат. 2306301 Российская Федерация, МПК С 04 В 38/10, С 04 В 28/08, С 04 В 111/20 / Сватовская Л.Б., Масленникова Л.Л., Абу-Хасан М.С., Шершнева М.В., Кияшко А.Г., Бухарина Д.Н.; заявитель и патентообладатель учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения». – № 2006104395/03; заявл. 13.02.06; опубл. 20.09.07, Бюл. №26.
6. Смесь для жаростойкого пенобетона на основе наноструктурированного композиционного гипсового вяжущего, способ изготовления изделий: пат. 2613208 Российская Федерация, МПК С 04 В 40/00, С 04 В 38/10, С 04 В 1/00 / Кожухова Н.И., Череватова А.В., Жерновский И.В., Кожухова М.И., Войтович Е.В.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – №2015154395; заявл. 17.12.15; опубл. 15.03.17, Бюл. № 8.
7. Смесь для жаростойкого пенобетона на основе наноструктурированного композиционного гипсового вяжущего, способ изготовления изделий: пат. 2613209 Российская Федерация, МПК С 04 В 40/00, С 04 В 38/10, С 04 В 1/00 / Кожухова Н.И., Череватова А.В., Жерновский И.В., Кожухова М.И., Войтович Е.В.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белго-

родский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – №2015154400; заявл. 17.12.15; опублик. 15.03.17, Бюл. № 8.

8. Сухая смесь для получения жаростойкого пенобетона / С.Н. Леонович [и др.] // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 25–29.

9. Особенности формирования жаростойкого пенобетона / С.Н. Леонович [и др.] // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2018. – № 1(34). – С. 56–64.

10. Жаростойкие пенобетоны на вяжущих смешанного типа твердения / В.А. Береговой [и др.] // Строительные материалы. – 2005. – № 1. – С. 50–51.

11. *Хежнев Т.А., Кимов У.З., Думанов К.Х.* Огнезащитные и жаростойкие свойства цементных бетонов на основе вулканических горных пород // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2012. – № 28 (47). – С. 196–201.

12. *Кривенко П.В., Ковальчук Г.Ю.* Жаростойкий газобетон на основе щелочного алюмосиликатного связующего // Строительные материалы. – 2001. – № 7. – С. 26–28.

13. *Дворкин Л.И., Дворкин О.Л.* Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 386 с.

14. Особенности формирования жаростойкого пенобетона / С.Н. Леонович [и др.] // Вестник инженерной школы дальневосточного федерального университета. – 2018.– 1(34).– С. 56–64.

15. *В. Блази* Справочник проектировщика. Строительная физика. – М.: Техносфера, 2004. – 479 с.

16. *Дворкин Л.И., Дворкин О.Л.* Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 386 с.

17. *Гориков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г.* Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. – М.: Высшая школа, 1981. – 336 с.

18. *Ларионова З.М., Виноградов Б.Н.* Петрография цементов и бетонов. – М.: Стройиздат, 1947. – 347 с.

19. *Шахова Л.Д., Балясников В.В.* Пенообразователи для ячеистых бетонов. – Белгород, 2002. – 147 с.

20. Нанодобавки в композициях из неорганических вяжущих: монография / А.М. Сычева [и др.]. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 84 с.

А.В. Мищенко,
доктор техн. наук, доцент
НВВКУ, г. Новосибирск

ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Для неоднородных стержней, имеющих слоистую структуру, испытывающих тепловое и многопараметрическое силовое воздействие, предложен способ вычисления предельных значений управляющих параметров по критерию прочности. Выявлены особенности предельных поверхностей в многопараметрическом пространстве управляющих параметров. Методика расчета проиллюстрирована на численном примере неоднородного стержня тавровой формы сечения, нагруженного поперечной и продольной нагрузками. В двухпараметрическом пространстве построена предельная линия в форме многоугольника, в точках которой критерий прочности выполняется со знаком равенства с различной степенью кратности.

Ключевые слова: неоднородный стержень, слоистый стержень, критерий прочности, многопараметрическое воздействие, тепловое воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

К несущим конструкциям, используемым в инженерных сооружениях военного назначения, предъявляются высокие требования по прочности, жесткости, надежности и экономичности. Эффективность удовлетворения указанных требований существенно повышается при использовании неоднородных конструкций, характеризующихся широким разнообразием применяемых конструкционных материалов, технологических приемов, которые задействуются при создании дискретно- или дисперсно-неоднородных структур. Их применение дает возможность получать весьма эффективные проектные решения для многих конструкторских инженерных задач [1–4]. По большинству показателей данные проекты превосходят проекты, полученные на основе однородных систем.

Внешнее воздействие на реальную конструкцию, как правило, является комплексным и отражает силовые, тепловые и кинематические факторы, при моделировании которых используются параметры, управляющие системами нагрузок, температурными полями и перемещениями некоторых характерных точек. Тепловое воздействие приобретает особую актуальность и значимость для неоднородных структур по причине возникновения в них самоуравновешенных полей тепловых напряжений. Наличие таких полей снижает способность конструкции сопротивляться силовым и кинематическим воздействиям.

В данной статье рассматриваются структурно-неоднородные стержни (элементы плоских конструкций), испытывающие тепловое и многопараметрическое силовое воздействие, исследуются их предельные по прочности состояния, реализующиеся при совместном действии комплекса внешних факторов. Применение разработанного способа дает возможность оценить параметры заданного термосилового воздействия либо при заданном отношении управляющих параметров установить их предельную амплитуду.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Рассмотрим плоский неоднородный стержень, имеющий переменные размеры поперечного сечения (рис. 1,а), при соблюдении условий симметрии относительно плоскости $xу$.

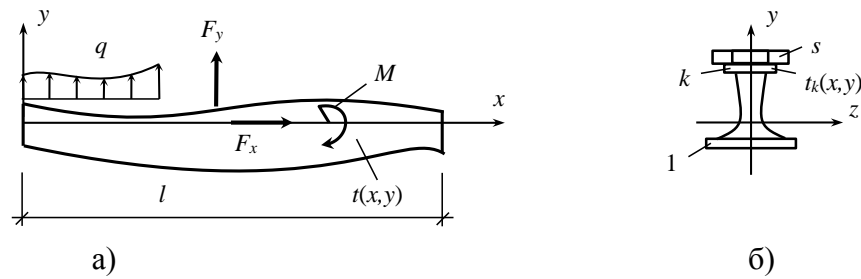


Рис. 1. Расчетная схема неоднородного стержня

Прямолинейная продольная ось стержня, совмещенная с осью x , имеет произвольную геометрическую привязку к структуре стержня, которая содержит s однородных областей-фаз, идеальным образом соединенных между собой. В нормальном к оси x сечении фазы имеют произвольную форму: поперечно-слоистую (рис. 1,б), полярно-слоистую, радиально-слоистую (многослойные трубы) и др.

Будем рассматривать класс тонких неоднородных стержней, выполненных из конструкционных материалов. Используя общепринятые обозначения, запишем соотношения для деформаций и перемещений в виде:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= u_0(x) - \theta(x) \cdot y; & v(x, y) &= v_0(x); \\ \varepsilon_x(x, y) &= \varepsilon_0(x) - \kappa(x) \cdot y; & \varepsilon_y(x, y) &= 0; & \gamma_{yx}(x, y) &= 0; \\ \varepsilon_0(x) &= u_0'; & \kappa(x) &= \theta'; & (\quad)' &= \partial(\quad) / \partial x. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ε_0 , κ – деформация и кривизна оси стержня.

На стержень действуют n вариантов (систем) воздействия, из которых $n-1$ вариантов представлены нагрузками, а один – тепловым воздействием в виде стационарного изменения поля температур $t_k(x, y)$ ($k = 1, \dots, s$), удовлетворяющего: а) условиям сопряжения на межфазных границах; б) граничным условиям задачи теплопроводности заданного типа [5, 6]. В данной работе будем считать функции $t_k(x, y)$ ($k = 1, \dots, s$) известными.

Для указанных n вариантов воздействия введем безразмерные управляющие параметры p_j ($j = 1, \dots, n$):

$$P \in [p_1, p_2, \dots, p_n]. \quad (2)$$

Первые $n-1$ компонентов вектора (2) относятся к силовому воздействию, а последний – к тепловому ($p_n = p_t$).

Внутренние усилия в сечении стержня, составленном из s фаз, определяются выражениями

$$[N, Q, M](x) = \sum_{k=1}^s \iint_{A_k} [\sigma_x^{(k)}, \tau_{yx}^{(k)}, -\sigma_x^{(k)} y] dA. \quad (3)$$

Здесь каждому усилию в квадратных скобках левой части соответствует величина в квадратных скобках правой части.

Основной компонент тензора напряжения σ_x , действующего в k -й фазе с модулем упругости E_k и коэффициентом температурного расширения α_k , учитывая (1), примем на основе закона Дюамеля – Неймана:

$$\sigma_x^{(k)}(x, y) = E_k [\varepsilon_0(x) - \kappa(x)y - \alpha_k t_k(x, y)]. \quad (4)$$

Второстепенные для стержня Бернулли компоненты τ_{yx} , σ_y при необходимости могут быть найдены с использованием условий равновесия [4].

Суммарные усилия и внутреннюю температуру при n -вариантном воздействии с параметрами (2) запишем в виде:

$$S(x) = \sum_{j=1}^{n-1} p_j \bar{S}_j(x) + p_t \bar{S}_t(x), \quad t_k(x, y) = p_t \bar{t}_k(x, y), \quad S \in [M, N, Q], \quad (5)$$

где \bar{S}_j, \bar{t}_k – удельные функции, найденные расчетом системы в k -м варианте при задании для управляющих параметров единичных значений.

Подстановка напряжения (4) в выражения для продольной силы и момента (3) при учете (5) дает систему уравнений, отражающих влияние управляющих параметров на обобщенные деформации:

$$\begin{cases} D_A \varepsilon_0 - D_S \kappa = \sum_{j=1}^{n-1} p_j \bar{N}_j(x) + p_t (\bar{N}_t - \bar{N}_{t0}), \\ D_t \kappa - D_S \varepsilon_0 = \sum_{j=1}^{n-1} p_j \bar{M}_j(x) + p_t (\bar{M}_t - \bar{M}_{t0}), \end{cases} \quad (6)$$

где

$$[D_A, D_S, D_t](x) = \sum_{k=1}^s E_k \iint_{A_k} [1, y, y^2] dA \quad (7)$$

будут обозначены характеристики жесткости нормального сечения неоднородного стержня; \bar{N}_j, \bar{M}_j ($j=1, \dots, n-1$), \bar{N}_t, \bar{M}_t – удельные усилия по вариантам воздействий, входящие в (5); удельные усилия, действующие в сечении стержня при удельном тепловом воздействии с фазовыми полями температур $\bar{t}_k(x, y) = t_k(x, y) / p_t$ ($k=1, \dots, s$) при нулевых деформациях ($\varepsilon_0 = 0, \kappa = 0$) запишем в виде

$$[\bar{N}_{t0}, \bar{M}_{t0}](x) = \sum_{k=1}^s E_k \alpha_k \iint_{A_k} \bar{t}_k [-1, y] dA.$$

Функции удельных усилий \bar{N}_j, \bar{M}_j в j -м варианте воздействия находятся решением линейной краевой задачи для неоднородного стержня при воздействии одной системы заданных воздействий [4].

Оценку прочности неоднородного стержня при многовариантном термосиловом воздействии выполним на основе критерия, представленного через деформации

$$\left| \sum_{j=1}^{n-1} p_j [\bar{\varepsilon}_{0j}(x) - y \bar{\kappa}_j(x)] + p_t [\bar{\varepsilon}_{0t}(x) - y \bar{\kappa}_t(x) - \alpha_k \bar{t}_k(x, y)] \right| \leq \varepsilon_{x,adm}^{(k)\pm} = \varepsilon_{x,u}^{(k)\pm} / k_u^\varepsilon, \quad (k=1, \dots, s). \quad (8)$$

В условии (8) использованы: $\varepsilon_{x,u}^{(k)}$, $\varepsilon_{x,adm}^{(k)\pm}$ – величины предельной и допустимой деформации материала k -й фазы при растяжении и сжатии; $k_u^\varepsilon \geq 1$ – коэффициент запаса. Для описания сложного напряженного состояния следует величины предельных деформаций определить, используя заданные критерии условных или физических предельных состояний (например, теории прочности $\sigma_{eqv}^{(k)} = \Psi(\sigma_x^{(k)}, \tau_{yx}^{(k)}) \leq \sigma_s^{(k)}$). В таком случае потребуется выполнение нескольких уточняющих шагов при изменении в правой части второстепенных компонентов напряжений.

Удельные функции обобщенных деформаций по вариантам воздействий, входящие в (8), находятся решением системы (6) в следующем виде:

$$\bar{\varepsilon}_{0j}(x) = \frac{\bar{N}_j + \bar{M}_j y_s / i_D^2}{D_A \gamma_D}; \quad \bar{\kappa}_j(x) = \frac{\bar{M}_j + \bar{N}_j y_s}{D_t \gamma_D}; \quad (9)$$

$$\bar{\varepsilon}_{0t}(x) = \frac{\bar{N}_t - \bar{N}_{t0} + (\bar{M}_t - \bar{M}_{t0})y_s / i_D^2}{D_A \gamma_D}; \quad \bar{\kappa}_t(x) = \frac{\bar{M}_t - \bar{M}_{t0} + (\bar{N}_t - \bar{N}_{t0})y_s}{D_I \gamma_D};$$

$$y_s(x) = \frac{D_S}{D_A}; \quad i_D(x) = \sqrt{\frac{D_I}{D_A}}; \quad \gamma_D(x) = 1 - \frac{y_s^2}{i_D^2}. \quad (10)$$

Здесь y_s, i_D – координата центра жесткости и радиус жесткости сечения.

В многомерном пространстве (2) условие (8) определяет область допустимых значений управляющих параметров, при которых заданный неоднородный стержень удовлетворяет условиям прочности во всех s фазах. Данная область ограничена предельной поверхностью

$$\Gamma(p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*) = 0. \quad (11)$$

Здесь $P_* \in [p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*]$ – предельные значения параметров (2).

Формально, учитывая квазилинейность вхождения управляющих параметров в подмодульное выражение условия (8), уравнение поверхности (11) можно представить в виде

$$\Gamma(P_*) = \varphi_0 + \sum_{j=1}^n p_{j*} \varphi_j = 0 \quad (12)$$

с коэффициентами $\varphi_j(x_*, y_*, \varepsilon_{x,adm}^{(k)\pm})$ ($j = 0, 1, \dots, n$), зависящими от координат опасной точки x_*, y_* и величины предельной деформации материала k -й фазы (со знаком). Каждой точке поверхности (12) соответствует предельное состояние стержня, в котором при достижении управляющими параметрами значений $[p_1^*, \dots, p_n^*]$ в опасной точке неоднородного стержня с координатами $x_*(P_*)$, $y_*(P_*)$, расположенной на межфазной границе, условие (8) выполняется в форме равенства, в то время как на множестве всех других точек стержня – в форме неравенства. В особых точках поверхности (на ее ребрах и в углах) кратность критерия-равенства должна повышаться.

Для нахождения предельных значений управляющих параметров и построения предельной поверхности применим метод заданных направлений [7]. Представим множество управляющих параметров (2) в виде

$$P = p L, \quad L = [\lambda_1, \dots, \lambda_n], \quad (13)$$

В (13) p обозначена амплитуда многовариантного воздействия, $p = \sqrt{\sum_{j=1}^n p_j^2}$; L – единичный

вектор с безразмерными параметрами $|\lambda_j| \leq 1$, определяющими удельные вклады отдельных вариантов воздействий в суммарное воздействие. Представление (13) посредством задания вектора L , определяющего направление на некоторую точку предельной поверхности, позволяет свести многопараметрическую задачу к однопараметрической.

Подставив (13) в условие (8), записанное со знаком равенства, получим предельную амплитуду воздействия в заданном направлении L пространства (2):

$$p_* = \frac{\varepsilon_{x,adm}^{(k)\pm}}{\sum_{j=1}^{n-1} \lambda_j [\bar{\varepsilon}_{0j}(x_*) - \bar{\kappa}_j(x_*) y_*] + \lambda_n [\bar{\varepsilon}_{0t}(x_*) - \bar{\kappa}_t(x_*) y_* - \alpha_k \bar{t}_k(x_*, y_*)]}. \quad (14)$$

Схема (13), (14) отражает векторный способ получения предельной поверхности при варьировании направления L и нахождении параметра p_* – расстояния от начала координат до поверхности в направлении L . Входящие в (14) координаты опасной точки x_*, y_* выяв-

ляются из условия максимума деформации в расчетной точке по отношению к допустимой деформации материала соответствующей фазы:

$$|e(x_*, y_*)| = \max_{x_i, y_k} \left\{ \sum_{j=1}^{n-1} \chi_j [\bar{\epsilon}_{0j}(x_i) - \bar{\kappa}_j(x_i)y_k] + \chi_n [\bar{\epsilon}_{0r}(x_i) - \bar{\kappa}_r(x_i)y_k - \alpha_k \bar{t}_k(x_i, y_k)] \right\} / \epsilon_{x,adm}^{(k)\pm}.$$

Для установления координат y_* опасных точек в опасном сечении следует, согласно условию (8), иметь в виду, что в предельном состоянии линия $\epsilon_x(x_*, y)$ должна изнутри касаться графика $\pm \epsilon_{x,adm}^{(k)\pm}(y)$ ($k=1, \dots, s$) в одной или более точках [8].

В общем случае предельная поверхность имеет вид многогранника с выпуклыми гранями и криволинейными ребрами. При переходе с одной грани на другую через ребро происходит дискретное изменение координат x_* , y_* или изменение знака предельной деформации, а в пределах граней – непрерывное изменение координат x_* , y_* . В стержнях с постоянными размерами поперечных сечений фаз, нагруженных сосредоточенными воздействиями, либо в частных случаях симметричных расчетных схем грани принимают форму плоскостей, а их пересечение дает прямое ребро. Тогда уравнение (11) принимает следующий вид:

$$\sum_{j=1}^n \frac{p_{j*}}{p_{k,j}^{\pm}(x_*, y_*)} = 1, \tag{15}$$

$$\begin{cases} p_{k,j}^{\pm}(x_*, y_*) = \frac{\epsilon_{x,adm}^{(k)\pm}}{\bar{\epsilon}_{0j}(x_*) - y_* \bar{\kappa}_j(x_*)}, & j=1, \dots, n-1, \\ p_{k,j}^{\pm}(x_*, y_*) = \frac{\epsilon_{x,adm}^{(k)\pm}}{\bar{\epsilon}_{0j}(x_*) - y_* \bar{\kappa}_j(x_*) - \alpha_k \bar{t}_k(x_*, y_*)}, & j=n. \end{cases}$$

Здесь $p_{k,j}^+$, $p_{k,j}^-$ – два предельных значения j -го параметра, полученные при наличии лишь j -й системы воздействия и реализации двух допустимых деформаций $\epsilon_{x,adm}^{(k)+}$, $\epsilon_{x,adm}^{(k)-}$ в k -й фазе.

Формально при рассмотрении предельных состояний, реализуемых лишь в k -й фазе, число граней n -мерной поверхности (15) равно $2n$. Так, при $n=2$ имеем двумерную границу в форме четырехугольника, показанного на рис. 2,а.

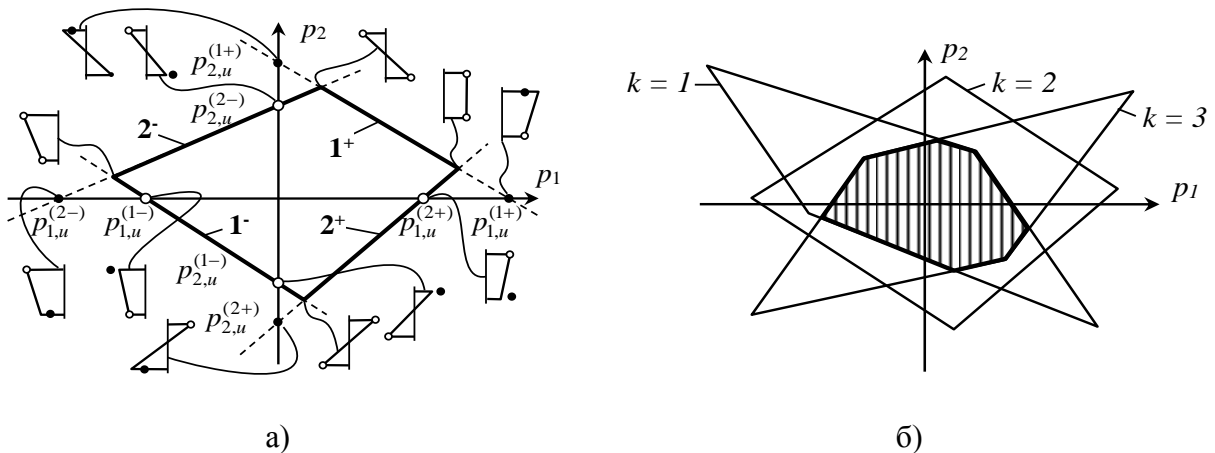


Рис. 2. Границы областей допустимых состояний при $n=2$:
 а – для отдельной фазы; б – для трехфазного стержня

На данной схеме для характерных точек предельной линии показаны эпюры деформаций $\epsilon_x(y)$ в k -й фазе, на которых значения деформаций, соответствующие точкам выполнения

критерия (8) со знаком равенства, показаны светлым маркером, а точки, где предельные значения не достигнуты или превышены – черным. На четырех сторонах многоугольника условие (8) реализуется в форме односточечного критерия, а в угловых точках – в форме двухточечного (на эпюрах деформаций присутствуют два светлых маркера). На сторонах предельной линии указаны: номер опасной точки (1 – низ, 2 – верх) и знак деформации $\varepsilon_{x,adm}^{(k)\pm}$.

Окончательно, при наличии в стержне нескольких фаз, допустимая область получается в результате пересечения допустимых областей, построенных для всех фаз стержня (на рис. 2,б – для трех).

Условие (15) может применяться при рассмотрении нагружений, в которых из $n = n_1 + n_2$ вариантов воздействий одна часть вариантов (n_2) полностью численно определена, а другая (n_1) задана, как было рассмотрено выше, с точностью до управляющего параметра p_j ($j = 1, \dots, n_1$). В таком случае для нахождения n_1 искомых параметров из (15) имеем уравнение

$$\sum_{j=1}^{n_1} \frac{P_{j*}}{P_{k,j}^{\pm}(x_*, y_*)} = 1 - \sum_{j=n_1+1}^n \frac{P_{j*}}{P_{k,j}^{\pm}(x_*, y_*)} = \gamma, \quad (16)$$

которое может использоваться при условии $0 < \gamma \leq 1$.

В частности, если $n_1 = n - 1$, как было сформулировано в (2), а последний вариант является тепловым воздействием, то из (16) получаем условие

$$\sum_{j=1}^{n-1} \frac{P_{j*}}{P_{k,j}^{\pm}(x_*, y_*)} = 1 - \frac{P_{t*}}{P_{k,t}^{\pm}(x_*, y_*)}$$

для оценки снижения несущей способности системы по критерию (8) в результате теплового воздействия.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Исследуем предельные состояния модельного стержня (рис. 3) постоянного поперечного сечения, выполненного в виде составного тавра, вертикальная стенка ($k = 1$) которого изготовлена из стали марки С245, горизонтальная полка ($k = 2$) – из стали С345. Приняты следующие значения параметров: $n = 2$, $l = 3$ м, $t = 6$ мм, $E_1 = E_2 = 205$ ГПа, расчетные сопротивления $R_1 = 240$ МПа и $R_2 = 340$ МПа. В первом варианте нагружения задана сила $F_1 = 60$ кН, во втором – $F_2 = 1$ кН.

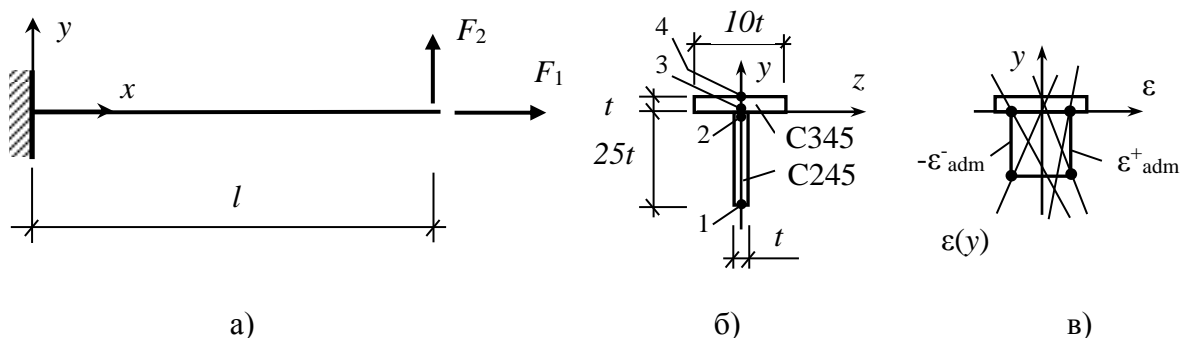


Рис. 3. Расчетная схема неоднородного стержня таврового сечения при двухпараметрическом нагружении:
а – схема нагружения; б – структура поперечного сечения;
в – линии деформаций, вписанные в полигон допустимых деформаций

Требуется построить границу области допустимых состояний стержня при двухпараметрическом силовом воздействии $P = [p_1, p_2]$.

Отсчетную координатную поверхность xz совместим с границей раздела слоев. Для оценки прочности выделим в направлении координаты y четыре расчетные точки, пронумерованные снизу вверх: 1, 2 – на границах первого слоя, 3, 4 – на границах второго.

В результате вычислений по формулам (7), (10) получим:

$$D_A = 35Et^2; \quad D_S = -615Et^3 / 2; \quad D_I = 15635Et^4 / 3;$$

$$y_s \approx -8,786t; \quad i_D \approx 12,203t; \quad \gamma_D \approx 0,482,$$

а по формулам (9) – функции удельных обобщенных деформаций в двух вариантах:

$$\bar{\varepsilon}_{01}(x) = \frac{12508}{210845} \frac{F_1}{Et^2}; \quad \bar{\kappa}_1(x) = -\frac{738}{210845} \frac{F_1}{Et^3}; \quad \bar{\varepsilon}_{02}(x) = -\frac{738}{210845} \frac{F_2 x}{Et^3}; \quad \bar{\kappa}_2(x) = \frac{84}{210845} \frac{F_2 x}{Et^4}.$$

Тогда уравнение границы области допустимых состояний (12) примет вид

$$\frac{2}{210845R_k t^4} |p_1 F_1 (6254t + 369y_*) - 3p_2 F_2 x_* (123t + 14y_*)| = 1.$$

При подстановке в него координат опасных сечений $x_* = 0; l$ и опасных точек y_* , в качестве которых необходимо использовать расчетные точки на границах слоев, получим множество прямых $\Gamma(p_1^*, p_2^*) = 1$. Из них следует исключить прямые, соответствующие предельным состояниям в третьей и четвертой точках, так как они сопровождаются нарушением прочности в первой и второй точках. Наглядно это подтверждается схемой на рис. 3,в, где показаны эпюры предельных деформаций $\varepsilon(y)$, вписанные изнутри в полигон предельных деформаций с касанием в первой и второй точках. Выполнить касание в третьей и четвертой точках не представляется возможным.

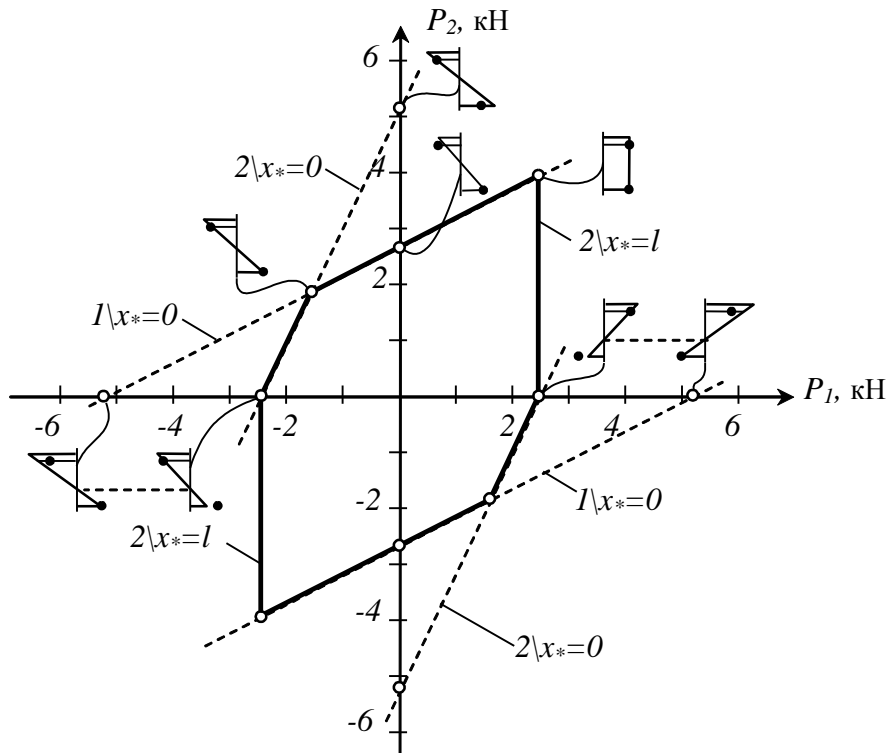


Рис. 4. Граница области допустимых значений управляющих параметров

На рис. 4 пунктиром показаны частные предельные линии, построенные при задании в качестве опасных первой и второй точек. Итоговая предельная граница есть кусочно-линейная внутренняя огибающая. Она ограничивает область допустимых значений управляющих параметров воздействия на неоднородный стержень.

Каждой точке предельной границы соответствует определенное предельное состояние, реализуемое, согласно критерию (8), как минимум, в одной точке опасного сечения. Приведенные на схеме эпюры деформаций наглядно иллюстрируют качественную и количественную трансформацию предельных состояний при изменении управляющих параметров воздействия. На эпюрах точками отмечены предельно допустимые значения деформаций $\varepsilon_{x,adm}^{(1)} = R_1 / E = \pm 0,0012$, $\varepsilon_{x,adm}^{(2)} = R_2 / E = \pm 0,0017$. Видно, что предельные состояния во втором слое не достигаются, что говорит о неполном использовании прочностного ресурса второго материала. Для реализации полного набора предельных состояний необходимо оптимизировать структуру стержня, например увеличить толщину полки тавра либо использовать другие материалы.

На регулярной части границы критерий реализуется как односточный, а в угловых точках – как двухточечный. Кроме того, в двух угловых точках, расположенных в первом и третьем квадрантах, наблюдается непрерывное по координате y выполнение условия равенства (8) в первом слое при $\kappa = 0$.

На диаграмме рис. 4 имеются два участка параллельные оси P_2 , что является особенностью нагружения данного стержня. Причина состоит в том, что опасным на данных участках является сечение $x = l$, на усилия в котором оказывает влияние только параметр P_1 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе критерия прочности неоднородного стержня, записанного через деформации, построен способ оценки управляющих параметров при сложных многопараметрических воздействиях, включая тепловые. Способ позволяет упростить решение задачи путем сведения ее к однопараметрической при заданных отношениях управляющих параметров внешнего воздействия; установить предельную амплитуду заданного термосилового воздействия. Показана методика оценки снижения уровня допустимых нагрузок, обусловленного наличием теплового воздействия на неоднородный стержень.

Список используемых источников

1. Квитко А.В., Орехов А.В., Петров К.В. Научно-экспериментальное обоснование оптимальных параметров балок пролетных строений военных железнодорожных мостов из композитных материалов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 699. – С. 48–52.
2. Тетерс Г.А. Многоцелевое оптимальное проектирование композитных конструкций. Обзор // Механика композитных материалов. – 1996. – Т. 32, № 3. – С. 363–376.
3. Андреев В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел. – М.: АСВ, 2002. – 288 с.
4. Мищенко А.В. Нелинейное термоупругое деформирование многофазных стержней // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 4. – С. 42–51.
5. Немировский Ю.В., Янковский А.П. Теплопроводность однородных и композитных тонкостенных конструкций. – Новосибирск: Арт-Авеню, 2008. – 512 с.

6. *Мищенко А.В.* Моделирование двумерных температурных полей в структурно-неоднородных стержнях с разрывными геометрическими параметрами // Известия вузов. Строительство. – 2018. – № 1. – С. 5–15. – Doi 10.32683/0556-1052-2018-709-1-5-15.

7. *Мищенко А.В., Немировский Ю.В.* Несущая способность слоистых стержней и рам при многопараметрическом динамическом воздействии. Сообщение 1 // Известия вузов. Строительство. – 2011. – № 3. – С. 3–11.

8. *Мищенко А.В., Немировский Ю.В.* Подклассы равнопрочных композитных рамных систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1998. – № 7 (475). – С. 15–21.

В.П. Маслов,
кандидат военных наук, доцент

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАРШРУТОВ С УЧЕТОМ ТАКТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕСТНОСТИ И ВРЕМЕНИ НАЧАЛА ДВИЖЕНИЯ ПО НИМ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

Отмечена особая значимость требований своевременности и скрытности к маневру силами (подразделениями). Для обеспечения их выполнения предлагается методика по определению маршрутов и времени начала марша как элемента маневра подразделений, основанная на априорных оценках проходимости местности и условий маскировки и способе их учета. Приведены особенности разработанных методик, включая аналитические зависимости оценивания маскирующих свойств местности. Изложен алгоритм действий штаба по их оцениванию и учету.

Ключевые слова: маневр подразделений, своевременность и скрытность марша, проходимость местности и ее маскирующие свойства, учет тактических свойств местности.

ВВЕДЕНИЕ

Важным элементом тактики войск и составной частью боя является маневр. Он представляет собой организованное передвижение войск в ходе выполнения боевой задачи в целях занятия выгодного положения по отношению к противнику и создания группировки сил и средств, а также переноса или перенацеливания (массирования, распределения) ударов и огня для наиболее эффективного поражения важнейших группировок и объектов противника [1].

Опыт боевых действий войск в локальных военных конфликтах, в том числе проведения операций на территории Российской Федерации, свидетельствует о возрастающей роли маневра в достижении успеха при выполнении боевых задач. Это обусловлено повышением мобильности войск и эффективности средств поражения, возможностей средств ведения разведки. Кроме того, маневр обеспечивает относительную самостоятельность действий нескольких воинских формирований¹ по единому замыслу, способствует эффективному применению их сил и средств и позволяет при этом проявить разумную инициативу.

Следует отметить, что широкое применение маневра силами, средствами и огнем является одним из основных принципов ведения современного общевойскового боя, а также обеспечивает реализацию других, не менее важных, принципов, в частности, принципа внезапности действий и сосредоточения основных усилий на главном направлении и в нужное время, то есть своевременно. Именно своевременность маневра наряду со скрытностью его проведения – важнейшие факторы, от которых зависит успех маневра и результат выполнения боевой задачи в целом, поскольку совершенный преждевременно маневр может вскрыть для противника замысел действий (исключить внезапность), а проведенный с опозданием – оказаться бесполезным и даже опасным, например по причине возможных боевых потерь.

Для осуществления маневра силами и средствами применяются различные способы передвижения, однако основным из них является марш, совершаемый «в целях прибытия в назначенный район или на указанный рубеж в установленное время, в полном составе и в готовности к выполнению боевой задачи» [1]. Марш совершается скрытно, с максимально возможной при определенных условиях скоростью. В этой связи обеспечение своевременных и скрытных действий подразделений во многом зависит и от способности их командиров принять такое решение, что-

¹ Обобщенное наименование подразделений, воинских частей, соединений, объединений и иных структурных единиц вооруженных сил и иных войск, имеющих специфические особенности предназначения, формирования и комплектования [2].

бы при сложившихся условиях обстановки и прогнозируемом ее развитии было возможным проведение марша и достижение его целей. Для этого прежде всего необходимы соответствующие методики, чтобы получить априорные оценки характеристик марша и корректно учесть условия его проведения.

ОЦЕНИВАНИЕ СВОЕВРЕМЕННОСТИ МАРША ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

Мобильные² воинские формирования, в том числе подразделения, должны обладать маневренностью. Общим показателем маневренности подразделений, воинских частей и соединений видов и родов войск Вооруженных сил является время, затрачиваемое на перемещение из одного района в другой (перегруппировку), сосредоточение в назначенном районе, развертывание для боя (операции), построение и перестроение боевых порядков, перенос усилий (огня) с одного направления (цели) на другое [2]. Характерно, что маневренность, как и другие показатели боевых возможностей, оценивается для определенных задач, при конкретных (в том числе прогнозируемых) условиях обстановки. Следовательно, при оценивании своевременности марша подразделения необходимо учесть степень его подвижности (скорости движения) при передвижении в заданный район (на установленный рубеж) при определенных (прогнозируемых) условиях.

На проведение марша в значительной мере влияет местность. Местность – часть земной поверхности со всеми ее элементами. Местность является одним из факторов наземной тактической обстановки [3, 4]. Ее влияние на действие частей и подразделений, определяемое характеристиками основных топографических элементов местности (ОТЭМ) (рельеф, растительный покров, почвогрунты, гидрография, дорожная сеть и населенные пункты), заключается в формировании условий, способствующих или усложняющих выполнение ими боевых задач и задач всестороннего обеспечения их действий. Характер и величину такого влияния определяют тактические свойства местности (ТСМ). С учетом основных требований к маршу – скрытности и максимально возможной скорости движения – определяющее влияние на него окажут такие ТСМ, как проходимость местности и ее маскирующие свойства (условия маскировки). Их оценку проводят применительно к конкретным задачам, решаемым частями, подразделениями, с учетом тактико-технических данных боевых и транспортных средств и метеоусловий.

Необходимость такого рода оценок возникает при принятии решения на марш подразделений и последующем его планировании, а также при корректировке ранее принятого решения в ходе боя, в связи с изменившимися условиями обстановки. При этом для обеспечения своевременности проведения марша в одном случае потребуется определить маршрут(ы) движения и время его начала исходя из определенного или заданного согласно замыслу боя времени завершения марша (для прибытия на рубеж или в район) и условий движения по выбранному маршруту. В другом случае – такой маршрут(ы) движения подразделения, чтобы, находясь в состоянии готовности немедленно приступить к маршу, было возможно в максимально короткий срок выйти на указанный рубеж или в заданный район. Иногда задача может иметь более общий вид: при выработке замысла, исходя из маневренных возможностей подразделения при определенных условиях проходимости местности и маскировки, требуется определить возможные рубежи или районы действий подразделений.

Для получения количественных оценок своевременности совершения марша, учитывая сущность этого требования, вполне обоснованным будет использовать в качестве *показателя своевременности марша* величину ΔT , характеризующую степень близости расчетного вре-

² Реализующих способность быстрого передвижения до начала и в ходе боевых действий, развертывания в боевой (предбоевой) порядок и свертывания в походный порядок (www.dic.academic.ru).

мени завершения марша T_h ко времени (астрономическому), определенному замыслом марша T_z , вычисляемую как их разность, то есть

$$\Delta T = T_z - T_h. \quad (1)$$

Для каждого из рассматриваемых маршрутов для марша ($\{M_i\} = M, i = \overline{1, I}$) расчетное время его завершения T_{hi} определяется путем сложения астрономического времени начала движения (T_{ci}) по i -му маршруту и прогнозируемого времени движения по нему (T_{di}), то есть

$$T_{hi} = T_{ci} + T_{di}. \quad (2)$$

Значения T_{di} вычисляются исходя из априорных оценок протяженности L_i маршрута M_i и возможной средней скорости движения по отдельным его участкам.

Учитывая различия условий движения (проходимости местности U) подразделений на отдельных участках маршрутов и возможные их изменения, каждый M_i маршрут для предполагаемого марша представляется множеством элементарных участков ($\{j\} = J$). Исходя из этого зависимость для вычисления значений T_{di} для любого i -го маршрута имеет следующий вид:

$$T_{di}(U_{ij}) = \sum_{j=\overline{1, J}} \frac{l_{ij}}{v_{ij}}, \quad (3)$$

где U_{ij} – кортеж параметров, характеризующих условия проходимости местности на j -м элементарном участке i -го маршрута при движении по нему в μ -м направлении, вычисляемых с учетом совокупного влияния присущих участку основных топографических элементов местности (ОТЭМ) на определенные тактико-техническими данными (ТТД) шасси скорость их движения (v_{ij}) и расход горючего (g_{ij})³, при заданных (прогнозируемых) характеристиках метеорологических условий, $U_{ij} = \langle Nap_{ij}^{\mu}, v_{ij}^{\mu}, g_{ij}^{\mu}, l_{ij}^{\mu} \rangle$. Оценивание условий движения по каждому j -му участку проводится в следующих направлениях: $Nap_{ij}^{\mu}, \mu = \overline{1, 4} : C \leftrightarrow Ю; 3 \leftrightarrow В; C-3 \leftrightarrow Ю-В; Ю-3 \leftrightarrow C-В; l_{ij}$ – протяженность маршрута при движении по j -му элементарному участку i -го маршрута в направлении N_{ij} ; v_{ij} – средняя скорость движения подразделения (его средств вооружения, смонтированных на определенных видах шасси) по j -му участку, вычисляемая по условиям проходимости местности.

Величина показателя своевременности маневра ΔT может быть положительной, отрицательной или равной нулю. При положительных значениях показателя ($T_z > T_h$) полагаем, что марш может быть завершён раньше времени T_z , предусматриваемого замыслом; при отрицательных значениях ($T_z < T_h$) марш возможен лишь с опозданием. Равенство показателя ΔT нулю означает, что по априорным оценкам марш может быть проведен своевременно и завершён точно в определенное замыслом время T_z .

В качестве критерия своевременности маневра принято условие минимизации положительных значений показателя ΔT .

В том случае, когда важным условием для продолжения действий подразделения является запас горючего, поиск и выбор маршрутов марша осуществляется при ограничениях на возможный расход горючего для его проведения (G_i):

$$G_i = \sum_{j=\overline{1, J}} (g_{ij}) \leq G_{zap} - 0,2 Zapr, \quad (4)$$

где G_{zap} – сохранившийся запас горючего боевых и транспортных средств подразделения;

$Zapr$ – количество топлива (литров), равного одной заправке⁴, неснижаемый его запас составляет 0,2 заправки.

³ Учитывается исходя из содержания понятия «проходимость местности».

⁴ Расчетно-снабженческая единица, равная емкости топливных баков гусеничной техники или количеству горючего для техники на колесных шасси, необходимому на 500 км пути, при нормативном его расходе.

ОЦЕНИВАНИЕ УСЛОВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА МАРШ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

В зависимости от располагаемого времени для принятия решения на марш, обеспеченности воинских частей и подразделений средствами компьютерных информационных технологий и методическим аппаратом может быть получена качественная или количественная оценка ТСМ.

В результате качественного оценивания проходимости местности и ее маскирующих свойств (МСМ) могут быть получены выводы, определяющие в основном характер влияния местности на решаемую задачу. На основе топографических (в том числе электронных) карт местности, ее описаний и разведывательных данных⁵ эмпирически могут быть определены участки местности в районе действия подразделения, препятствующие или затрудняющие движение боевых и транспортных средств. Также возможно выявить наличие и приближенно оценить емкость естественных масок, которые с учетом проходимости местности могут быть использованы в целях обеспечения скрытности марша.

Следует отметить, что использование геоинформационных систем (ГИС) может в определенной мере облегчить получение качественных оценок приведенных выше ТСМ [5]. Так, по приведенному разработчиком описанию возможностей принятого на снабжение войск ГИС «Оператор» отмечено, что сформированная по векторным картам 3D-модель местности «позволяет оценить ее свойства» [6]. Несомненно, на трехмерной карте более наглядно отображаются и лучше визуально воспринимаются детали и формы рельефа, лесной растительный покров и другие топографические элементы местности. Имея определенный опыт, может быть получена качественная оценка их влияния на боевую задачу и учтена при обосновании замысла боя. Возможности этой ГИС позволяют получить и некоторые количественные оценки, например условий наблюдения, путем построения зон видимости. Кроме того, результаты расчетов длин, площадей, объемов по карте, а также построение профилей, вычисление границ зон затопления и отображение их на карте могут быть использованы в качестве исходных данных для оценивания условий проходимости местности и ее оборудования в инженерном отношении. Встроенная задача «Расчеты по карте» может использоваться для построения (выбора кратчайших) маршрутов движения только по отображенной на карте дорожной сети.

В версию «Комплекс инженерных задач», добавленную в состав ГИС «Оператор», включен режим «Пройдемость по рельефу» [7]. Однако новый режим может быть использован лишь для предварительной оценки проходимости местности транспортными средствами, так как при определении возможности и условий движения не учтены характеристики почвогрунтов, растительного покрова и гидрографии, а также направления движения вниз по склону и вдоль него. Такой подход неизбежно приведет к существенным погрешностям в результатах оценивания.

Используя таким способом полученные качественные оценки, представляется возможным наметить маршруты марша подразделения в определенный район или на установленный рубеж. Далее, следуя изложенным в боевом уставе [1] указаниям, необходимо произвести расчеты марша по каждому из маршрутов и с учетом имеющегося ресурса времени установить приемлемый из них, а также время начала движения и резерв времени на подготовку.

Из приведенного выше описания способа оценивания ТСМ следует, что при наличии лишь качественных их оценок весьма сложно обеспечить своевременность марша подразделения и скрытое его проведение. Исходя из этого, особую значимость приобретает возможность получения количественных оценок ТСМ, что непосредственно будет способствовать обеспечению своевременности и скрытности марша. С этой целью могут быть

⁵ Используются сведения о характеристиках дорожной сети, рельефа, растительного покрова (особенно лесного), почвогрунтов, объектов гидрографии, населенных пунктов.

использованы существующие методики оценивания проходимости местности [8–11] и МСМ [12] при условии обеспечения войск на тактическом уровне соответствующими информационно-вычислительными средствами.

А. Оценивание проходимости местности. Отметим особенности методики оценивания проходимости местности [8, 9].

1. Район боевых действий η -го подразделения представляется множеством R_η , покрывающим его площадь участков r_k [элементарных площадок (ЭП)]. Их размеры определяются требованиями к точности оценок и возможностями по подготовке исходных данных. Они могут соответствовать размерам участка местности в пределах ячейки километровой сетки листа карты, например 250×250 м, или составлять его часть (125×125 м):

$$R_\eta = \{r_k\}, k = \overline{1, K} \in N, \forall k \exists (i, j): U_k = U_{ij}. \quad (5)$$

2. Для каждой r_k -й ЭП при заданных исходных данных вычисляются значения показателей U_k в μ -х направлениях, характеризующих условия ПМ ($\langle Nap_k^\mu, v_k^\mu, g_k^\mu, l_k^\mu \rangle$) (рис. 1), а также возможное время движения по ней (t_k^μ).

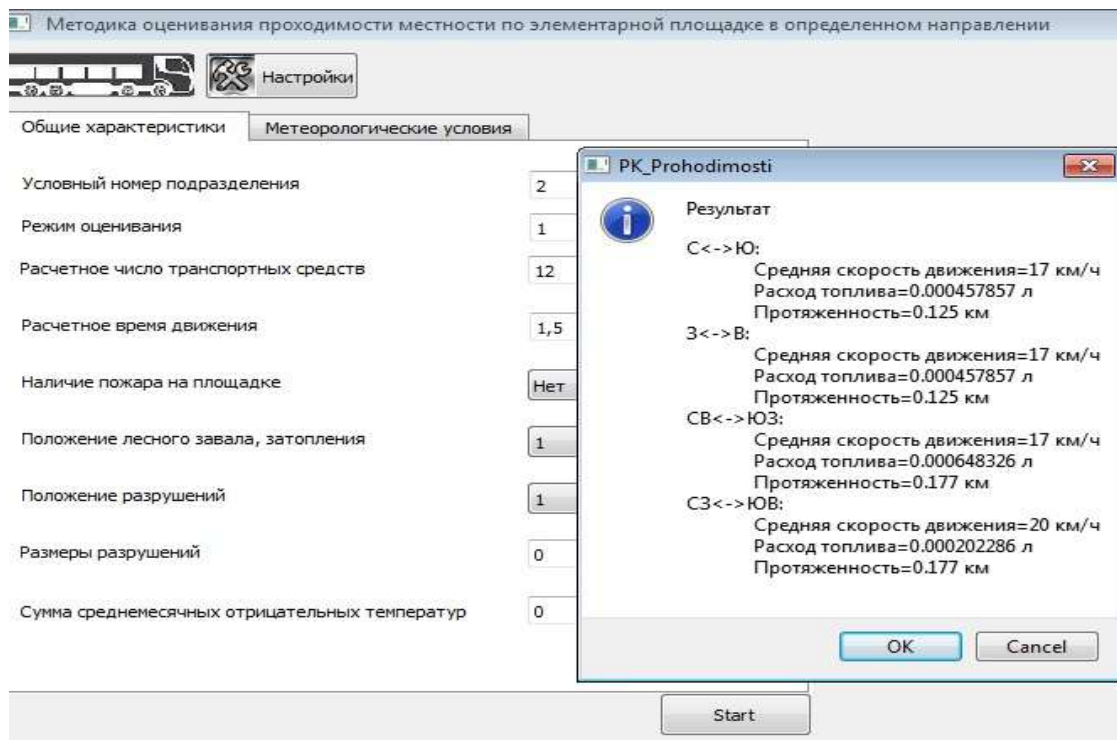


Рис. 1. Результаты оценивания проходимости местности в пределах ЭП

3. Строится сеть:

$$\begin{cases} Q: B \times B, \\ \varphi: Q \rightarrow R^2, \end{cases} \quad (6)$$

где B – множество вершин (узлов) сети, соответствующее числу элементарных площадок (ЭП) $\{r_k\}$ района боевых действий, $B = (b_1, b_2, \dots, b_K)$;

φ – вещественная скалярная функция, ставящая в соответствие каждому пути $\langle b_m, b_n \rangle$, являющемуся одним из возможных по условиям проходимости местности направлений движения ($Nap_{ij}^\mu, \mu = \overline{1, 4}$) по ЭП $\{r_k\}$, то есть, $\langle b_m, b_n \rangle \exists | v_k^\mu \neq 0$, приведенные выше показатели проходимости местности $U_k: v_k^\mu, g_k^\mu, l_k^\mu$ и возможное время движения по ней t_k^μ :

$$\forall \langle b_m, b_n \rangle = l_s, (v_k^\mu, g_k^\mu, l_k^\mu, t_k^\mu) \xrightarrow{Nap(\mu)} l_s. \quad (7)$$

4. Для варианта построенной сети формируем граф

$$Q^*(B^*, L^*) \subseteq Q \tag{8}$$

так, что выполняются следующие условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall s \in K, b_s \in B^* \mid \exists < b_{s-1}, b_s > \wedge < b_s, b_{s+1} >, \\ l_s = \left| l_k^\mu \right| \in L^*, \forall s, k \in K, \mu = \overline{1,4} \mid \exists b_{s+1} \vee v_{s+u} \vee, \\ \vee b_{s+(u+1)} \vee b_{s+(u-1)}, \end{array} \right. \tag{9}$$

где u – количество ЭП в ряду регулярной сетки выделенного района боевых действий.

При заданных условиях степень каждой из вершин множества B^* графа Q^* больше или равна двум, т. е. s -й вершине инцидентны, как минимум, два ребра и в подграфе Q^* исключены ребра, заканчивающиеся висячими вершинами, то есть в направлениях непроходимых ЭП.

5. Множество ребер L^* графа Q^* с определенными, согласно выражению (6), весовыми характеристиками, представляющих возможные направления движения подразделения по дорожной сети и вне дорог по совокупности ЭП, составляющих район его боевых действий, отображаются на карте или отдельно (его фрагмент показан на рис. 2).

На полученном таким образом подграфе Q^* , построенном на сети Q с учетом состояния проходимости местности, возможно решение задач выбора маршрутов для маневра подразделений и определение временных параметров его проведения: начала движения от исходного пункта (рубежа) и прибытия на указанный рубеж (в район).

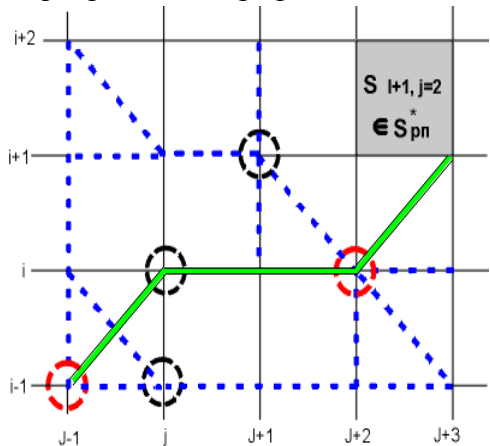


Рис. 2. Фрагмент графа Q^*

Б. Оценивание маскирующих свойств местности. МСМ характеризуются главным образом наличием естественных масок, а также цветом и пятнистостью местности. Изучение условий маскировки заключается в выявлении естественных масок (древесная растительность, населенные пункты, глубокие складки рельефа) и определении их емкости, оцениваемой количеством условных батальонных единиц, которые могут быть скрытно рассредоточены в 2-3 км друг от друга при условии использования всей площади масок [3]. Кроме того, необходимо учитывать характер местных предметов, степень вертикального и горизонтального расчленения рельефа, а также цвет и рисунок земной поверхности.

В справочном пособии [4] МСМ определяются маскировочной емкостью района C_M , которая, в свою очередь, характеризуется количеством подразделений, скрытно размещаемых в естественных масках по принятым нормам рассредоточения. При этом площадь леса, необходимая для размещения подразделений F_M , вычисляется по формуле

$$F_M = 2500nK_n, \text{ м}^2 \tag{10}$$

где n – число единиц техники в подразделении;

K_n – коэффициент, учитывающий наличие в районе расположения подразделений участков местности, непригодных для размещения техники (болота, густой лес и т. п.), обычно принимается $K_n = 2$.

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что МСМ определяются главным образом наличием естественных масок и оцениваются маскировочной емкостью C_M участка местности, на котором подразделения выполняют свои задачи. Однако при этом не в полной мере учитываются характеристики местного растительного покрова и степень пересеченности местности. В то же время, например, густота леса, наличие подлеска, бурелома и просек,

высота деревьев и степень сомкнутости крон во многом будут определять возможность действий подразделений и скрытия их от разведки противника. С другой стороны, имея сведения лишь о емкости естественных масок, практически невозможно определить, как надежно подразделения будут скрыты от разведки противника.

Наиболее детально разработана методика оценки влияния маскирующих свойств местности на эффективность обнаружения наземных объектов бортовыми РЛС [11], где используется имитационная математическая модель конфликтного процесса, в котором за заданное время одна из сторон стремится обнаружить движущиеся объекты (колонны техники), а другая – обеспечить скрытность передвижения, используя маскирующие свойства рельефа местности. В ней, однако, учитывается только один из основных топографических элементов местности – ее рельеф, что существенно снижает точность оценивания. В этой связи для получения количественных априорных оценок условий маскировки [или (МСМ)] и их последующего учета в целях обеспечения скрытности действий подразделений при подготовке и в ходе маневра примем следующий показатель: возможность скрытия подразделения от разведки противника P_C (при использовании для маскировки подразделений лишь естественных масок).

Лучшими по сравнению с другими топографическими элементами местности маскирующими свойствами обладает лесной растительный покров, где личный состав, техника и вооружение подразделений могут быть скрыты от обнаружения видовой воздушной и космической разведкой противника. При этом такие характеристики лесных массивов, как густота леса, вид подлеска, наличие бурелома, просек, а также грунтовлажностные условия произрастания в большей мере определяют возможность размещения в нем и передвижения подразделений. Основным фактором, определяющим значение показателя P_C , является сомкнутость крон деревьев (S_K). Она характеризуется процентным соотношением суммарной площади местности под пологом леса, закрытой кронами деревьев, не просматриваемой сверху (S_C), к общей площади лесного массива (S_f) в пределах отдельной ЭП или всего района:

$$S_K = (S_C/S_f) \cdot K_s \cdot 100\% , \quad (11)$$

где K_s – коэффициент, учитывающий сезонные изменения лесного растительного покрова, его значения могут изменяться в интервале [0,25 ... 1,0].

Значения S_K могут быть определены по данным аэрофотосъемки или на основе данных топокарт о характеристиках лесного растительного покрова. Во втором случае приближенные значения величины S_K (при $h \geq 4$, $l_d \geq 3,5$) могут вычисляться по следующей эмпирической зависимости:

$$S_K = h^{0,05} \cdot 320/l_d \cdot K_s, \% , \quad (12)$$

где h , l_d – относительная высота и среднее расстояние между деревьями соответственно, м.

На основании данных [3, 4, 12–17] о просматриваемости земной поверхности при различной сомкнутости крон построен график изменения показателя P_C в зависимости от значений S_K (рис. 3,а).

Интерполяционный многочлен, описывающий график P_C , имеет следующий вид:

$$P_C = f_1(S_K) = 1,0 \cdot 10^{-6} S_K^3 + 7,9 \cdot 10^{-5} S_K^2 + 1,21 \cdot 10^{-2} S_K - 0,008. \quad (13)$$

Влияние рельефа на возможность скрытных действий подразделений определяется в основном пересеченностью местности оврагами, балками, лощинами и другими естественными препятствиями, а также относительным превышением. При этом относительное превышение между отдельными точками на местности влияет фактически лишь на размеры зон видимости и крайне мало – на обеспечение скрытности действий подразделений при ведении противником воздушной разведки.

Пересеченность местности по условиям рельефа определяется как отношение суммарной площади участков местности, занятых естественными препятствиями S_p , к общей площади участка местности S_o [3, 4]:

$$\rho = (s_p/s_o) \cdot 100\% , \tag{14}$$

где ρ – показатель, характеризующий степень пересеченности местности.

Возможности слабопересеченной местности ($\rho < 10\%$) по скрытию подразделений весьма ограничены. Значение показателя P_C для местности со степенью пересеченности 1–5 % и при отсутствии лесного растительного покрова может составить величину порядка 0,05...0,1.

Когда значение ρ достигает 40 %, P_M возрастает примерно до 0,65. В то же время следует учитывать, что на сильнопересеченной местности ($\rho > 30\%$) существенно уменьшаются возможности по применению боевой и транспортной техники. В этой связи принятая область изменения значений ρ заключена в интервале [0...40]. График изменения показателя P_C , в зависимости от степени пересеченности местности ρ , построенный методами интерполяции и экстраполяции на основе изложенных в [3, 4, 12–17] данных, показан также на рис. 3,а. Интерполяционный многочлен, описывающий эту зависимость, имеет вид

$$P_C = f_2(\rho) = -1,667 \cdot 10^{-5}\rho^3 + 1,135 \cdot 10^{-3}\rho^2 - 2,084 \cdot 10^{-2}\rho + 0,01. \tag{15}$$

На пересеченной местности с лесным растительным покровом вероятность скрытия подразделений будет одновременно зависеть от степени ее пересеченности (ρ) и характеристик лесного покрова (S_K). Величина показателя P_C в таком случае будет определяться системой равенств (14). Характер зависимости $P_C = f_\kappa(S_K, \rho)$, $\kappa = 3,4,5$, показан на рис. 3,б.

$$P_C = \begin{cases} P_C = f_3(S_K) = -1,0 \cdot 10^{-6}S_K^3 + 7,9 \cdot 10^{-5}S_K^2 + 1,21 \cdot 10^{-2}S_K + 0,09, & 5\% < \rho \leq 10\%, \\ P_C = f_4(S_K) = -1,56 \cdot 10^{-6}S_K^3 + 1,09 \cdot 10^{-4}S_K^2 + 1,21 \cdot 10^{-2}S_K - 0,008, & 10\% < \rho \leq 25\%, \\ P_C = f_5(S_K) = -3,1 \cdot 10^{-6}S_K^3 + 2,55 \cdot 10^{-4}S_K^2 + 1,2 \cdot 10^{-2}S_K - 0,01, & 25\% < \rho \leq 40\% \end{cases} \tag{16}$$

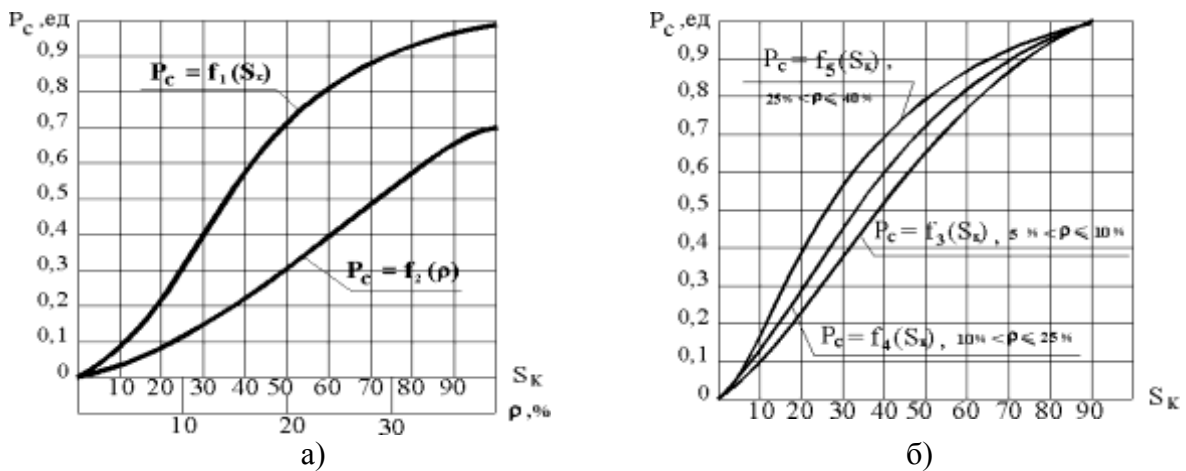


Рис. 3. Графики изменения величины P_C в зависимости от значений S_K , ρ : а – при раздельном влиянии характеристик (S_K , ρ); б – при их совместном влиянии

Сущность методики оценивания условий маскировки (или (МСМ)), основные положения которой приведены ниже, заключается в определении значений показателя P_C .

1. На основании данных о лесном растительном покрове для множества ЭП ($\{r_k\} = R_\eta$) рассматриваемого участка местности R_η , используя зависимость (12), определяется сомкнутость крон деревьев S_K . При этом следует учитывать, что естественные маски не могут быть использованы, если степень пересеченности местности и/или характеристики рельефа, растительного покрова, грунтов и гидрографии препятствуют действиям подразделений или значительно их затрудняют.

2. По формуле (14) на основании данных о рельефе местности, определяемых по крупномасштабной карте или в результате разведки местности, вычисляется значение показателя ρ . При отсутствии в пределах ЭП лесного растительного покрова только его значения будут определять условия маскировки.

3. С использованием зависимостей (13), (15), (16), вычисляются априорные значения показателя P_C в пределах ЭП (возможно и для участка местности больших размеров). Точность оценки сопоставима с точностью исходных данных о характеристиках ОТЭМ.

4. Вычисляются средние значения показателя P_C^i на множествах элементарных участков ($\{r_j^i\}, j \in K$), составляющих i -е маршруты [(17) или (18)]. По их значениям оценивается возможность скрытного совершения марша подразделением по каждому из рассматриваемых маршрутов M_i . При необходимости учитывается также соотношение возможного периода времени ведения противником воздушной (космической) разведки (T_{rz}^i) к расчетному времени проведения марша T_h^i или принимается $T_{rz}^i/T_h^i=1$:

$$P_C^i = (\sum_j P_{C_j}^i / J_i) \cdot T_{rz}^i / T_h^i, \quad (17)$$

где J_i – количество участков (ЭП), составляющих M_i маршрут.

Другой способ вычисления значений показателя P_C^i заключается в определении отношения суммарной длины закрытых участков маршрутов M_i (проходящих по дорогам с обсадками, в глубоких сухих лощинах, в лесу) ($l_{f_{ij}}$) к общей протяженности маршрута (L_i):

$$P_C^i = (\sum_j l_{f_{ij}} / L_i) \cdot T_{rz}^i / T_h^i, \quad j(f) = \overline{1, K_f}, \quad (18)$$

где K_f – количество закрытых участков (ЭП) M_i маршрута.

Величина показателя P_C^i , полученная изложенными выше или иными способами, принимается в качестве ограничения при поиске маршрутов марша по условиям проходимости местности или служит основанием для их выбора из множества найденных.

УЧЕТ УСЛОВИЙ ПРОХОДИМОСТИ МЕСТНОСТИ И МАСКИРОВКИ

Способы учета ТСМ в целях их использования или снижения неблагоприятного влияния местности на решаемую задачу определяются в процессе проведения оценки обстановки и выработки замысла марша.

Для работы необходимо наличие программных и аппаратных средств, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к средствам работы с ГИС «Оператор» (Карта 2011), а также программной реализации изложенных выше методик и заблаговременно подготовленных пользовательских баз данных с характеристиками ОТЭМ по ЭП в пределах листа рабочей карты; ТТД шасси боевой и транспортной техники подразделений; данными о влиянии метеорологических условий на характеристики ОТЭМ и ТТД шасси.

Укрупненный алгоритм действий штаба батальона (бригады) по определению таких маршрутов марша и времени начала его проведения, чтобы в нужный момент скрытно прибыть на установленный рубеж (в назначенный район), может быть следующим.

Шаг 1. Загрузить электронную (пользовательскую) карту местности крупного масштаба и необходимое программное обеспечение.

Шаг 2. На карте местности отметить местоположение подразделения и установленный рубеж (назначенный район).

Шаг 3. Выделить на карте участок местности прямоугольной или квадратной формы, включающий нанесенные отметки.

Шаг 4. Определить множество R_{η} ЭП (5), составляющих выделенный участок местности и установить его границы ($\{k\}$).

Шаг 5. Используя методики и базы данных для всех входящих в выделенный участок местности ЭП ($\{r_k\}$) вычислить значения показателей $U_k: \langle Nap_k^{\mu}, v_k^{\mu}, g_k^{\mu}, l_k^{\mu} \rangle$ и t_k^{μ} . При необходимости ввести ограничения на условия маскировки при последующем поиске маршрутов, произвести вычисления (11) – (18) значений показателя возможности скрытия подразделения от разведки противника P_{Ck}^i .

Массив вычисленных значений показателей (размерностью $[s, u]$: где s – количество ЭП в ряду; u – количество рядов ЭП в выделенном участке местности) описывает сеть Q (6).

Шаг 6. Применив в качестве ограничений условия (8), построить граф Q^* (8), в котором вершины q_{su} и ребра l_s формируют сохранившиеся элементы массива, вычисленного на предыдущем шаге. Вершины графа отображают проходимые ЭП, а его ребра характеризуют возможные направлений движения по этим ЭП.

Для наглядности отдельным файлом получить графическое его представление с выделенными вершинами, соответствующими ЭП с удовлетворяющими требованиям условиям маскировки (ограничениями на величину $P_{Ck}^{\eta}(\{r_k\})$).

Шаг 7. Используя редактор векторной карты дополнить существующую сеть дорог – нанести на выделенный участок местности те ребра графа Q^* из множества $\{l_s\}$, которые соответствуют возможным направлениям движения вне дорог.

Шаг 8. Установив исходную и конечную точки (соответствующие ЭП) искомого маршрутов марша, условия (минимальный путь или время и ограничения на значения показателя P_C), провести их поиск, используя встроенные задачи «Расчеты по карте» (вкладка «Работа с сетью» доступна, так как существующая дорожная сеть дополнена возможными направлениями движения вне дорог) или известными методами, например Дейкстры или A^* .

Есть другой способ определения маршрутов и их выбора. Полученный на шаге 6 файл с графом Q^* нужно сопоставить с 3D изображением выделенного участка местности. Визуально оценить условия движения на участке между исходной и конечной точками искомого маршрута и с учетом выделенных вершин графа наметить 3-4 возможных маршрута марша. Подготовить файл исходных данных с координатами намеченных маршрутов. Для каждого из них вычислить значения показателей проходимости местности: протяженность маршрута L_M^i ; среднюю скорость движения V_{cp}^i ; время движения T_M^i ; суммарный расход горючего G_M^i (при необходимости произвести проверку выполнения условия (4) по запасу горючего) и показателя P_C^i , используя зависимости (17) или (18).

Шаг 9. Установив необходимое (или имеющееся) время на подготовку марша, задать время (астрономическое) его начала T_c . Приравняв $T_M^i = T_{ai}$, вычислить (2) значения расчетного времени его завершения T_{hi} для каждого из маршрутов. По установленному времени завершения марша T_z определить величины показателя своевременности марша ΔT (1) для каждого из намеченных маршрутов.

Шаг 10. По критерию своевременности марша выбрать приемлемый маршрут, принимая также во внимание расходуемый запас топлива и условия маскировки, или путем итераций скорректировать время начала марша T_{ci} (прохождения исходного пункта маршрута), повторить действия на предыдущем шаге.

Найденные при таком подходе маршруты и установленное время начала марша в большей мере будут удовлетворять требованиям своевременности и скрытности его проведения, что также повысит обоснованность других элементов замысла и решения на марш в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований выявлены наиболее важные требования к маневру подразделений (своевременности и скрытности), которые предъявляются и к основному элементу маневра – маршу. Разработана методика по определению маршрутов для совершения марша подразделений и времени его начала, основанная на априорных количественных оценках условий проходимости местности и ее маскирующих свойств, и методика оценивания маскирующих свойств местности. Предложен алгоритм действий штаба подразделения по учету этих ТСМ в целях обеспечения своевременности и скрытности марша.

Полученные результаты могут быть использованы в процессе боевой подготовки войск, при проведении исследований по оценке влияния местности на выполнение мобильными формированиями боевых задач и определении способов их действий с учетом тактических свойств местности, КШТ и КШВИ, а также в учебном процессе, при реализации образовательных программ магистратуры и специалитета, в дисциплинах «Оперативное искусство», «Управление боевым, тыловым и медицинским обеспечением применения воинских частей и соединений космических войск», «Управление техническим, тыловым и медицинским обеспечением воинских частей и соединений противодействия космическим средствам» и «Общая тактика».

Список используемых источников

1. Боевой устав Сухопутных войск.– М.: Воениздат, 2013. – Ч. 2: Батальон, рота.
2. Военный энциклопедический словарь. – М.: Воениздат, 2007. – 832 с.
3. Военная топография / А.А Псарев [и др.] – М.: Воениздат, 1986. – 384 с.
4. Справочник по военной топографии / А.М. Говорухин [и др.]. – 2-е изд., перераб. – М.: Воениздат, 1980. – 352 с.
5. *Маслов В.П., Исаков Е.Е., Пономарев С.Ю.* Проблемные аспекты использования геоинформационных систем в управлении мобильными воинскими частями и подразделениями // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 647. – С. 101–108.
6. Новые возможности ГИС «Оператор». – URL: <http://www.gistoolkit.ru/download/prezents/operatormew.pdf> (дата обращения: 20.02.2014).
7. КБ «Панорама»: комплекс инженерных задач автоматизирует процедуры оценки проходимости местности. – URL: <http://www.gisa.ru/100106.html> (дата обращения: 28.01.2016).
8. *Маслов В.П.* Методика оценивания и учета влияния местности на живучесть мобильных формирований и подразделений сил управления КА РВСН: дис...канд. воен. наук. – СПб., 1999. – 260 с.
9. *Исаков Е.Е., Маслов В.П.* Совершенствование методики оценивания проходимости местности с учетом возможностей геоинформационных систем // Материалы IV Всероссийской научной конференции 20–21 апреля 2016 года «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т. 3. – С. 118–123.
10. Способ прокладывания маршрута передвижения на пересеченной местности: патент RU № 2439496, МПК G01C 21/34 от 15.07.2010 / Мухин А.И., Шлык А.М., Руднев Н.И. – URL:<http://www.findpatent.ru/patent/2439496.pdf> (дата обращения: 26.02.2013).
11. *Маслов В.П., Исаков Е.Е., Ковалёв Ю.В.* Методика оценивания проходимости местности с учетом требований к повышению маневренности мобильных воинских подразделений воздушно-космических сил // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2020. – № 13. – С. 46–53. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenivaniya-prohodimosti>

mestnosti-s-uchetom-trebovaniy-k-povysheniyu-manevrennosti-mobilnyh-voinskih-podrazdeleniy/viewer (дата обращения: 16.04.2020).

12. Керков В.Г., Скабаров М.М. Методика оценки влияния маскирующих свойств местности на эффективность обнаружения наземных объектов бортовыми РЛС в динамике конфликта // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал РАН. – 2001. – № 6. – URL: <http://www.jre.cplire.ru/koi/jul01/3/text.html> (дата обращения: 25.06.2018).

13. Псаев А.А. Справочник офицера по топографическим и специальным картам. – М.: УНИИНТЕХ, 2003. – 176 с.

14. Изучение тактических свойств местности: условий наблюдения и маскировочных свойств местности (определение взаимной видимости точек), условий проходимости, защитных свойств местности. – URL: <http://www.voenservice.ru/Izuchenietakticheskish-svoystv-mestnosti> (дата обращения: 14.03.2019).

15. Северный театр военных действий. Общий обзор / под ред. В.И. Варенникова. – М.: Воениздат, 1982. – 392 с.

16. Северо-восточный театр военных действий. Общий обзор / под ред. В.И. Варенникова. – Изд. 2-е. – М.: Воениздат, 1982. – 496 с.

17. Средневосточный театр военных действий. Общий обзор / под ред. В.И. Варенникова. – Изд. 2-е. – М.: Воениздат, 1981. – 560 с.

18. Юго-западный театр военных действий. Общий обзор / под ред. В.И. Варенникова. – Изд. 3-е. – М.: Воениздат, 1981. – 608 с.

Modeling and evaluating the effectiveness of spacecraft motion control when performing an evasive maneuver / E.N. Aleshin, V.S. Goncharevsky, A.M. Goncharov, N.V. Gorlanov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 8–16.

At various stages of design, production and operation of the spacecraft, there are many tasks that are solved by the orbital maneuver control system. The problem of forming the optimal control of the spacecraft movement during the evasion maneuver is considered, and the maneuver characteristics are selected. The results of a comparative analysis of calculations of the characteristics of the spacecraft evasion maneuver based on continuous and discrete control are presented.

Key words: evasion maneuver; motion control; spacecraft; orbital maneuvering.

Basyrov A.G., Koshel I.N. An algorithm for scheduling parallel computations in a degraded spacecraft onboard computing system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 17–26.

The planning of parallel processing of information in the on-board computer system (BCS) of the spacecraft (SC) that degrades under the conditions of external destructive factors is considered. An algorithm for scheduling parallel computations under conditions of degradation of the computing system is proposed.

On the basis of the simulation of the operation of the BCS of the SC, the analysis of the known algorithms for planning parallel calculations with estimates of the quality indicator of the BCS functioning under various implementations of parallel computing plans is carried out.

A new algorithm for planning parallel information processing, which takes into account the degradation of the computing system, is proposed and investigated.

Key words: on-board computer system, planning of parallel information processing, maximum possible efficiency.

Gruzdev N.V. Methodology for justifying a rational organizational and staff structure test formations of the cosmodrome // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 27–35.

The article proposes a methodology for substantiating the rational organizational and staff structure of the test formations of the cosmodrome that perform the tasks of preparing and launching a space rocket. The essence of this technique is to find such a distribution of specialists that would allow for the preparation and launch of a space rocket with the required quality, given the given technological schedules for the preparation and launch of a space rocket.

Key words: organizational and staff structure, test formation, technological schedule, space rocket.

Dichenko S.A., Finko O.A. System approach to the process of control and restoration of data integrity in protected information analytical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 36–49.

The system-functional aspects of secure information-analytical systems are considered in the task of reliable and safe data storage. One of the ways of formalized data representation in storage systems of secure information-analytical systems is proposed for describing control structures and restoring their integrity in conditions of destructive influences of an attacker and the environment. A mathematical model of the process of control and restoration of data integrity based on crypto-code transformations based on the aggregation of cryptographic methods and methods of error-correcting coding is presented. The feature of integrating well-known classical solutions to ensure data integrity is shown, which consists in reducing the introduced redundancy of control information, as well as in providing the information protection subsystem of information-analytical

systems with a new property: confirmation of the correctness of restoring the integrity of distorted or lost data due to the possibility of re-controlling them without additional resources cryptographic methods. The results of evaluating the developed model for monitoring and restoring data integrity are presented.

Key words: information and analytical systems, data storage systems, multidimensional data presentation, control and restoration of data integrity, verified integrity, cryptographic methods, anti-jamming coding, crypto-code constructions, emergence.

Kazahov B.D., Kukushkin M.A. Methodological approach to the selection of rational options for restoring information support for the functioning of organizational and technical systems for military purposes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 50–57.

The article deals with the issues of restoring information support for the functioning of organizational and technical systems for military purposes

Key words: restoring information support, organizational and technical systems for military purposes

Demyanov A.V., Pankratov A.V. Reengineering of programmable logic integrated circuits electronic components of complex technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 58–64.

The article presents the results of the practical application of tools for instrumental control of integrated circuits in the process of reengineering digital electronic components in modern control systems of complex technical objects, which allow to increase the information content of diagnostic methods.

Key words: instrumental control, complex technical object, technical diagnostics.

Demyanov A.V., Dolgov I.I., Pankratov A.V. Mathematical modeling of automatic testing of reconfigurable onboard electronic equipment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 65–72.

A mathematical description of the problem of testing reconfigurable onboard electronic equipment in the form of a problem of analyzing the evolution of a cellular automaton is proposed. The basic formalizations for the automaton test are given. The possibility and limitations of recognizing the state of the system from the configuration of the cellular automaton after the final experiment are shown.

Key words: diagnostics of reconfigurable systems, cellular automaton.

Tatarka M.V., Shuvaev F.L. Method of recognition of topologies of information-telecommunication networks on the basis of calculation of triad census // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 73–83.

The article discusses the method of recognition of topologies of information and telecommunication networks based on the calculation of the process vector, that is, a unique set of combinations of three-vertex subgraphs in the analyzed network. Recognition is carried out on the basis of hierarchical clustering, its results are evaluated on the basis of an original approach, which consists in using the mathematical apparatus of bootstrap samples. This method can be applied in many areas of modern science and technology, including in the military sphere in data analysis and in information security tasks.

Key words: Triad, clustering, bootstrap, dendrogram, graph model.

Alekseev V.F., Andrievskaya V.Y., Zhbanov K.K. Applying the mean forecast when creating and using digital elevation models // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 84–88.

In the article, the method of mean quadratic forecast for interpolation of specified heights at the nodes of a regular grid on a plane when creating accurate digital elevation models in local areas, as well as when determining the values of normal heights at given points using digital elevation models. The results of experimental studies are presented, the expediency of using the proposed approach is confirmed.

Key words: variance, covariance function, normal height, correlation radius, mean square prediction, digital elevation model.

Alekseev V.F., Danilova T.N., Medyannikov D.O. Methodology for determining gradients of gravity by results of processing measurements by relative gravimeters // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 89–94.

The article proposes a methodology for determining the second derivatives of the geopotential by the initial values of the accelerations of gravity. The procedure for laying gravimetric flights, processing field materials and monitoring the results is outlined.

Key words: method, gravity gradient, measurements, gravimeter, geopotential.

Method for adaptive prioritization of information and calculation tasks in monitoring systems for potentially dangerous natural and man-made processes under resource constraints / A.V. Alferov, A.I. Karin, S.A. Karin, V.V. Oktyabrskiy // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 95–104.

The paper describes a method for adaptive prioritization of information and calculation tasks in monitoring systems of potentially dangerous natural and man-made processes, which takes into account the current conditions of the situation and cause-and-effect relationships between individual events of the processes under consideration. The proposed method will significantly improve the performance of automated information systems for monitoring and forecasting potentially dangerous processes of natural and man-made nature in conditions of a shortage of their resources, since it will be able to provide pre-time preparation of initial data required for solving subsequent tasks with a higher priority value.

Key words: geospatial data, adaptive prioritization, integrated processing, cause-effect relationships, potentially dangerous processes of a natural and technogenic nature.

Astapovich A.V., Kolesnikov D.D., Medyannikov D.O. Technique of high-precision measurements of altitude change by electron tacheometers under special conditions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 105–111.

The results of a study of the influence of the main sources of errors on the accuracy of trigonometric leveling are presented. Ways to neutralize the effect of vertical refraction on the results of measurements of altitude change are given. A schematic diagram of geodetic formations for transmitting altitude change through obstacles in the production of geodetic research of linear objects is proposed. The results of experimental studies are presented.

Key words: leveling through obstacles, trigonometric leveling, refractive index, vertical angle, altitude change, height.

Astapovich A.V., Suvorov A.V., Chernov I.V. A correction method for inertial navigation systems of ground moving objects based on the use of gyroscopic, linear and measurements // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 112–123.

The results of a study of the influence of the main sources of errors on the accuracy of trigonometric leveling are presented. Ways to neutralize the effect of vertical refraction on the results of measurements of excesses are given. A schematic diagram of geodetic constructions for transmitting elevations through obstacles in the production of geodetic surveys of linear objects is proposed.

Key word: Obstacle leveling, trigonometric leveling, refractive index, vertical angle, excess height.

Varyushchenko S.B., Kosyrev S.V., Lebedev M.Y. Modeling the environmental safety management system of the Plesetsk Cosmodrome // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 124–130.

The authors proposed an approach to modeling the functions of the environmental safety management system of the Plesetsk Cosmodrome to assess the impact of environmental threats, to develop control actions when planning and assessing the quality of the tasks to be solved.

Key words: environmental safety, management system, model.

Gotur I.A., Kostromitinov A.V., Yaremenko I.A. The model of hydrometeorological data based on semantic analyses metadata of hydrometeorological messages // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 131–137.

The article considers model of hydrometeorological data based on semantic analyses metadata of hydrometeorological messages in the Military Forces of the Russian Federation (MF RF) automated systems of hydrometeorological support.

Key words: databases, relational data model, big data, hydrometeorological data, metadata.

On the issue of classification of impacts to different layers of the atmosphere / A.P. Doronin, S.I. Kozlov, N.A. Kozlova, A.S. Tymoshchuk // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 138–143.

The article contains the results of a system analysis of the effects on various layers of the atmosphere. The General classification of impacts and characteristics of anthropogenic unintentional and intentional (targeted) impacts are given. The list of the main sources of these types of impacts is given.

Key words: atmosphere, atmospheric layers, anthropogenic unintended impacts, anthropogenic intentional impacts, modification, geophysical processes and phenomena.

Chernov I.V. Universal method of azimuth determination with specified accuracy // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 144–150.

This article presents an approach to justify the method of determining direction azimuths, which allows to obtain requirements to the number of gyroteodolites in the set, the number of measurements performed by them and techniques of geodetic binding. The above approach allows to set working tolerances for measurement production. In addition, the given mathematical apparatus allows to design a methodology for determining azimuths of directions with specified accuracy. The initial data for the procedure justification are requirements for accuracy of direction azimuths obtaining, which allows to approach the justification of requirements for gyroteodolite instrument correction determination from the point of view of providing the specified orientation result.

Key words: gyroteodolite, gyrocompass, azimuth, orientation, given accuracy.

Hidden identification of the structure of social connections in the training collective based on analysis objective control data / K.M. Abrosimov, K.O. Gnidko, S.A. Makarov, A.S. Sergeev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 151–155.

The paper presents the results of an experimental study on the latent detection of social connections in the educational team based on objective control data using biometric technologies. The scheme of the experiment is outlined, and the results of the application of the developed software package for the formation of graphs of social connections of the whole educational team and individual students without the use of classical survey methods are briefly described. The results obtained have shown the practical usefulness of the developed approach, as well as algorithms and software components for covertly revealing the structure of social ties in the educational team, as well as early detection and prevention of deviant behavior based on data from objective control tools using the example of access control and food ordering control system (ACFOCS).

Key words: collection and processing of information, social graph, sociometry, bigram, objective control, prevention of deviant behavior.

Nagibin D.V. Information security intruder model based on information security guidelines // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 156–160.

The article deals with the issue of constructing a model of the violator of information security of information systems. Within the framework of the work, the violator is understood as one of the subjects of information interaction. On the basis of this, a typical functional and structural model of its information system is modeled for the subject. The simulation is based on the guidelines in the field of information security of the Russian Federation.

Key words: information security, information interaction, intruder model, information system.

The method of calculation of transverse loads acting on the missile units when transporting by rail / A.V. Antropova, A.V. Batalov, V.V. Kozlov, A.V. Lagun // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 161–170.

The main provisions of the method for calculating the transverse loads experienced by rocket blocks during their transportation in special containers by rail are presented. The method is designed to take into account the changeable factors of the railway track that affect the dynamics of transportation of rocket blocks. Of these factors, only two are considered, the most significant: the undulation of the railway bed and the presence of joints between the rail lashes. The method uses a two-dimensional mathematical model of railway transport, and therefore is only an evaluation tool aimed at finding technical solutions that reduce the load during the transportation of rocket blocks. The main estimated parameters in the calculations are the overloads acting on the transported rocket blocks and the amplitudes of their vibrations during transportation according to Russian Railways standards.

Key words: rocket block, railway transport, overload, rails, rail joints, traffic dynamics, railway track profile.

Borovskoy E.P., Kokhanovsky A.G., Kusnetsov A.B. Justification of the selection of objects of ground-based technological equipment of launch complexes that require additional control of the technical condition on the basis of additive convolution of partial indicators // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 171–178.

A method is proposed for selecting objects of ground-based technological equipment of the launch complex that require additional control of the technical condition on the basis of additive

convolution of private indicators. An example of using the method of selecting objects of ground-based technological equipment of launch complexes is given.

Key words: ground-based technological equipment, launch complex, technical condition control, private indicator, ranking, convolution.

Bulekbaeva M.Y., Goncharov P.S., Zozulya L.P. Application of the Laplace vector for estimate the parameters of the approach of a space debris particle to a spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 179–185.

Analysis of the space situation arising due to a suddenly emerging space debris particle (SDP) on the designated angular distance relative to the mentioned particle emergence spot has been considered. Considered analysis makes it possible to calculate the relative velocity of the spacecraft (SC) and emerging in its way SDP as well as to determine angles of the SDP approach to the SC.

Key words: spacecraft, space debris, angular distance, relative velocity.

Golikov I.O., Lebedev E.L., Mokhnatkin D.P. Algorithm for determining the degree of plastic deformation of the controlled section of the metal structure from the results of coercymetric control // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 186–191.

The procedure is presented, which is necessary to establish the degree of plastic deformation of the steel load-bearing structures of the starting equipment in the control areas according to the local values of the coercive force obtained as a result of the physical method of control and the previously obtained experimental dependences of the coercive force of structural steel on various values of elastic and plastic deformations.

Key words: coercimetric control, mechanical stresses, coercive force, metal structures.

Methodology for the generalized assessment of the current technical state of objects of ground space infrastructure of cosmodromes / N.V. Golovchinskay, V.O. Golovchinsky, N.S. Demidova, A.I. Ptyshkin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 192–196.

Currently, the problem of obtaining complete and reliable information about the current technical condition (TTS) of ground-based space infrastructure (ONKI) facilities at spaceports is still far from being solved. There are private developments, but a single view or a single approach to the analysis of the TTS ONKI as a whole does not exist yet. In General, the theoretical and applied issues of control and diagnostics are sufficiently fully considered for objects, systems and aggregates of General industrial complexes, railway and automobile transport, and ships of the Navy. However, the works devoted to these issues do not take into account the specific features of ground-based space complexes and their operating conditions. In the system of operation of both ONKI and in General objects of responsible and special purpose that have a significant technical complexity, a strategy for managing their technical condition is traditionally used, based on knowledge of the actual data of a specific.

Key words: current state, object of ground space infrastructure, resource, life cycle, failure, degree of problematcity.

Estimation of small unmodeled forces acting on a navigation spacecraft, using the method of splitting the motion of the center of mass / V.I. Gorbulin, D.L. Kargu, S.A. Polyakov, N.V. Radionov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 197–206.

A method is proposed for estimating small "unmodeled" forces acting on the center of mass of a navigation spacecraft (SC), using the method of splitting the motion of the center of mass. A mathematical model of spacecraft motion is presented to assess the effect of "unmodeled"

accelerations. The results of the prediction of deviations in the position of the spacecraft for a different period of constant acceleration are considered.

Key words: navigation spacecraft, trajectory change, "unmodeled" accelerations.

Gorin V.A., Karagodin V.V., Khomich I.V. Research of mathematical model of the synchronous generator in the Matlab environment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 207–213.

A mathematical model of an explicit-pole synchronous generator developed in the Simulink environment of the MatLab mathematical package using the Park-Gorev equations is proposed. The influence of the assumptions made in order to simplify the mathematical model on the correctness of the description of electromagnetic transients in a synchronous generator with an active-inductive static load with different $\cos\varphi$.

Key words: explicit-pole synchronous generator, mathematical model, Park-Gorev equations, transients.

Kapitonov O.V., Tupitsin Y.E., Shishkin E.V. Diagnostic model for assessing the technical condition of ventilation and air conditioning systems based on the composition of fuzzy relations // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 214–218.

The paper considers a method for evaluating the technical condition of ventilation and air conditioning systems using the mathematical apparatus of fuzzy set theory and fuzzy logic. A fuzzy model of the diagnostic object is considered. It is shown that based on expert knowledge in the field of operation of ventilation and air conditioning systems, it is possible to determine the root causes of system failure and determine the failure of a system element. If you encounter some fuzzy symptoms and assess them at the maximum values of membership functions of expert opinions, in the future, perhaps to draw conclusions about further system operation or repair. Thus, the diagnostic model based on the composition of fuzzy relations contains the elements necessary for assessing the technical condition.

Key words: intelligent systems, expert assessment, technical condition, ventilation and air conditioning systems.

Approbation of a model of the energy balance of an autonomous power supply system using a simulator to study the operation procedure of a solar power plant / D.L. Kargu, V.A. Kuznetsov, A.A. Skoptsov, V.A. Timofeev // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 219–227.

The energy balance model of the autonomous power supply system is presented. A variant of its approbation was carried out on the basis of a simulator, which is a new, useful technical solution in the form of a solar electric power plant (SEPP). The selection of the main components of the SEPP was carried out. The structural scheme of the SEPP is presented, as well as recommendations for its use in the educational process of the department.

Key words: energy balance model, simulator, on-board power supply system, solar power plant.

Kryzhanovskiy V.I., Slatov S.V., Trofimov I.A. Algorithm for the optimal speed of spatial rotation of the earth remote sensing spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 228–238.

An algorithm has been developed for calculating the trajectory of an optimal two-angle turn in terms of speed for the earth remote sensing spacecraft when pointing the observation equipment at a single object located on the earth's surface. At the end of the turn, the angles and angular velocities of the line of sight of the surveillance equipment must be equal to the angles and angular velocities of the line of direction to the target to prevent image shifting. In general, the optimal fuel consumption trajectory is calculated from one of the angles.

Key words: optimal speed turn, optimal fuel consumption turn, spacecraft, targeting, remote sensing of the Earth.

Kupriyanov N.A., Podyachev V.V., Shishov Y.A. The methodology for the independent calibration of the channels receiving and transmitting modules active phased array antenna // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P.239–244.

The article investigates approaches to calibration of active phased array antennas and reveals their disadvantages, which reduce the quality of calibration and restrict calibration separately on transmitting antenna arrays. Based on the results of the study, the authors proposed a method for independent calibration of channels of receiving and transmitting modules of the active phased array, based on the use of parameters of the control signal passing through the reference receiving and transmitting module located in the center of the antenna array. The main operations provided for when performing the method are described. A comparative analysis of the proposed methodology and the studied approaches is carried out.

Key words: active phased array, calibration, receiving and transmitting module, phase difference, amplitude ratios, control signal.

Litvinova N.B., Tupitsin Y.E., Shishkin E.V. Mathematical model of annual planning of technical operation of technical systems of special facilities using flexible maintenance strategies // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 245–249.

The article presents mathematical model and algorithm of technical operation planning of technical systems of special facilities, provided that flexible strategies are used. Taking into account the differences and peculiarities of technical systems in comparison with the technological equipment of special facilities, a mathematic model of annual planning was developed. Complex element reliability displays were adopted as the optimization criterion. The time limits and the duration of preventive work have been adopted.

When planning maintenance, not only the scope of preventive work is determined, but also the intensity of use of redundant elements when used for their intended purpose. To solve the optimization problem, an algorithm based on the random search method has been developed.

Key words: mathematical model, maintenance, flexible strategies, complex reliability indicators, usage intensity by purpose, optimization algorithm.

Samoylov E.B., Shmelev V.V. Methodology for estimating aircraft characteristics by the results of processing external jet measurements of the GEMS maneuver implementation area // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 250–258.

The paper considers a method for estimating the maximum attainable flight range of an aircraft based on the results of processing fragmentary external trajectory measurements of the GEMS (generalized energy management steering) maneuver - a maneuver to ensure the end of the characteristic speed stock to the required trajectory point. A three-stage rocket with solid-propellant propulsion systems without thrust cutoff was used as an object of observation. The proposed methodology is based on restoring the parameters of the active section of the aircraft trajectory for the case of the absence of maneuver and predicting the passive section of the payload trajectory. It can find application in the evaluation and control of flight performance characteristics of objects in the absence or low quality of telemetry results. An example of the application of the technique is given.

Key words: GEMS maneuver, external trajectory measurements, performance evaluation, aircraft.

Besedin S.M., Erofeev A.V., Katsik V.O. Methodological recommendations for the application of computer testing during monitoring of cadet knowledge in the process study of tactical-special disciplines // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 259–264.

The peculiarities of application of computer testing for assessment of knowledge of cadets in the course of practical training in tactical-special discipline are considered. It is shown that the use of computer testing before the start of each lesson allows to increase the level of knowledge of cadets and ensure the objectivity of assessments of training results.

Key words: training, monitoring, computer testing, specialized training complex, training command post.

Boguk Y.M., Golubev M.A. Functional model of organization of additional professional education of teachers of the Academy with partial application of distance educational technologies // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 265–270.

The article presents the results of a study of the procedure and features of implementing additional professional programs for professional retraining and advanced training of teachers with partial use of distance education technologies in the context of sanitary and epidemiological restrictions due to the spread and threat of infection with coronavirus infection (COVID-19).

Key words: distance learning, distance learning technologies, additional professional program, functional model.

Gorshkov M.A., Okunev S.Y. Formation of effective pedagogical thinking of a teacher of military history as an indicator of their professional competence // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 271–276.

In the article, based on the analysis of existing approaches, the author's method of forming effective pedagogical thinking of teachers of the military Academy is proposed. The approach is concretized for the formation of effective pedagogical thinking of teachers of military history in order to form their professional competence.

Key words: pedagogical thinking, situational approach, subject-methodical Commission, situational thinking, supra-situational thinking, professional competence of the teacher.

Kozlova L.Y. Extracurricular reading practice as a means of professional military competence formation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 277–283.

The article represents an innovative approach, applied as a part of the pedagogical experiment "Innovative methods of integrated foreign languages education at the senior courses of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky" at the Department of Foreign Languages. The effective algorithm of this method's application for the Extracurricular Reading Practice in order to form military-professional competence in conditions of critically low training load is described step-by-step.

Key words: military-professional competence, innovative technique, professionally-specific, authentic text, Extracurricular Reading Practice, terms glossary, authentic text, mind map.

Zinoviev V.G., Myshko V.V., Ogorodnikov V.P. The principle of determinism as the basis of a probabilistic-statistical approach to data analysis // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 284–293.

The principle of determinism is considered as a philosophical and methodological basis for the probabilistic-statistical approach to data analysis. In this context, the features and problematic issues

of the content of the categories of probability, possibility and reality, necessity and randomness, causality and determinism are analyzed. The methodology of the probabilistic-statistical approach to data analysis is justified.

Key words: possibility and reality, necessity and randomness, causality and determinism, measure, probability, probability-statistical approach, data analysis.

Pivovarov Y.F., Shilova S.G. Wild division of the Red army during the Civil war (1919–1920) // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 294–300.

In the article the authors briefly describe the process of formation and combat path of a specially created compound of the Red army during the Civil war in the USSR in the period from 1919 to 1920.: the First red Caucasian cavalry Wild division. It was created on the initiative of its legendary first commander G. D. guy. The main attention is paid to the historical documents testifying to difficulties caused by the solution of a problem on completing of parts and divisions of a division with nationally uniform structure from the people of the North Caucasus. The fighting way of a division up to its disbandment is shown. The article contains source and factual material about the reasons for the formation, structure and tasks of the special compound of the red army.

Key words: The civil war, the revolutionary military Council of the workers 'and peasants' Red Army division of wildlife, brigade, regiment and units, the commander, military operations, mobilization, States, frame, volunteers, officers, the soldiers, the location, disbanding.

Methodology for evaluating the actual degree of protection of special fortifications during their reconstruction and modernization / S.E. Aleshichev, S.V. Zarin, A.V. Machkevich, S.A. Machnev, A.M. Sycheva // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 301–306.

The paper proposes a method for evaluating the actual protection degree of special fortifications based on the calculation of the required thickness of their protective structures. The applicability of the method is proved when changing the materials properties of protective structures and their geometric characteristics, as well as changes in the volume and structural solutions of special fortifications. Testing of the method is shown on the example of special fortifications with the use of high-strength surface-hardened concrete. The effect of increasing the actual degree of protection when using surface-hardened concrete, calculated according to the proposed method, is shown.

Key words: special fortification structure, degree of protection, thickness of protective structures, high-strength concrete, surface hardening.

Heat-resistant non-autoclaved cellular fiber-concrete for the construction of launch facility of space rocket complex «Angara» / V.I. Gera, Y.A. Kamenev, V.G. Kotovich, A.S. Solomahin, A.M. Sychova // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 307–314.

The paper presents the results of selecting the composition of heat-resistant non-autoclaved cellular fiber-concrete for the purpose of application in the construction of coatings and gas duct of launch facilities. It is shown that the presence of basalt fiber in the foam concrete composition makes it possible to obtain heat-insulating fiber concrete of medium density D500 on quartz filler with enhanced heat-shielding and deformation properties.

Key words: launch facility, heat-resistant non-autoclaved cellular fiber-concrete, gas duct, fiber, basalt, heat resistance.

Mishchenko A.V. Limit states of structurally inhomogeneous rods under thermal and multi-parametric power influence // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 315–323.

The method for calculating the limiting states under multivariate thermal and force influences is proposed for structurally inhomogeneous rods. Features of limiting surfaces in a multiparameter space are revealed. The method is illustrated by a numerical example of an inhomogeneous rod of a T-shaped section, loaded with transverse and longitudinal forces. The boundary of limiting states in the form of a flat polygon is constructed. At the characteristic points of the limiting boundary, the limiting strain distributions are shown. At corner points of the boundary, the strength criterion is implemented in the form of a two-point criterion.

Key words: heterogeneous rod, layered rod, strength criterion, multi-parameter effect, thermal influence.

Maslov V.P. The methodology for determining routes, taking into account the tactical properties of the terrain and the time the units began to move along them // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2020. – Release 676. – P. 324–335.

The method for calculating the limiting states under multivariate thermal and force influences The special importance of the requirements of timeliness and secrecy to maneuver by forces (units) was noted. To ensure their implementation, a methodology is proposed for determining the routes and the start time of the march, as an element of the unit's maneuver, based on a priori estimates of the terrain and masking conditions and the method of accounting for them. The features of the developed methods are given, including the analytical dependencies of the assessment of the masking properties of the area. The headquarters actions algorithm for their assessment and accounting is described.

Key words: maneuver of units, timeliness and secrecy of the march, terrain and its camouflage properties, accounting for the tactical properties of the terrain.

Абросимов Кирилл Максимович, курсант 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 753-17-72, e-mail: 311099list.ru@gmail.com

Алексеев Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 217-03-39, e-mail: vfalex_vti@mail.ru

Алёшин Евгений Николаевич, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8(812) 347-95-62, e-mail: vka.mil.ru

Алешичев Сергей Евгеньевич, преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 920-65-99, e-mail: sergspbcrpf@rambler.ru

Алфёров Александр Викторович, адъюнкт 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 325-14-15, e-mail: nil5-ksa@yandex.ru

Андриевская Виктория Юрьевна, старший научный сотрудник 162-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: 8 (921) 635-46-61, e-mail: vika75_07@mail.ru

Антропова Александра Владимировна, младший научный сотрудник 133-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 593-53-25, e-mail: alekcx.antro@mail.ru

Астапович Анатолий Владимирович, доцент 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Басыров Александр Геннадьевич, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: vka_24kaf@mil.ru

Баталов Алексей Владимирович, преподаватель 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 247-23-44, e-mail: batalkin1@mail.ru

Беседин Сергей Михайлович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (961) 804-27-30.

Богук Юрий Михайлович, профессор 71-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (950) 016-07-01.

Боровской Евгений Павлович, научный сотрудник НИЦ войсковой части 13991 (164170, Россия, г. Мирный, Архангельской обл.); тел.: 8 (921) 676-23-91.

Булекбаева Марина Юрьевна, младший научный сотрудник 123-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Варющенко Сергей Борисович, профессор 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-93, e-mail: alex509ra@yandex.ru

Гера Василий Иосифович, начальник 4-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук доцент; тел.: 8 (911) 833-41-13, vka@mil.ru

Гнидко Константин Олегович, профессор 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (999) 532-71-82, e-mail: greeny598@yandex.ru

Голиков Игорь Олегович, доцент 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-11.

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

Головчинский Владимир Орестович, старший научный сотрудник 142-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 581-97-09, e-mail: gvoseverples1@rambler.ru

Голубев Михаил Александрович, доцент 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-62.

Гончаревский Вилен Степанович, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: vka.mil.ru

Гончаров Алексей Михайлович, заместитель начальника 9-го факультета – начальник учебной части Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8(812) 347-95-62, e-mail: vka.mil.ru

Гончаров Павел Сергеевич, начальник 12-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; e-mail: vka@mil.ru

Горбулин Владимир Иванович, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Горин Вадим Александрович, преподаватель 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 793-93-70, e-mail: vadim044542010@mail.ru

Горланов Николай Викторович, преподаватель 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: vka.mil.ru

Горшков Михаил Александрович, старший преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук; тел.: 8 (921) 928-53-73, e-mail: vka@mil.ru

Готюр Иван Алексеевич, начальник 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mail.ru

Груздев Николай Валентинович, старший научный сотрудник 24-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (911) 999-21-82, e-mail: nikgruzdew@rambler.ru

Данилова Татьяна Николаевна, научный сотрудник 163-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 204-35-78, e-mail: dan-tat@mail.ru

Демидова Наталья Сергеевна, младший 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: Demidova_natka@mail.ru

Демьянов Александр Владимирович, заместитель начальника 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-36, e-mail: a.demjanov@mail.ru

Диченко Сергей Александрович, докторант специальной кафедры Краснодарского высшего военного орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменного училища имени генерала армии С.М. Штеменко (350000, Россия, Краснодар, ул. Красина, 4); кандидат технических наук; тел.: 8 (961) 593-17-50, e-mail: dichenko.sa@yandex.ru

Долгов Илья Игоревич, адъюнкт 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-36, e-mail: ilya.dolgov@rambler.ru

Доронин Александр Павлович, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: doronin52@mail.ru

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.

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 (932) 601-26-64, e-mail: zhbanovkk@mail.ru

Зарин Сергей Владимирович, начальник 141-й научно-исследовательской лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 900-97-98, e-mail: sergeyzarin27091989@gmail.com

Зиновьев Валерий Григорьевич, профессор 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

Зозуля Людмила Петровна, старший научный сотрудник 122-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; e-mail: vka@mil.ru

Казахов Батраз Джумаевич, начальник 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13); доктор военных наук, профессор, тел.: 8 (951) 664-50-26, e-mail: vka@mil.ru

Каменев Юрий Александрович, преподаватель 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 972-38-22, e-mail: vka@mil.ru

Капитонов Олег Витальевич, заместитель начальника учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: kapitonow@bk.ru

Карагодин Владимир Викторович, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 227-36-79, e-mail: vladimirkar@rambler.ru

Каргу Дмитрий Леонидович, начальник 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Карин Александр Иванович, научный сотрудник 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 325-14-15, e-mail: sa-sanya@yandex.ru

Карин Сергей Александрович, доцент 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 325-14-15, e-mail: Sergey.Karin@gmail.com

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 Станислав Иванович, ведущий научный сотрудник Института динамики геосфер РАН (119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 38, корп.1); доктор физико-математических наук; тел.: 8 (919) 760-18-55, e-mail: s_kozlov@indox.ru

Козлова Лариса Яковлевна, доцент 113-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат филологических наук; тел.: 8 (812) 347-96-09.

Козлова Наталья Александровна, научный сотрудник 323-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) 347-97-74, e-mail: kozlova.nat2012@yandex.ru

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

Костромитинов Алексей Валерьевич, преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Косырев Сергей Викторович, профессор 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-93, e-mail: kosyrev.sergey@yandex.r

Котович Виталий Гендрихович, начальник 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-45, e-mail: vka@mil.ru

Кохановский Андрей Геннадьевич, доцент 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-26.

Кошель Игорь Николаевич, начальник 2-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-20, e-mail: vka_24kaf@mil.ru

Крыжановский Владимир Иванович, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 310-66-37.

Кузнецов Александр Борисович, начальник 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-26.

Кузнецов Виктор Анатольевич, начальник лаборатории 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.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

Куприянов Николай Александрович, начальник 551-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) 347-95-32, e-mail: vka@mil.ru

Лагун Андрей Валерьевич, доцент 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 937-09-02.

Лебедев Евгений Леонидович, начальник 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-99-11.

Лебедев Михаил Юрьевич, адъюнкт 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93, e-mail: lebedev.m1hall@yandex.ru

Литвинова Наталья Борисовна, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: skarlet27@list.ru

Макаров Сергей Александрович, 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); тел.: 8 (911) 107-77-37, e-mail: makarovsergei12@rambler.ru

Маслов Владимир Петрович, старший преподаватель 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.

Мацкевич Андрей Вадимович, доцент 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 857-22-17, e-mail: amsychova@yandex.ru

Мачнев Сергей Александрович, доцент 41-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 004-01-02, e-mail: machnevs@rambler.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 (965) 064-66-20, e-mail: Medyannikovdaniil@gmail.com

Мищенко Андрей Викторович, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин Новосибирского высшего военного командного училища (630117, Россия, Новосибирск, ул. Иванова, 49); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (913) 939-38-03, e-mail: mavr59@ngs.ru

Мохнаткин Дмитрий Петрович, преподаватель 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-11.

Мышко Василий Васильевич, доцент 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

Нагибин Дмитрий Владимирович, адъюнкт 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (916) 361-22-79, e-mail: nagibin.dmitry@gmail.com

Огородников Владимир Петрович, профессор 109-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор философских наук, профессор; тел.: 8 (951) 668-24-86, e-mail: vka@mil.ru

Октябрьский Владимир Валентинович, старший преподаватель 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 325-14-15, e-mail: valentoss@gmail.com

Окунев Сергей Юрьевич, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат исторических наук, доцент; тел.: 8 (911) 957-34-93, e-mail: vka@mil.ru

Панкратов Алексей Владимирович, начальник 36-й кафедры Военно-космической (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-36, e-mail: pankratov-av@rambler.ru

Пивоваров Юрий Фёдорович, ведущий научный сотрудник 22-го Научно-исследовательского института (военной истории) Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации (197198, Россия, Москва, пр-т. Вернадского, 100); доктор исторических наук, профессор; тел.: 8 (499) 147-45-65, e-mail: pivovarovyuri@mail.ru

Подъячев Виталий Владимирович, начальник 55-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: vka@mil.ru

Поляков Сергей Александрович, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Птушкин Анатолий Иванович, профессор 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof@yandex.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

Самойлов Евгений Борисович, доцент 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: 89602339855@mail.ru

Сергеев Артем Сергеевич, помощник начальника учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (960) 255-68-82, e-mail: artsergeev@yandex.ru

Скопцов Алексей Андреевич, младший научный сотрудник 27-го Центрального научно-исследовательского института Министерства обороны Российской Федерации (123007, Россия, Москва, 1-й Хорошевский пр-д, 5); тел.: 8 (495) 945-70-77.

Слатов Сергей Валерьевич, начальник лаборатории 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 767-55-31.

Соломахин Андрей Сергеевич, доцент 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 912-02-91, e-mail: vka@mil.ru

Суворов Александр Вячеславович, адъюнкт 73-й кафедры, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: suvorof506@mail.ru

Сычева Анастасия Максимовна, профессор 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 857-22-17, e-mail: amsychova@yandex.ru

Татарка Максим Васильевич, докторант 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 297-75-95.

Тимофеев Владимир Александрович, адъюнкт 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Тимошук Александр Сергеевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: astim2@yandex.ru

Трофимов Илья Анатольевич, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 163-12-99.

Тупицин Юрий Евгеньевич, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: nordman14056@yandex.ru

Финько Олег Анатольевич, профессор специальной кафедры Краснодарского высшего военного орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменного училища имени генерала армии С.М. Штеменко (350000, Россия, Краснодар, ул. Красина, 4); советник Российской академии ракетных и артиллерийских наук (107564, Россия, Москва, 1-я Мясниковская ул., 3, стр. 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (988) 241-11-71, e-mail: ofinko@yandex.ru

Хомич Иван Владимирович, курсант Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 992-77-22.

Чернов Иван Владимирович, доцент 72-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812)347-95-76, e-mail: 4ern86@bk.ru

Шилова Светлана Геннадьевна, научный сотрудник Научно-исследовательского института (военной истории) Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации (197198, Россия, Москва, пр-т. Вернадского, 100); кандидат исторических наук; тел.: 8 (499) 147-45-65, e-mail: SvetlanaShilova@yandex.ru

Шишкин Евгений Вячеславович, докторант 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 397-96-43, e-mail: shishkin78@yandex.ru

Шишов Юрий Аркадьевич, профессор кафедры Санкт-Петербургского военного ордена Жукова института войск национальной гвардии Российской Федерации (198206, Россия, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилютова, 1); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 415-33-40, e-mail: info@spvi.ru

Шмелёв Валентин Валерьевич, заместитель начальника 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: valja1978@yandex.ru

Шуваев Фёдор Леонидович, старший научный сотрудник 273-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) 297-75-95, email: cadetfed@mail.ru

Яременко Иван Андреевич, адъюнкт 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@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.

Алексеев Тимофей Владимирович, профессор 108-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор исторических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-04.

Башкирцев Виктор Павлович, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-23-57.

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

Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович, заведующий 111-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: atiman@mail.ru

Гнидко Константин Олегович, профессор 61-й кафедры 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

Горшков Лев Капитонович, профессор 114-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 694-33-86, e-mail: manev@mail.ru

Гусев Николай Николаевич, старший преподаватель 42-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 958-42-90, e-mail: goussev_nn@mail.ru

Девяткин Александр Михайлович, начальник 6-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-97-60, e-mail: lilaste@rambler.ru

Калинин Владимир Николаевич, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации; доктор технических наук, профессор; дей-

ствительный член Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Санкт-Петербургской инженерной академии; член-корреспондент Международной инженерной академии, Российской инженерной академии, Международной академии информатизации; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@mail.ru

Каргу Дмитрий Леонидович, начальник 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Козлов Владимир Владимирович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof.kozlov@yandex.ru

Косырев Сергей Викторович, профессор 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-93.

Косяков Евгений Николаевич, профессор 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 235-30-63, e-mail: e-kosyakov@yandex.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

Летучий Юрий Александрович, старший научный сотрудник 32-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 (812) 235-28-71, e-mail: vka.52@mail.ru

Масленникова Людмила Леонидовна, профессор кафедры «Инженерная химия и естествознание» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, 9); доктор технических наук.

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

Миронов 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.

Осипов Георгий Константинович, профессор 72-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор географических наук, профессор; тел.: 8 (812) 694-82-12, e-mail:Osipov-G-K-2005@yandex.ru

Павлов Александр Николаевич, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-62, e-mail: pavlov62@list.ru

Силантьев Сергей Борисович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-21.

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

Фоминов Иван Вячеславович, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.